

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

СибОптика-2015

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2015

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Шабурова

Доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств
и технологий СГУГиТ, Новосибирск
В. С. Айрапетян

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии
и технологии оптического производства СГУГиТ, Новосибирск
О. В. Минин

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем
и оплотехники СГУГиТ, Новосибирск
Д. В. Чесноков

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля
2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. ма-
териалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 243 с.

ISBN 978-5-87693-822-0 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-818-3

ISBN 978-5-87693-795-7

В сборнике опубликованы материалы XI Международного научного конгресса «Ин-
терэкспо ГЕО-Сибирь-2015», представленные на Международной научной конференции
«СибОптика-2015».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-822-0 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-818-3

ISBN 978-5-87693-795-7

© СГУГиТ, 2015

Сборник включен в систему РИНЦ.

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГРАДИЕНТНОГО ЭНДОСКОПА

Григорий Владимирович Флюдер

Варшавский политехнический университет, 00-661, Польша, Варшава, пл. Политехники, 1, кафедра инженерной фотоники, магистрант, e-mail: grzegorz.fluder@gmail.com

Алексей Валентинович Бахолдин

Университет ИТМО, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, зав. кафедрой прикладной и компьютерной оптики, тел. (812)595-41-65, e-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

Анна Олеговна Вознесенская

Университет ИТМО, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики, тел. (812)595-41-65, e-mail: voznesenskaya@mail.ifmo.ru

Работа посвящена разработке оптической системы жесткого эндоскопа, состоящей из трех элементов – объектива, транслятора и окуляра. В качестве первых двух элементов системы рассмотрены градиентные линзы. Система предназначена для визуального осмотра желудочно-кишечного тракта с дифракционным качеством изображения.

Ключевые слова: медицинские эндоскопы, жесткие эндоскопы, градиентные линзы, сапфировые наконечники.

DESIGN OF THE ENDOSCOPIC OPTICAL SYSTEM WITH THE USE OF GRADIENT INDEX LENSES

Grzegorz V. Fluder

Warsaw University of Technology, 00-661, Poland, Warsaw, pl. Polytechnics, 1, Institute of Micromechanics and Photonics, master student, e-mail: grzegorz.fluder@gmail.com

Alexey V. Bakholdin

ITMO University, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av., 49, Ph. D., Associate Professor, Head of Applied and Computer Optics Department, tel. (812)595-41-65, e-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

Anna O. Voznesenskaya

ITMO University, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av., 49, Ph. D., Associate Professor, Applied and Computer Optics Department, tel. (812)595-41-65, e-mail: voznesenskaya@mail.ifmo.ru

The work is aimed to design an optical system for a rigid endoscope consisting of three main components – an objective, relay lens and eyepiece. As the first two elements gradient index lenses are used. The main purpose of the system is examining in the visible spectrum gastrointestinal tract with diffraction limited image quality.

Key words: medical endoscopes, rigid endoscopes, GRIN lenses, sapphire tips.

Introduction

Endoscopes play a big role in different fields of science, technique and medicine. They are used for observation of difficult to access objects. They are of especially big significance in diagnostics of many different illnesses – they are used among other things in bronchoscopy, arthroscopy, laryngoscopy, gastroscopy etc. For each application different factors have to be taken into account.

The endoscopic system under consideration is designed to be used in gastroscopy – the examination of the upper part of the gastrointestinal tract up to the duodenum. It is the most commonly performed endoscopic examination. It is used to diagnose many different afflictions, some of which pose a serious threat to health and life.

Since the system has to provide possibility of inspecting the gastrointestinal up to the stomach and duodenum, its length and working distance should be significant. Moreover, small diameter of the tube is crucial. The image quality of the system should be very high. Such a way, basic requirements for the system are: working distance 125 mm; angular field of view $2\omega=25^\circ$; diameter of the lenses 2,2 mm; fully corrected coma; diffraction limited image; working in visible spectrum.

Flexible endoscopes with the use of optical fibres exist. The flexibility is certainly a significant advantage, however rigid systems offer superior image quality [1], therefore such a system has been chosen for this project. Thanks to this quality a better resolution may be obtained and therefore detecting very small changes inside of the human body is possible. Because of the inflexibility of the system, it is vital to provide as small diameter of the system as possible.

To provide compactness and simplicity of the endoscope gradient index lenses (GRIN) were considered as the objective and relay system [1-6].

In order to correct more aberrations, it is necessary to introduce more degrees of freedom. It can be done by making the surfaces of the GRIN lenses curved. In that case any four of the third-order aberrations may be corrected. In addition chromatic aberrations can also be corrected.

The schematic design of the endoscopic system is shown in Fig.2. As mentioned previously, the system consists of the objective that creates the image of the object on its rear surface, the relay lens which periodically creates intermediate images inside of it and the eyepiece.

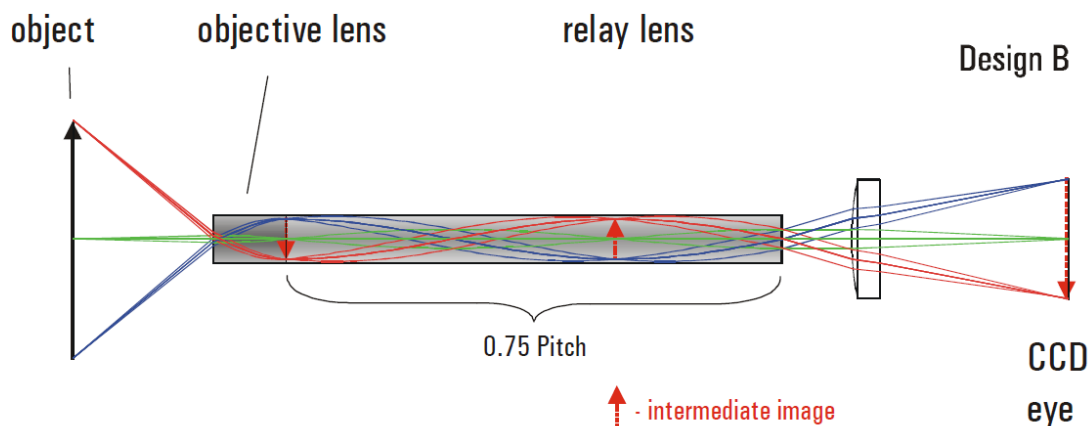


Fig. 1. Schematic layout of the endoscopic system [5]

In the so far realised part of the project the objective and relay lens have been designed. The analysis has been conducted in monochromatic light.

Design of the objective

A radial GRIN lens with the entrance pupil diameter equal to 0,75 mm was designed as an objective. Additional sapphire window was introduced before the lens in order to protect the system from external factors. The aperture stop is located on the sapphire's front surface. The image is created at the back surface of the objective. The diameter of the lens is equal to 2,2 mm.

The radial gradient of the refractive index may be defined with the following well-known formula

$$N(r) = N_0 + N_1 r^2 + N_2 r^4 + \dots,$$

where N_0 – on-axis refractive index; r – distance from the axis in the cross section.

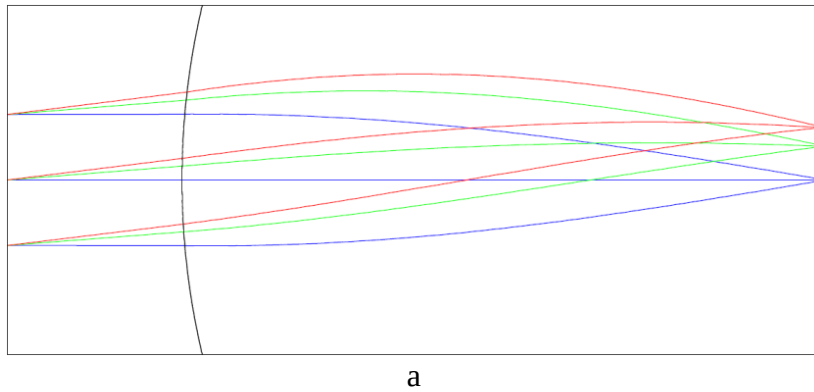
By varying N_0 , N_1 , and N_2 coefficients, one can obtain systems that differ not only in geometry, but also in image quality. Several designs and optical properties of the objective are presented in Fig.2-4.

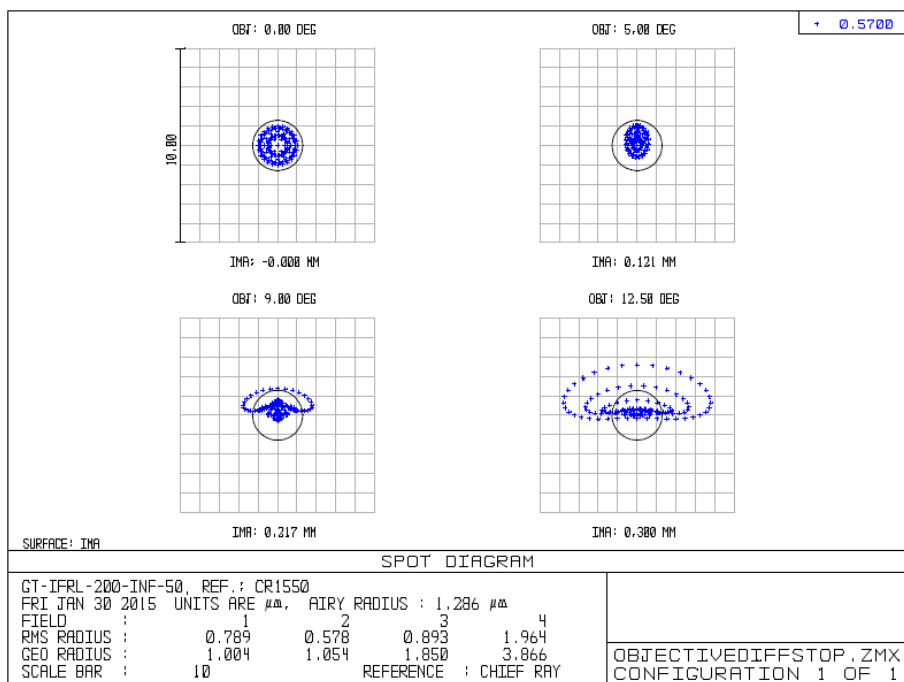
The first objective (Fig.2) is rather short with a large gradient, which might be difficult to manufacture. It also does not perform well enough in terms of aberrations. Therefore other solutions have been considered.

For the second system the Airy radius is larger than in the previous case (Fig. 3). The spots for the whole field of view fall within it. There is still some amount of coma. In the next step, the N_2 coefficient, the radius between the sapphire window and the lens, and the thickness of the lens have been slightly modified (Fig. 4).

For the whole field of view the image is diffraction limited. Spherical aberration, coma and astigmatism are well corrected, there is some amount of field curvature. The distortion is about 2%, which is an acceptable value. This objective was chosen for further investigation.

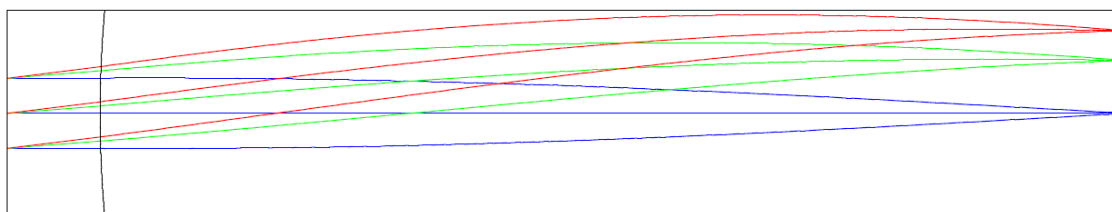
In the design the sapphire window with one curved surface was used. Sapphire is a hard material, but nevertheless it is possible to manufacture such curvatures with optical quality.



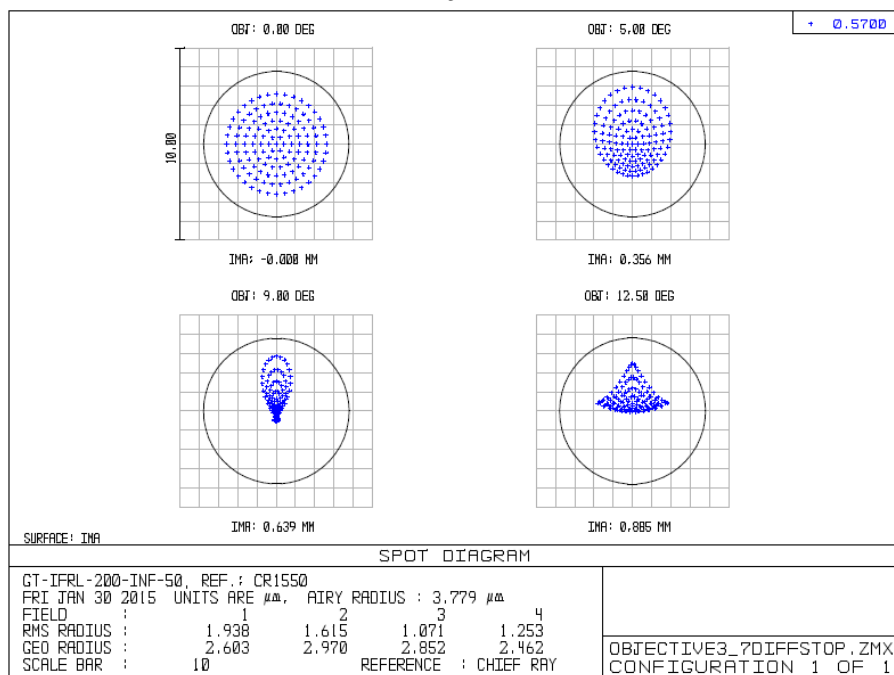


b

Fig. 2. GRIN objective I (total length 4.72 mm, $N_0 = 1,629$; $N_1 = -0,155$; $N_2 = -4,792 \cdot 10^{-5}$): a – layout, b – spot diagrams

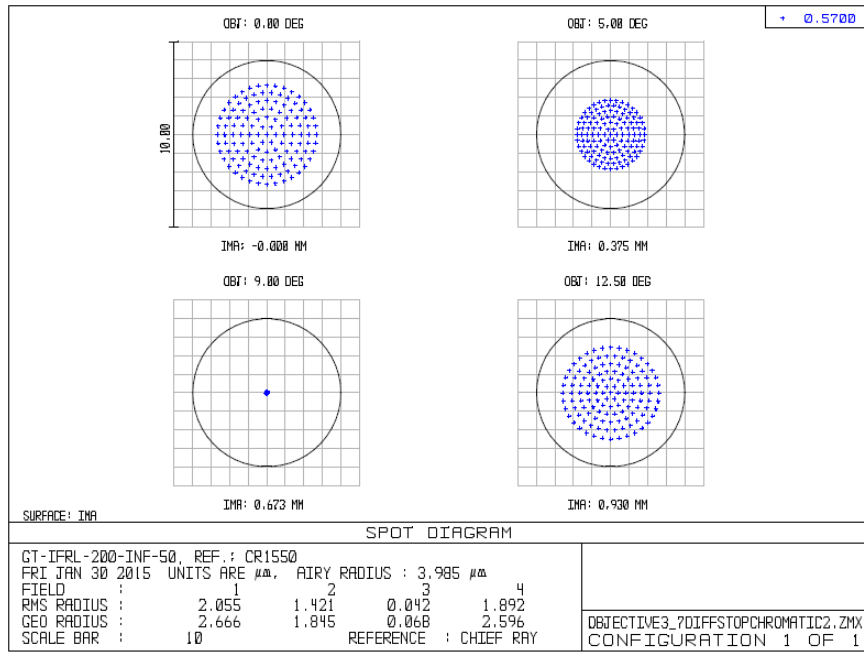


a

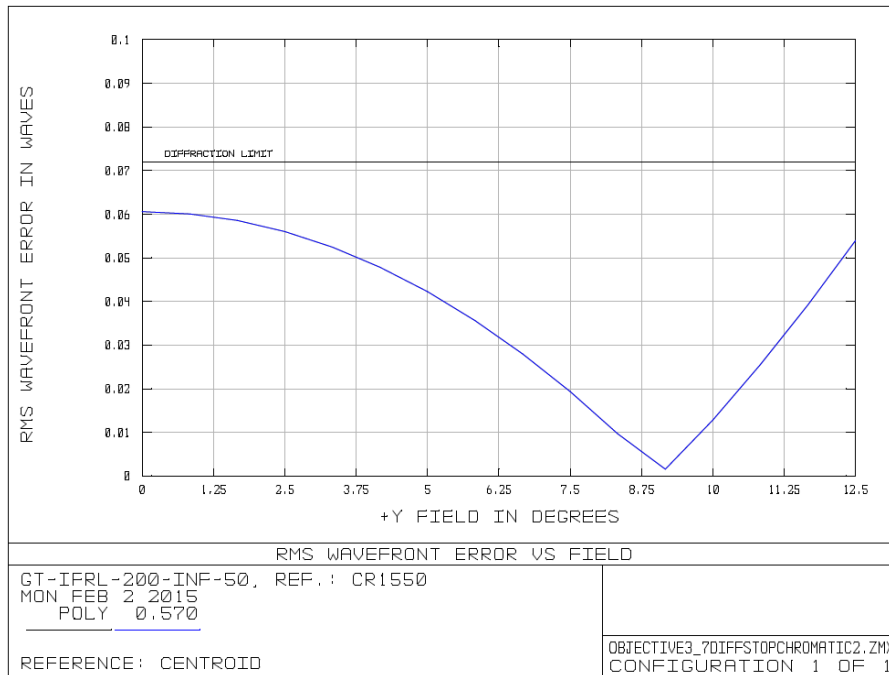


b

Fig. 3. GRIN objective II (total length 12 mm, $N_0 = 1,629$; $N_1 = -0,018$; $N_2 = -4,755 \cdot 10^{-5}$): a – layout, b – spot diagrams



a



b

Fig. 4. GRIN objective II modification (total length 12.6 mm, $N_0 = 1,629$; $N_1 = -0,016$; $N_2 = -4,070 \cdot 10^{-5}$); a - spot diagrams, b - RMS wavefront error

Design of the relay lens

After choosing the objective, the relay lens was designed. During the process it was found that adding a thin negative GRIN lens between the objective and the relay lens enabled obtaining better results (Fig.5). Design parameters of the system are shown in the Table. Total length of the system 100 mm; gradient of the negative lens $N_0 = 1,629$; $N_1 = 0,010$; $N_2 = -5,338 \cdot 10^{-3}$; gradient of the relay lens $N_0 = 1,629$; $N_1 = -0,013$; $N_2 = -3,994 \cdot 10^{-5}$.

The obtained system is diffraction limited within the field of view $2w=10^0$. There is still field curvature. It was not fully corrected by the negative lens. Distortion is equal to about 1%, which is a very good value (Fig.6).

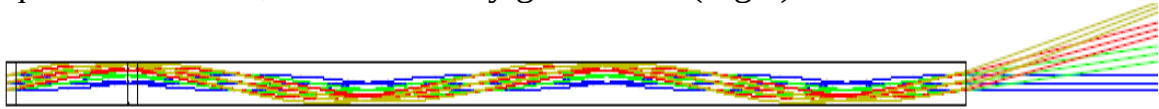
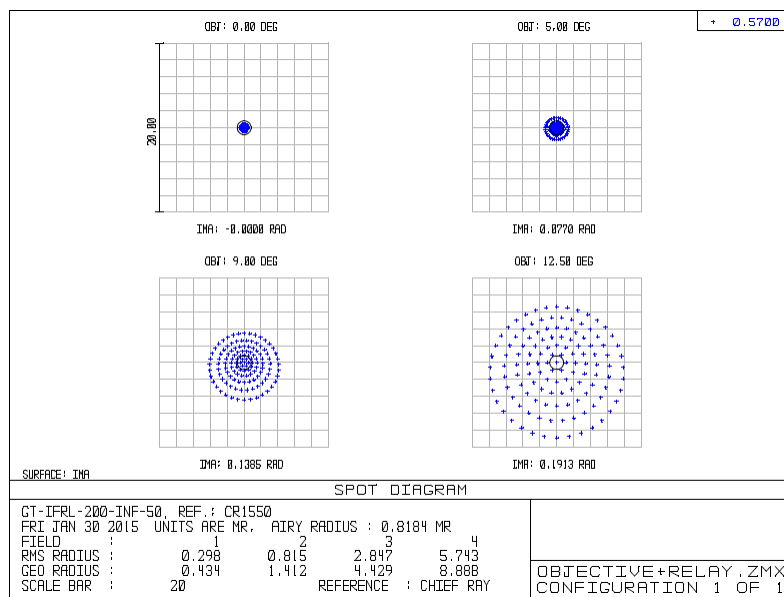


Fig. 5. Objective and relay lens

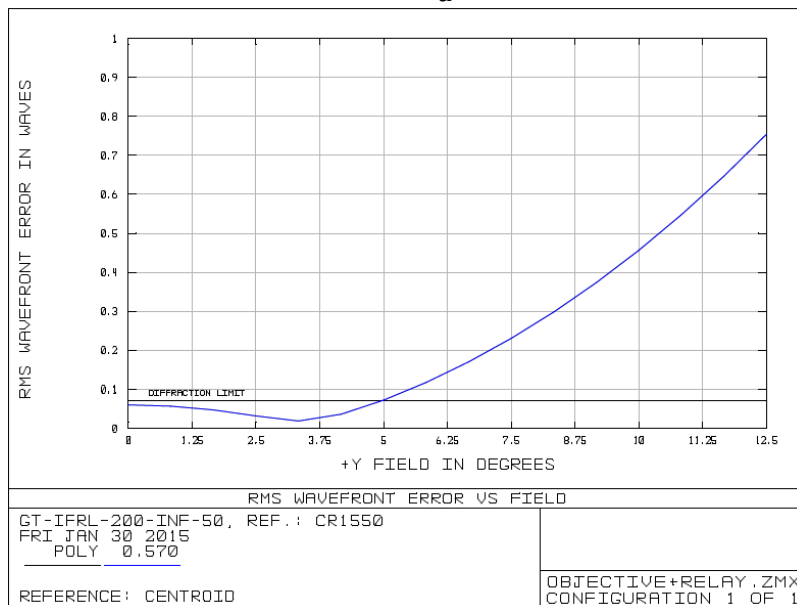
Table

Design parameters of the objective – relay lens system

Surface	Radius [mm]	Thickness [mm]	Material
Object	125	Infinity	Air
1 st (sapphire)	Infinity	1	Sapphire
2 nd (objective)	13,819	11,607	GRIN
3 rd (negative lens)	Infinity	1	GRIN
4 th (relay lens)	Infinity	85,388	GRIN



a



b

Fig. 6. GRIN objective – relay lens system: a - spot diagrams, b - RMS wavefront error

Conclusion

The designed part of the endoscopic system does not provide satisfying image quality yet. It will be further optimized in the future to provide diffraction limited image in the whole field of view.

The system designed so far is easily manufacturable – the gradients of the refractive indices are rather small. Most of the surfaces in the system are flat, only one surface of the objective and one of the sapphire window are curved, which also makes the machining easier.

The eyepiece has to be added to make the system complete. It will be designed with the use of ordinary refractive lenses. It could compensate some of the aberrations of the previous components, which might improve the overall quality.

Finally, the chromatic aberrations have to be corrected. So far the system was examined for the monochromatic light with wavelength 0,55 μm . The system will work in the visible spectrum, therefore it is necessary to take into account the dispersion of used optical elements.

Acknowledgment

This publication is a result of research supported by Solaris Optics S.A.

Bibliography

1. Rens Wientjes, Herke J. Noordmans, Jerine A. J. van der Eijk, Henk van den Brink Automated Objective Routine Examination of Optical Quality of Rigid Endoscopes in a Clinical Setting, PLoS ONE 8(3), e59579, doi:10.1371/journal.pone.0059579;
2. Bass M. Handbook of Optics Vol. II, McGraw-Hill, Inc., 1995. P. 9.1-9.9;
3. Bociort F., Imaging properties of gradient-index lenses, Verlag Koester, Berlin, 1994;
4. Possner T., Messerschmidt B. GRIN micro-optical systems for mobile medical and sensor applications, SpectroNet Collaboration Forum 20.04.2011, Germany.
5. GRIN endoscopic systems, Grintech catalogue [electronic resource] - <http://www.grintech.de/grin-lenses-and-lens-systems-for-imaging-optics.html>;
6. Khatsevich T.N., Mikhailov I.O. Endoscopes. – Novosibirsk: SGGA, 2002. – 196 p. [electronic resource] - <http://www.prooptiku.ru/endoskopy>.

© Г. В. Флюдер, А. В. Бахолдин, А. О. Вознесенская, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ И ВОЗМОЖНОСТИ ПАССИВНОЙ АТЕРМАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В ОБЛАСТИ 8–12 МКМ СИСТЕМ

Галина Эдуардовна Романова

Университет ИТМО, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики, тел. (812)595-41-46, e-mail: romanova_g_e@mail.ru

Гжегож Пысь

Варшавский политехнический университет, 00-661, Польша, Варшава, пл. Политехники, 1, кафедра инженерной фотоники, студент, e-mail: grzegorzpys@gmail.com

Работа посвящена исследованию возможности создания ИК оптических систем с пассивной компенсацией терморасфокусировки. Представлены некоторые результаты для двух- и трехлинзовых систем.

Ключевые слова: инфракрасная оптика, расчет оптических систем, термоабберации, атермализация, ахроматизм.

RESEARCH OF ABERRATION PROPERTIES AND PASSIVE ATHERMALIZATION OF LWIR OPTICAL SYSTEMS WORKING WITHIN SPECTRAL RANGE 8-12 μ m.

Galina E. Romanova

ITMO University, 197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr., 49, Ph. D., associate professor of Applied and Computer Optics Department, tel. (812)595-41-46, e-mail: romanova_g_e@mail.ru

Grzegorz Pyś

Warsaw University of Technology, 00-661, Poland, Warsaw, Pl. Politechniki 1, Department of Photonics Engineering, student, e-mail: grzegorzpys@gmail.com

The work is aimed to research of possibility of designing and creating of the IR systems with thermal defocus compensation. Some results for two- and three-lens system are given.

Key words: infrared optics, optical system design, thermoaberrations, athermalization, achromatism.

1. Introduction

Thermal imaging camera was initially developed for military applications and for many years this technology was restricted to military and defense, academia and narrow niche markets. However, due to developments in uncooled IR imaging technology and availability of affordable IR cameras, the IR imaging market has witnessed a shift in focus towards the applications related to commercial segment [1, 2]. Now, thermal imaging cameras are widely used around the world for applications as diverse as microelectronics, security, surveillance, firefighting, paper processing, automotive, plastics, assessment of materials, target heat signatures, mechanical testing

and much more. Value of global infrared optics market is substantially increasing every year.

Usual working temperature of IR systems is situated in range from -40 up to +60 Celsius degrees. Image quality of such systems should be stable over the whole working temperature range. Due to temperature dependence of properties of optical materials, lens housing and other mechanical parts it is a very difficult task to keep the required system stability.

There are several compensation methods of the most considerable thermal aberration - thermal defocus [3, 4]. Among these methods are active and passive ways of thermal compensation. The passive compensation ways are the most attractive because complicated mechanical parts or devices are not required. One of the ways is to find such a combination of optical materials for particular housing materials that provides passive correction of thermal defocus.

The method of designing of IR systems based on simple ideas was proposed a few years ago [5]. During designing we can choose a set of optical powers that eliminates field curvature in the system. The next step is a proper designing way of components to correct spherical aberration and coma in each component separately. For materials in IR these aberrations are not significant, that is why components could be rather simple. Astigmatism is corrected in the whole system and as a result the system is free of all monochromatic aberrations except distortion. This method does not include chromatic aberration correction and analysis of thermoaberrations. The work is aimed at developing and improving of LWIR (spectral range 8-12 μ m) system design methods.

The analysis of thermoaberrations starts with analysis of possibilities of chromatic and thermal defocus correction in two- and three-component systems. These components might be applied in previously developed method. Formulas for calculations of components with chromatic and thermal defocus correction are presented. Also research results of thermal defocus correction possibilities and examples of designed systems with different characteristics are given. Results of the work can be helpful for designers to find optimal material combination for further designing of thermostabilized systems working in IR region.

2. Material review

We consider several manufactures for IR materials that could be used for IR systems:

- Schott chalcogenide glasses IRG22-IRG26 [6]
- Infrared crystals (Ge, GaAs, ZnSe, ZnS, ZnS MS) [7]
- BD-2 glass [8]

Main optical and thermooptical properties are summarized in table. 1.

Table 1

General specifications of optical materials

Material	Refractive index						dn/dT	TCE	Transmission [%]					Abbe number
	7μm	8μm	9μm	10μm	11μm	12μm	for 10.6μm	at 20°C	8μm	9μm	10μm	11μm	12μm	8-12μm
IRG22	2.5053	2.5027	2.4998	2.4967	2.4932	2.4892	6.72E-05	1.21E-05	64.06	67.78	67.97	63.64	17.86	110.87
IRG23	2.7941	2.7918	2.7894	2.7869	2.7841	2.7811	1.03E-04	1.34E-05	58.94	61.56	61.63	59.16	39.11	167
IRG24	2.6151	2.6132	2.6112	2.609	2.6067	2.604	1.99E-05	2.04E-05	60.86	66.29	65.9	61.57	20.71	174.89
IRG25	2.6128	2.6098	2.6067	2.6032	2.5994	2.5951	5.92E-05	1.40E-05	63.39	64.46	64.11	62.24	40.69	109.06
IRG26	2.7857	2.7833	2.7809	2.7782	2.7754	2.7722	3.22E-05	2.08E-05	62.8	57.3	61.11	61.43	59.69	160.2
BD-2	2.6117	2.6088	2.6055	2.6023	2.5983	2.5942	9.10E-05	1.40E-05	62	62	62	61	56	109.75
Ge	4.0079	4.0057	4.004	4.0031	4.0025	4.0021	4.08E-04	5.70E-06	46	46	46	46	38	834.19
GaAs	3.2923	3.2878	3.283	3.277	3.2725	3.2666	1.49E-04	5.70E-06	55	55	55	55	55	107.41
ZnSe	2.4218	2.4173	2.4122	2.406	2.4001	2.393	6.10E-05	7.57E-06	70	70	70	70	71	57.86
ZnS	2.232	2.223	2.212	2.2	2.186	2.169	4.10E-05	6.80E-06	68	69	69	55	58	22.22
ZnS MS	2.2175	2.223	2.2129	2.2008	2.1832	2.171	5.40E-05	6.50E-06	72	72	70	60	63	22.95

In the table 1: dn/dT – Temperature Coefficient of Refractive Index, TCE – Thermal Expansion Coefficient.

Refractive index for 7 μm column is required for glass fitting method in Zemax which demands six wavelengths to define a new optical material.

3. Microbolometer matrices review.

For commercial devices uncooled matrices can be applied. They have not as high temperature resolution as cooled matrices but it's usually enough for many purposes.

Main features of matrices [1, 2]:

Resolution range : from 160x120 up to 1024x768 [pixel]

Spectrum response : 8-14μm

Pixel size: 17 - 25μm

Material: resistive amorphous silicon

Working temperature range: from -40°C to +60°C

Table 2

Microbolometer matrices.

Producer	Model	Resolution / working area	Pixel size [μm]	Spectral response [μm]	Weight [g]
ULIS (www.ulis-ir.com)	UL05251-026	1024x768	17	8 - 14	<30
	UL04322-039	640x480	17	8 - 14	<6.5
	UL04272-032	640x480	17	8 - 14	<6.5
	PIC0384O-049	384x288	17	8 - 14	<7
	UL03162-028	384x288	25	8 - 14	<6.5
	UL02152-020	160x120	25	8 - 14	<5
SCD (www.scd.co.il)	Bird XGA	1024x768	17	8 - 14	32
	Bird 640	640x480	17	8 - 14	27
	Bird 384 17	384x288	17	8 - 14	7
	Bird 384 25	384x288	25	8 - 14	27

4. Creating model of materials in Zemax. Glass fitting method.

It is necessary to create an appropriate material model in optical design software to be able of evaluating thermo-optical properties [9 – 11].

Refractive indices of each given material for consecutive temperatures should be calculated by using following formula :

$$n_T = n_{20} + \frac{\Delta n_{rel}}{\Delta T} (T - 20), \quad (1)$$

where T – temperature, n_T – refractive index at temperature T , $\frac{\Delta n_{rel}}{\Delta T}$ – temperature change of refractive index. Temperature range: from -40°C to $+55^\circ\text{C}$. All materials in Zemax catalog are defined by coefficients of "Sellmeier 1" formula [9, 10]

5. Ways of compensation of thermal aberrations.

Among the ways of compensation there are two group:

1. Mechanical
 - passive mechanical athermalization
 - active mechanical athermalization
2. Optical

The focus position of optical system changes along with temperature. Mechanical athermalization is simply based on passive or active refocusing. Both methods are automatic.

Passive ways of refocusing often involve materials with abnormal thermal expansion coefficients to maintain focus without any powered drive mechanism being required. This method is not sufficient in infrared bandwidth. Active compensation of thermal defocus involves the computation of focus compensation algorithms that are stored and implemented by a powered device.

Athermalization of the focus position of an optical system by choice of proper optical materials can be obtained if the following conditions are satisfied [3,4]:

1. Power:

$$\sum_{i=1}^j \phi_i = \phi, \quad (2)$$

2. Achromatism:

$$\sum_{i=1}^j \frac{\phi_i}{V_i} = 0, \quad (3)$$

3. Athermalism:

$$\sum_{i=1}^j (\gamma_i \phi_i) + \phi \alpha_h = 0, \quad (4)$$

where

$$\gamma = \frac{\frac{\Delta n}{\Delta T}}{n-1} - \alpha_L, \quad (5)$$

γ – thermal glass constant (normalized thermal change of optical power), j – number of thin lens elements, ϕ – optical power (reciprocal of focal length), V – Abbe number, $\frac{\Delta n_{rel}}{\Delta T}$ – temperature change of refractive index, α_L – thermal expansion coefficient of lens material, α_h – thermal expansion coefficient of housing material.

These three conditions (Eq. 2-4) require three different materials.

6. Achromatic and athermal doublet (small air gap).

Optical powers of thin elements in achromatic two-lens system can be calculated by using following formulas:

$$\phi_A = \frac{\phi_{AB} V_A}{V_A - V_B}, \quad (6)$$

$$\phi_B = \frac{\phi_{AB} V_B}{V_B - V_A} = \phi_{AB} - \phi_A, \quad (7)$$

where ϕ_A, ϕ_B – optical power of thin elements, ϕ_{AB} – optical power of system (for clarity of calculations assumed $\phi_{AB} = 1$),

$$V = \frac{n_M - 1}{n_S - n_L}, \quad (8)$$

V – Abbe number, n_M – refractive index for wavelength $\lambda = 10\mu m$, n_S – refractive index for wavelength $\lambda = 8\mu m$, n_L – refractive index for wavelength $\lambda = 12\mu m$.

Thermal expansion coefficient of housing can be calculated by using the third condition for athermalization (Eq. 4):

$$\frac{(\gamma_A \phi_A + \gamma_B \phi_B)}{\phi_{AB}} = \alpha_h \quad (9)$$

Only few obtained values of the coefficient correspond to real material (positive) values.

Table 3

Optical material combinations corresponding with positive value of thermal expansion coefficient of housing ($< 50 \cdot 10^{-6}$). Optical power of the system

$$\phi_{AB} = 1$$

Material A	Material B	ϕ_A	ϕ_B	α_h
IRG24	ZnSe	1.4944	-0.4944	29.71
IRG24	ZnS	1.14556	-0.14556	13.18
IRG24	ZnS MS	1.15103	-0.15103	15.05
IRG26	ZnSe	1.56538	-0.56538	24.45
IRG26	ZnS	1.16106	-0.16106	7.533
IRG26	ZnS MS	1.16719	-0.16719	9.574

7. Achromatic and athermal triplet

Optical powers of thin elements in three-lens system which satisfies all three conditions (Eq. 2-4) can be calculated using formulas:

$$\phi_2 = \frac{\frac{1/V_1}{1/V_3 - 1/V_1} \frac{\gamma_1 + \alpha_h}{\gamma_3 - \gamma_1}}{\frac{1/V_1 - 1/V_2}{1/V_3 - 1/V_1} \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_3 - \gamma_1}} \phi, \quad (10)$$

$$\phi_3 = \frac{1/V_1 - 1/V_2}{1/V_3 - 1/V_1} \phi_2 - \frac{1/V_1}{1/V_3 - 1/V_1} \phi, \quad (11)$$

$$\phi_1 = \phi - \phi_2 - \phi_3, \quad (12)$$

where ϕ – optical power, γ – thermal glass constant, V – Abbe number (Eq. 8).

Table 4

Sample data table. Optical powers of lens elements.

Housing material - Invar ($\alpha_h = 1.5 \cdot 10^{-6}$)

Material A	Material B	Material C	Power A	Power B	Power C
Ge	IRG22	IRG23	-0.998	-3.552	5.550
		IRG24	0.398	-1.187	1.789
		IRG25	1.502	-18.794	18.291
		IRG26	0.410	-1.502	2.092
		BD-2	0.998	13.159	-13.158
		GaAs	0.975	4.822	-4.797
		ZnSe	-0.309	2.694	-1.384
		ZnS	-0.371	1.702	-0.331
		ZnS MS	-0.333	1.669	-0.336
	IRG23	IRG22	-0.998	5.550	-3.552
		IRG24	1.099	-2.786	2.687
		IRG25	-1.581	6.844	-4.263
		IRG26	1.443	-4.068	3.625
		BD-2	-0.574	4.370	-2.797
		GaAs	-0.161	3.196	-2.035
		ZnSe	-0.606	2.394	-0.787
		ZnS	-0.574	1.798	-0.224
		ZnS MS	-0.545	1.774	-0.229

Table 5

Sample data table. Optical powers of lens elements.

Housing material – Steel 410 SS ($\alpha_h = 9.9 \cdot 10^{-6}$)

Material A	Material B	Material C	Power A	Power B	Power C
Ge	IRG22	IRG23	-1.122	-3.747	5.868
		IRG24	0.355	-1.246	1.892
		IRG25	1.522	-19.862	19.339
		IRG26	0.368	-1.580	2.212
		BD-2	0.990	13.922	-13.912
		GaAs	0.965	5.107	-5.072
		ZnSe	-0.393	2.857	-1.464
		ZnS	-0.458	1.808	-0.350
		ZnS MS	-0.418	1.773	-0.356
	IRG23	IRG22	-1.122	5.868	-3.747
		IRG24	1.090	-2.925	2.834
		IRG25	-1.736	7.233	-4.496
		IRG26	1.453	-4.278	3.824
		BD-2	-0.674	4.624	-2.950
		GaAs	-0.239	3.385	-2.146
		ZnSe	-0.708	2.539	-0.830
		ZnS	-0.674	1.910	-0.236
		ZnS MS	-0.644	1.885	-0.241

Table 6

Sample table. Optical powers of lens elements.
Housing material - Aluminum ($\alpha_h = 22.2 \cdot 10^{-6}$)

Material A	Material B	Material C	Power A	Power B	Power C
Ge	IRG22	IRG23	-1.302	-4.032	6.334
		IRG24	0.291	-1.333	2.042
		IRG26	0.305	-1.693	2.387
		BD-2	0.977	15.039	-15.016
		GaAs	0.950	5.525	-5.475
		ZnSe	-0.516	3.096	-1.580
		ZnS	-0.586	1.964	-0.378
		ZnS MS	-0.543	1.926	-0.384
	IRG23	IRG22	-1.302	6.334	-4.032
		IRG24	1.078	-3.128	3.050
		IRG25	-1.964	7.802	-4.839
		IRG26	1.469	-4.584	4.115
		BD-2	-0.820	4.995	-3.175
		GaAs	-0.352	3.662	-2.310
		ZnSe	-0.857	2.751	-0.894
		ZnS	-0.821	2.075	-0.254
		ZnS MS	-0.788	2.048	-0.260
Ge	GaAs	IRG22	0.95	-5.47	5.52
		IRG23	-0.35	-2.31	3.66
		IRG24	0.42	-1.06	1.64
		IRG25	1.07	-4.35	4.28
		IRG26	0.46	-1.28	1.83
		BD-2	0.93	-8.65	8.72
		ZnSe	-2.38	6.98	-3.59
		ZnS	-1.43	3.02	-0.59
		ZnS MS	-1.34	2.93	-0.59
	ZnSe	IRG22	-0.52	-1.58	3.10
		IRG23	-0.86	-0.89	2.75
		IRG24	0.05	-0.48	1.43
		IRG25	-0.25	-1.38	2.64
		IRG26	0.02	-0.56	1.54
		BD-2	-0.90	-1.99	3.89
		GaAs	-2.38	-3.59	6.98
		ZnS	-0.71	2.74	-1.03
		ZnS MS	-0.59	2.60	-1.02

8. Conclusion

Passive athermalization is a very attractive way to construct IR systems working in a wide temperature range. It's possible to compensate thermal defocus if proper materials for lens and its mount are used. In that case it's necessary to find material

combination that allows not only athermalize the system but to correct chromatic aberrations also. In the work research results for two- and three-lens systems are given that can be useful for designing IR systems.

REFERENCES:

1. Infrared imaging sensors for IR cameras [electronic resource] - <http://www.ulis-ir.com>
2. Semiconductor Devices. Application [electronic recourse] - <http://www.scd.co.il>
3. Handbook of optics. Volume I: Fundamentals, techniques and design. McGraw-Hill Professional, 1995
4. Riedl J. Max Optical Design Fundamentals for Infrared Systems. Second Edition, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers SPIE, 2001
5. A.P.Grammatin, K.T.Chan Technique for constructing starting systems for thermal-viewer lens objectives // Journal of Optical Technology, Vol. 75, Issue 7, pp. 428-431, 2008
6. IR materials [electronic resource] – <http://www.schott.com>
7. Optical materials [electronic resource] – <http://www.iiviinfrared.com>
8. Infrared optics [electronic resource] – <http://lightpath.com>
9. Sanjay Gangadhara. Fitting Index Data in Zemax [electronic resource] – <https://www.zemax.com/support/knowledgebase/fitting-index-data-in-zemax>
10. Sanjay Gangadhara. How Zemax Calculates Refractive Index at Arbitrary Temperatures and Pressures [electronic resource] – <https://www.zemax.com/support/knowledgebase/how-zemax-calculates-refractive-index-at-arbitrary>
11. Mark Nicholson. How to Create a New Glass Catalog [electronic resource] – <https://www.zemax.com/support/knowledgebase/how-to-create-a-new-glass-catalog>

© Г. Э. Романова, Г. Пысь, 2015

РЕГИСТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАХВАТА И ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ДАННЫХ МОДУЛЬНОГО ТИПА

Алексей Николаевич Галянтич

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник отдела спецтехники, тел. (383)216-08-57

Михаил Владимирович Киселев

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, кандидат технических наук, директор, тел./факс (383)225-68-40, тел. (383)225-87-46

Алексей Александрович Свищев

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, инженер II категории, тел. (383)216-08-57, e-mail: svischev.aa@ya.ru

Денис Сергеевич Шелковой

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, кандидат технических наук, начальник лаборатории тепловидения, тел. (383)216-08-57, e-mail: shelden@ngs.ru

Разработано регистрирующее устройство для захвата и хранения тепловизионных данных, которое представляет собой электронный модуль, устанавливаемый в блок электронной обработки тепловизионного канала. Основной функциональной задачей данного устройства является захват и сохранение потока тепловизионных данных на внутреннем носителе, с последующей передачей данных на ПЭВМ. Конструкция модуля предусматривает использование в жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: тепловидение, система сбора данных, цифровая обработка данных.

RECORDING DEVICE TO CAPTURE AND STORE THERMAL DATA MODULE TYPE

Alexey N. Galyantich

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Head of Special Department, tel. (383)216-08-57

Michael V. Kiselev

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Ph. D., Director, tel./fax (383)225-68-40, tel. (383)225-87-46

Alexey A. Svischev

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Engineer II Category, tel. (383)216-08-57, e-mail: svischev.aa@ya.ru

Denis S. Shelkovoy

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Ph. D., Head of Laboratory Thermal Imaging, tel. (383)216-08-57, e-mail: shelden@ngs.ru

Developed recording device to capture and store thermal imaging data, which is an electronic module that is installed in the electronic unit of thermal processing channel. The main functional purpose of this device is to capture and preserve the flow of thermal imaging data on domestic media, with subsequent data transmission on the PC. Module design provides for the use in harsh environments.

Key words: thermovision, capture system, digital data processing.

Одним из направлений деятельности ОАО «ПО «Уральский оптико-механический завод» является разработка и производство оптико-электронных систем (далее в тексте – ОЭС) для авиационной техники, таких как оптико-локационные системы для самолетов и гиросtabilизированные круглосуточные обзорно-прицельные системы для вертолетов [1].

При эксплуатации вышеуказанных систем актуальной задачей является возможность обеспечения записи изображения, получаемого тепловизионным каналом во время выполнения полетного задания. Полученные данные необходимы для комплексного анализа и оценки качества работы узлов тепловизионного канала, алгоритмов цифровой обработки и других применений.

Основные требования, предъявляемые к регистрирующему устройству:

- осуществление записи видеопотока без сжатия для его последующего статистического анализа;
- конструктивная совместимость с блоком электронной обработки тепловизионного канала ОЭС (модульный тип с соответствующими размерами);
- электрическая совместимость логических уровней и формата цифрового потока от тепловизионного канала ОЭС.

Структурная схема регистрирующего устройства показана на рис. 1.

Принцип функционирования регистрирующего устройства заключается в следующем: регистрирующее устройство устанавливается в блок электронной обработки тепловизионного канала ОЭС и осуществляет захват и сохранение цифрового потока данных тепловизионного изображения на внутреннем носителе во время функционирования тепловизионного канала. После захвата данных от тепловизионного канала осуществляется передача сохраненных тепловизионных данных на ПЭВМ через интерфейс USB 2.0 или Ethernet 100 для их дальнейшего анализа.

Основные параметры и характеристики разработанного регистрирующего устройства приведены в табл.

Внешний вид опытного образца регистрирующего устройства для захвата и хранения тепловизионных данных показан на рис. 2.

Регистрирующее устройство позволяет производить запись от двух входных каналов по выбору, такая настройка производится программно. Сохраненные тепловизионные данные на ПЭВМ просматриваются при помощи специально разработанной программы визуализации тепловизионных данных.

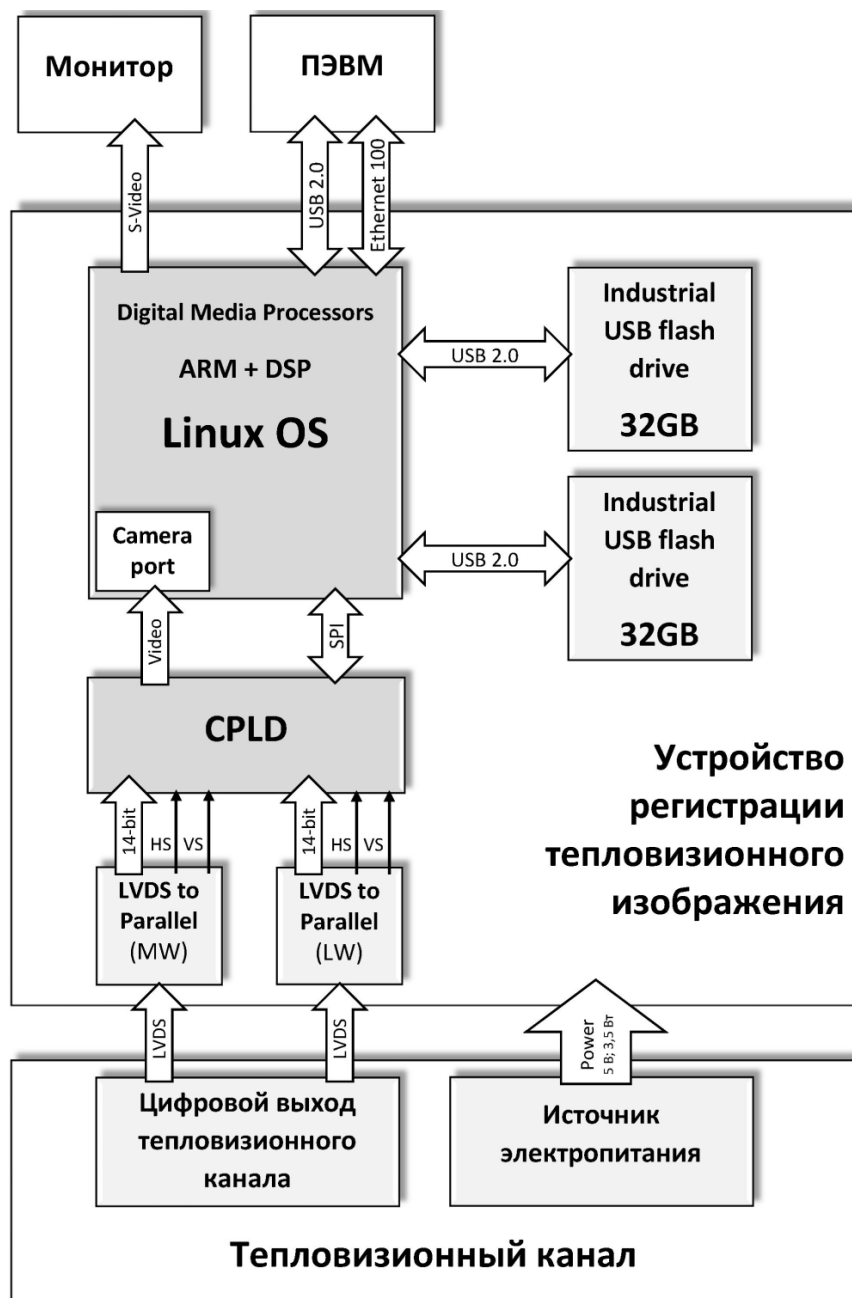


Рис. 1. Структурная схема регистрирующего устройства

Элементная база и конструкция регистрирующего устройства предусматривает использование в жестких условиях эксплуатации. Шасси регистрирующего устройства выполнено из алюминиевого сплава.

Основными конструкторско-технологическими особенностями регистрирующего устройства являются: 10-слойная печатная плата выполнена по 5 классу точности по ГОСТ Р 53429-2009; применены малогабаритные электро-радиоэлементы (пассивные – типоразмер 0402; микросхемы в корпусах BGA с шагом 0,65 мм).

В состав комплекта программно-математического обеспечения входят:

- адаптированная версия ОС Linux (поставка на карте памяти MicroSD);
- комплект драйверов;
- программа визуализации записанных тепловизионных данных.

Основные параметры и характеристики регистрирующего устройства

Операционная система	Linux
Объем памяти для хранения данных, Гб	62
Максимальный размер кадра*	2048×1536
Максимальная частота кадров* ² , Гц	100
Длительность записи данных* ³ , мин, не менее	60
Сжатие видеопотока	нет
Глубина яркости, бит	14
Интерфейс	USB / Ethernet 100
Потребляемая мощность, Вт, не более	4
Габариты (печатного узла), мм, не более	170×146×10
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 40 до 85

* – для частоты кадров 10 Гц

*² – для формата кадра 320×256*³ – для частоты кадров 100 Гц, формат кадра 320×256

Рис. 2. Внешний вид опытного образца регистрирующего устройства для захвата и хранения тепловизионных данных

В итоге, с учетом вышеизложенных требований в Филиале ОАО «ПО «УОМЗ» «Урал-СибНИИОС» спроектировано и изготовлено уникальное регистрирующее устройство, позволяющее производить захват и хра-

нения тепловизионных данных, которое представляет собой электронный модуль, устанавливаемый в блок электронной обработки тепловизионного канала. Функциональной задачей данного устройства является захват и сохранение потока данных на внутреннем носителе, с последующей передачей на ПЭВМ.

На базе разработанного регистрирующего устройства планируется проектирование регистрирующих устройств с форм-фактором под требования заказчика для ОЭС различного применения со следующими основными параметрами:

- суммарный объем памяти для хранения данных до 512 Гб;
- максимальный размер кадра Full HD;
- максимальная частота кадров 200 Гц (для формата кадра 800×600);
- сжатие видеопотока (без сжатия, H.264, JPEG);
- интерфейс USB / Gigabit Ethernet.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каталог специальной продукции УОМЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uomz.ru/download/Katalog_spec_RUS_ENG_web.pdf.

© А. Н. Галянтич, М. В. Киселев, А. А. Свищев, Д. С. Шелковой, 2015

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Анна Григорьевна Беляева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: kag_hedgehog@mail.ru

Рассматривается имитационная компьютерная модель низкоуровневых телевизионных систем визуализации изображения, позволяющая виртуально оценивать эффективность их работы.

Ключевые слова: приборы ночного видения, методика оценки эффективности, виртуальные испытания, имитационная модель.

VIRTUAL TESTING OF OPTICAL-ELECTRONIC NIGHT VISION SYSTEMS

Evgeny V. Gritskevich

Siberian State University of geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., lecturer at the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Anna G. Belyaeva

Siberian State University of geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: kag_hedgehog@mail.ru

Considered the imitation computer model of low-level television systems visualization of images, allowing virtually evaluate the effectiveness of their work.

Key words: night vision devices, methods of evaluating the effectiveness of virtual testing, simulation model.

Основой современных приборов ночного видения (ПНВ) являются интегральные модули, состоящие из электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и матричного детектора, конструктивно объединенных в один корпус [1]. Экран ЭОП может быть оптически сопряжен с фоточувствительной плоскостью матрицы. Другим способом преобразования входного изображения в электрический видеосигнал является перенос электронного образа, получаемого на выходе микроканальной пластины (МКП), в плоскость электронно-чувствительной матрицы без создания промежуточного оптического изображения. Подобные модули получили название ЭОП 5-го поколения. Сами же ПНВ,

реализуемые на базе данных модулей, чаще называются низкоуровневыми телевизионными системами (НТВС).

В настоящее время отсутствует единая методика оценки эффективности НТВС. Для такой оценки используется два подхода: либо оценочные критерии традиционных ПНВ, либо система параметров, характеризующих качество обычных телевизионных систем. Это создает путаницу в терминологии и неоднозначность в оценках. Необходимо разработать единый научно-обоснованный подход к формированию системы критериев эффективности данных изделий, учитывающих особенности условий эксплуатации и физических принципов функционирования НТВС.

Такой единый подход может быть реализован на базе имитационной компьютерной модели НТВС, позволяющей проводить виртуальные испытания рассматриваемых систем. В основу модели положена структурная схема НТВС, представленная на рис. 1.

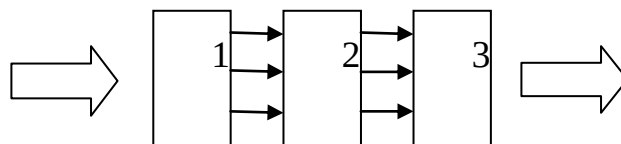


Рис. 1. Базовая структурная схема НТВС:

- 1 - фотоприемный модуль ЭОП 5-го поколения с матричным детектором;
2 - процессор обработки изображения; 3 – микродисплей

Модель формируется по блочному принципу, где каждый блок представляет собой отдельный программный модуль, имитирующий работу конкретного функционального звена оптико-электронного тракта. Структурная схема модели показана на рис. 2.

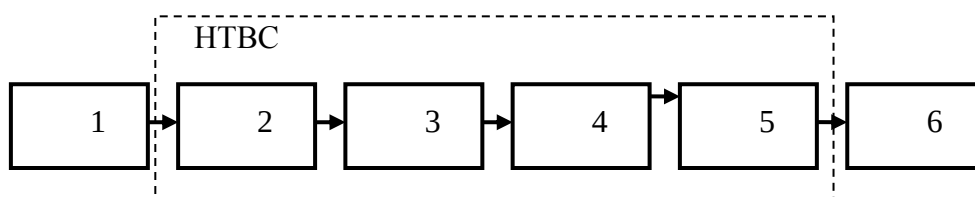


Рис. 2. Структурная схема имитационной компьютерной модели НТВС:

- 1 – блок объектно-фоновой ситуации; 2 – блок входной оптики (объектив);
3 – блок ЭОП 5-го поколения; 4 – процессор обработки изображений;
5 - блок отображения информации; 6 – зрительный анализатор

Моделирование процессов прохождения сигналов через звено должно учитывать вносимые этим звеном искажения сигналов и возможное изменение физической природы сигнала (оптическое излучение – электрический аналоговый видеосигнал – цифровой код). Модель отдельного звена реализует в программном коде обобщенную передаточную функцию этого звена, учитывающую мо-

дуляцию полезного сигнала (объект-фон), наличие темнового сигнала, шумовые флуктуации и частотные преобразования. Базовой вычислительной процедурой, реализуемой интегральной моделью, является процедура сквозного анализа, имитирующего прохождение сигналов с входа на выход прибора, то есть от модуля «объектно-фоновая ситуация» до модуля «зрительный анализатор».

Первый программный модуль «объектно-фоновая ситуация» предназначен для генерации набора параметров и характеристик входных сигналов, преобразуемых последующими модулями. Последний модуль «зрительный анализатор» должен рассчитывать критерий различения глазом наблюдателя изображения интересующего объекта с заданной степенью дешифрации последнего (например, обнаружения, опознавания или идентификации).

Поскольку процесс зрительного восприятия носит случайный характер, то объективным критерием решения задачи наблюдения является вероятность обнаружения глазом наблюдателя тех деталей в изображении, размер которых определяет требуемую степень дешифрации. Для расчета значения этой вероятности предлагается использовать методику, полученную путем преобразования аналитических выражений, приведенных в работе [2].

В этой работе изложен метод вычисления логарифмического порогового контраста яркостей изображений объекта и фона на экране телевизионного дисплея. Такой контраст определяется как

$$\delta_{пор} = \delta_0 \prod_{i=1}^5 f_i, \quad (1)$$

где δ_0 - величина логарифмической контрастной чувствительности глаза для нормализованных условий наблюдения (вероятность обнаружения – 50%, равенство яркостей фона и поля адаптации глаза, отсутствие шумов, большие угловые размеры изображения объекта, неограниченное время наблюдения); f_i - функции, учитывающие ухудшение нормализованных условий. Эти функции являются аппроксимациями экспериментальных данных, приведенных в работах [3-6].

Функция $f_1 = f(\alpha_0)$ выражает зависимость порогового контраста от величины углового размера изображения объекта α_0 . Очевидно, что под объектом в данном случае нужно понимать ту его деталь, при разрешении которой глазом на экране, наблюдательная задача считается выполненной на требуемом уровне дешифрации. Функция $f_2 = f(L_a/L_D^\Phi)$ учитывает разницу между яркостями поля адаптации глаза L_a и фона на экране дисплея L_D^Φ . Функция $f_3 = f(\sigma_{ш})$ учитывает наличие шумов, имеющих эффективное значение $\sigma_{ш}$, эквивалентное логарифму яркости. Функция $f_4 = f(t)$ выражает зависимость

порогового контраста от времени предъявления сигнала t . Наконец, функция $f_5 = f(P)$ учитывает зависимость порогового контраста от вероятности его обнаружения глазом:

$$f(P) = 1 + \chi_p / 2, \quad (2)$$

где χ_p - относительное отклонение случайной нормальной величины, то есть

$$P = F(\chi_p),$$

где F - интегральная функция нормального закона распределения.

Использование функции вида (2) в выражении (1) дает возможность рассчитать требуемую вероятность. Зная получаемую на экране дисплея величину логарифмического контраста δ и считая ее пороговой (на предельной дальности), можно записать

$$P = F \left\{ 2\delta / \left(\delta_0 \prod_{i=1}^4 f_i \right) - 2 \right\}. \quad (3)$$

Значение δ определяется в виде

$$\delta = \lg(1 + C_D), \quad (4)$$

где $C_D = |L_D^o - L_D^\Phi| / L_D^\Phi$ - контраст изображения на экране дисплея между яркостями объекта L_D^o и фона L_D^Φ .

Если пороговый контраст глаза C_{nor} для нормализованных (идеальных) условий наблюдения принять равным 0,02, то

$$\delta_0 = \lg(1 + C_{nor}) \approx 0,01.$$

Зная конкретные значения величины δ и функций f_i для заданной объектно-фоновой ситуации, можно рассчитать вероятность решения наблюдательной задачи. Это, в свою очередь, дает возможность определить итерационным методом длину трассы наблюдения, при которой обеспечивается решение наблюдательной задачи с требуемой вероятностью $P_{РНЗ}$ (дальность действия прибора) [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дегтярев, Е.В. Приборы ночного видения: перспективы развития компонентной базы / Е. В. Дегтярев, А. С. Хохорин. // - Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. - №8. – С. 34–35.
2. Ефимов, А.С. Контрастная чувствительность зрения при наблюдении ТВ изображения // - Техника кино и телевидения. – 1977. - №2. – С. 45 – 48.
3. Blackwell, H.R. Contrast thresholds of the human eye // JOSA.-1946.-Vol.36.-№10.-P.624–632.
4. Siedentopf, H. Kontrastschwell und Sehescharfe // Das Licht.-1941. - №1.-P.35–41.
5. Глезер, В. Д. Информация и зрение / В. Д. Глезер, И. И. Цуккерман. – М.: АН СССР, 1961. – 183 с.
6. Луизов, А. В. Инерция зрения – М.: Оборонгиз, 1961. – 248 с.
7. Грицкевич Е. В. Итерационный метод определения дальности действия оптико-электронного прибора наблюдения // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 1988. – № 12. – С. 53–57.

© Е. В. Грицкевич, А. Г. Беяева, 2015

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ВИБРОМЕТР НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Илья Сергеевич Глебус

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник лаборатории 2-1, тел. (383)306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

Сергей Николаевич Макаров

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, старший научный сотрудник лаборатории 2-1, тел. (383)306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

В статье рассматривается возможность создания виброметра на современной элементной базе. Основой метода измерения вибраций является использование интерферометрической схемы, чувствительной к расстоянию до объекта. В результате проведения экспериментов восстановлены сигналы смещения поверхности исследуемого объекта. Сделан вывод о перспективности дальнейшего исследования макета и улучшения его точностных характеристик.

Ключевые слова: вибрация, интерферометр Майкельсона, интерферометрический сигнал, квадратурный сигнал, смещение поверхности.

FIBRE OPTICAL VIBROMETER BASED ON THE MICHELSON INTERFEROMETER

Ilya S. Glebus

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya str., Junior scientist, laboratory 2-1, tel. (383)306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

Sergey N. Makarov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya str., Senior scientist, laboratory 2-1, tel. (383)306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Research results for designing a vibrometer based on the state-of-the-art circuitry are presented. An interferometric scheme sensitive to the distance to an object is used in the proposed method. As a result of experimental measurements the signals of an object's surface offset are recovered. Further research on the proposed model as well as on improving of its accuracy characteristics is planned.

Key words: vibration, Michelson interferometer, interferometric signal, quadrature signal, surface offset.

1. Введение

Измерение и контроль вибраций необходимы во многих областях промышленности [1]: в микроэлектронике, в машиностроении, на железнодорожном транспорте и т.д.

Для того чтобы удовлетворять основным современным требованиям измерений вибраций, устройства должны обеспечивать: бесконтактный способ, высокое разрешение измерений смещения поверхности, большое рабочее расстояние до объекта, а также возможность работы с высокочастотными вибрациями

поверхности объекта. Потенциально всем этим требованиям удовлетворяют оптические методы измерений.

Цель работы заключается в создании измерителя амплитуды вибраций [2] и исследовании его характеристик.

2. Интерферометрический метод измерения вибраций

Основой данного метода является использование схемы интерферометра Майкельсона [3], чувствительной к расстоянию до объекта. Результирующая интенсивность сигнала на фотоприёмнике интерферометра описывается следующим выражением:

$$I(L) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi kL, \quad (1)$$

где k – волновое число, L – расстояние до объекта.

Если при наблюдении интерференции использовать только пересечение функции (1) с её средним значением, то можно определить лишь модуль смещения поверхности объекта [4].

Поскольку в общем случае расстояние от поверхности объекта до виброметра может как сокращаться, так и увеличиваться, это приводит к знакопеременному смещению, делает невозможным его правильное определение только по интерферометрическому сигналу и требует наличия квадратурного дополнения для восстановления направления смещения поверхности, т.е. пару сигналов вида:

$$x(L) \sim \cos \Phi kL, \quad (2)$$

$$y(L) \sim \sin \Phi kL. \quad (3)$$

Эта проблема может быть решена путём использования лазеров с перестраиваемой длиной волны (например, DFB лазеров [5]), частотной модуляцией их излучения и фильтрацией сигнала после оптического смещения полей на фотоприёмнике [6].

3. Схема виброметра с квадратурным выходом

За основу схемы, представленной на рис. 1, взят интерферометр Майкельсона в оптоволоконном исполнении.

Рассмотрим действие виброметра.

Когерентное излучение от DFB-лазера поступает в одномодовое оптическое волокно ОВ1. По волокну излучение попадает в волоконно-оптический смеситель. Пройдя смеситель, излучение попадает в оптическое волокно ОВ2 и распространяется по нему до торца, расположенного в воздушной среде. На торце ОВ2 излучение лазера разделяется на 2 направления: часть излучения выходит из волокна, собирается коллиматором и направляется к объекту (показано сплошной линией); а другая часть излучения отражается от торца волокна (показано пунктирной линией). Излучение, дошедшее до объекта, отражается им (показано штрих-пунктирной линией), вновь собирается коллиматором и вводится в оптическое волокно ОВ2.

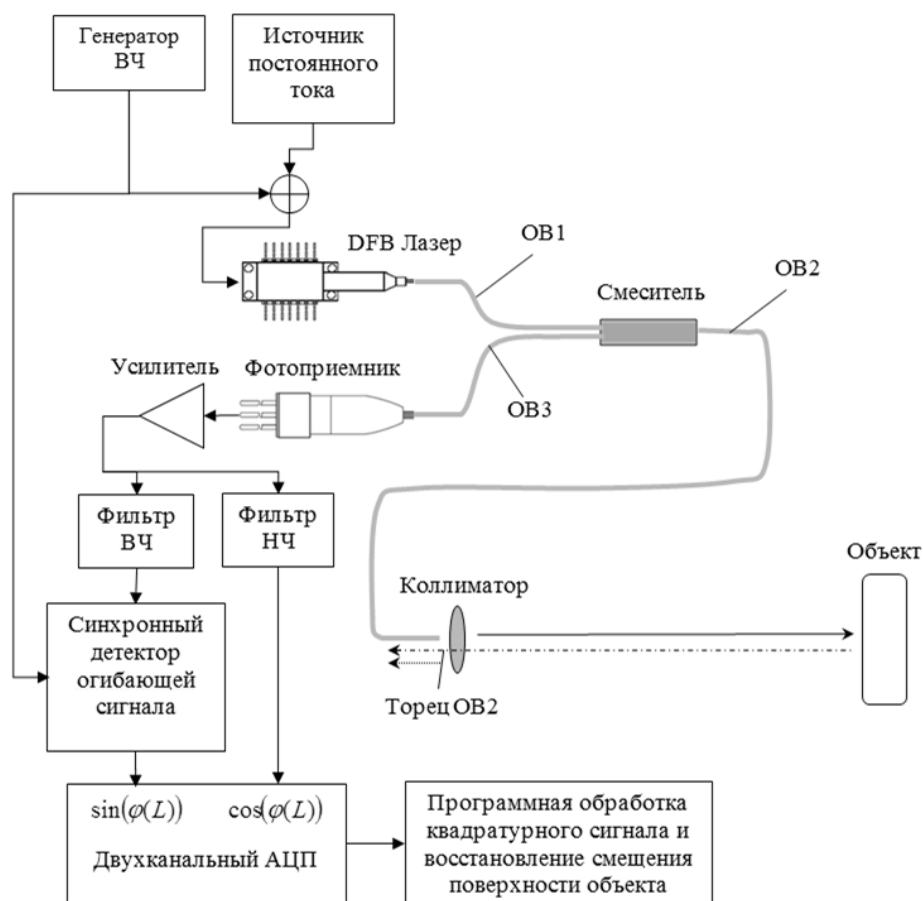


Рис. 1. Общая схема виброметра в оптоволоконном исполнении с квадратурным выходом

В результате в волокно OB2 попадает два взаимно-когерентных пучка: отраженный от торца волокна (пунктирная линия) и рассеянный от объекта и собранный коллиматором обратно в волокно (штрих-пунктирная линия). Эти два пучка передаются через смеситель на фотоприемник, где интерферируют друг с другом.

Однако, согласно [6], для измерения вибраций необходимо получить квадратурный сигнал. Поэтому схему (рис. 1) следует дополнить высокочастотной модуляцией тока лазера и последующей обработкой сигнала фотоприемника.

Таким образом, на DFB лазер подается рабочий ток накачки, к которому добавляется небольшой по величине ток модуляции лазера ($\sim 10^{-6}$ А), задаваемый высокочастотным генератором. Вследствие модуляции, DFB лазер генерирует оптическое излучение с переменной длиной волны, которое используется в оптоволоконной схеме интерферометра для получения на фотоприемнике интерферометрического сигнала. Сигнал содержит низкочастотную составляющую, которая соответствует работе интерферометра с фиксированной длиной волны, и высокочастотную составляющую, которая связана с модуляцией тока лазера. Далее фильтры низких и высоких частот [7] разделяют исходный сигнал фотоприемника на две составляющие. При этом низкочастотная составляющая соответствует сигналу, пропорциональному косинусу разницы фаз оптических сигналов (2), а огибающая высокочастотного сигнала после синхронного детектирования – синусу разницы фаз (3).

Далее сформированные сигналы оцифровываются двухканальным АЦП и, наконец, результирующий квадратурный сигнал записывается и обрабатывается с целью восстановления смещения поверхности и дальнейшего анализа ее вибраций.

4. Практическая реализация виброметра

Для проведения экспериментальных исследований измерения амплитуды вибраций, был собран макет на основе схемы, представленной на рис. 1, и установка, структурная схема которой показана на рис. 2.

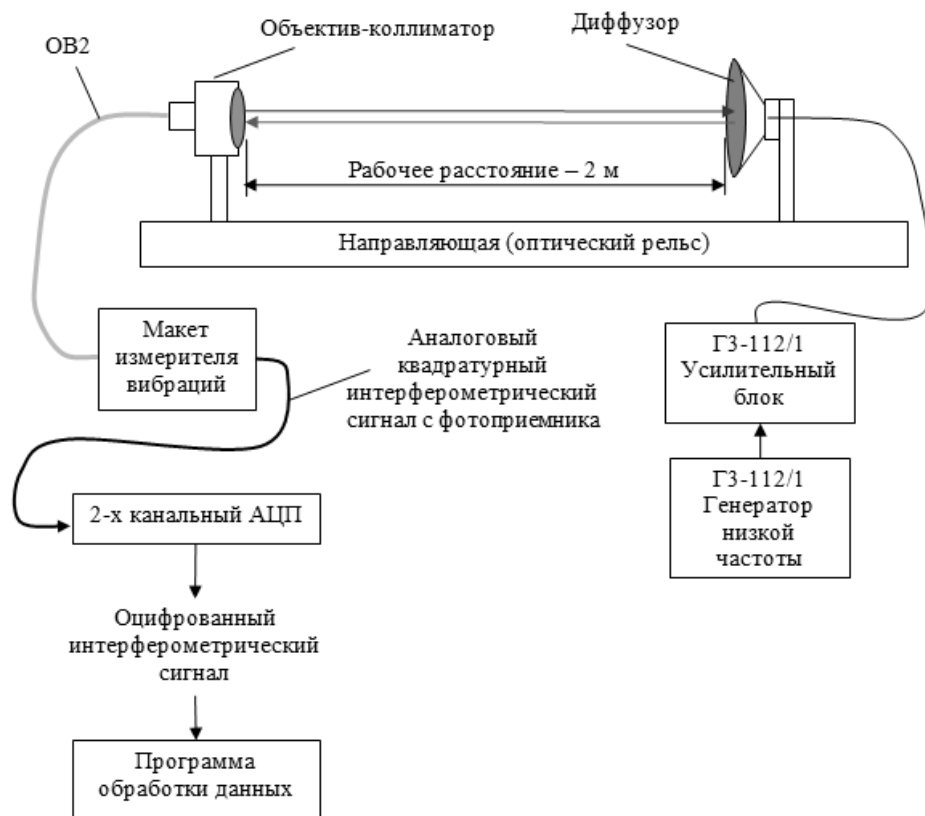


Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения измерений вибраций объекта

При проведении измерений использовалось два режима работы:

- Режим вибраций объекта с заданной частотой и амплитудой. В этом режиме на катушку громкоговорителя подается синусоидальный сигнал частотой 30 Гц.
- Режим отсутствия сигнала генератора низкой частоты. В этом режиме на катушку громкоговорителя не подается ток от генератора низкой частоты. Однако вибрации могут присутствовать из-за наличия воздушных потоков в помещении, которые могут заставить поверхность диффузора громкоговорителя колебаться. Кроме того, небольшие колебания расстояния могут быть вызваны механическими колебаниями установки, на которой закреплен диффузор и объектив-коллиматор.

Фрагмент восстановленного сигнала смещения поверхности в режиме подачи сигнала на катушку представлен на рис. 3.



Рис. 3. Восстановленный сигнал смещения поверхности, вибрирующей на частоте 30 Гц

При изменении расстояния интерференционная картина, как следует из физики процесса, оказывается бегущей. В тех же точках, где скорость движения поверхности нулевая (максимумы и минимумы серой кривой), интерференционная картинка неподвижна, поскольку смещения поверхности в этот момент времени не происходит. Частота колебаний поверхности соответствует частоте сигнала генератора, амплитуда в исследуемой точке равна $4 \pm 0,05$ мкм. Погрешность измерения смещения поверхности в каждый момент времени определялась по статистическому разбросу данных из цифрового массива, соответствующего нижней кривой на рис. 3.

Фрагмент восстановленного сигнала смещения поверхности в режиме отсутствия сигнала генератора представлен на рис. 4: интерференционная картина – бегущая, интерферометрический сигнал и его квадратурное дополнение меняются во времени. Таким образом, имеет место вибрация поверхности, вызванная собственными колебаниями диффузора и механическими колебаниями установки. Оценка случайных смещений составляет $0,3 \pm 0,05$ мкм (рис. 4).

Очевидно, что естественная вибрация присутствовала в обоих режимах работы, однако была заметна в первом режиме слабо в силу малых своих значений по отношению к уровню полезного сигнала.

5. Заключение

Целью работы являлось исследование возможностей создания измерителя вибраций на основе современной элементной базы.

В качестве метода измерения вибраций выбрана интерферометрическая схема виброметра. Апробировано использование в схеме оптоволоконных ком-

понент. Собран макет измерителя вибраций, на котором проведены эксперименты по измерению амплитуды вибраций от диффузно-рассеивающей поверхности. В результате анализа экспериментальных данных показано, что макет измерителя вибраций на основе оптоволоконных компонент может регистрировать квадратурный интерферометрический сигнал (в полосе частот 0...22 кГц для выбранного АЦП) и восстанавливать смещение поверхности вибрирующих объектов с погрешностью 0,05 мкм.



Рис. 4. Восстановленный сигнал смещения поверхности в режиме отсутствия сигнала генератора низкой частоты

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности реализации измерителя вибраций с использованием оптоволоконных компонент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник: в 2 кн.: кн. 1–2. Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – 844 с.
2. Атавин В. Г., Мохнатов А. А., Худяков Ю. В. Возможности измерений амплитуд вибраций гетеродинным лазерным виброметром // Измерительная техника. – 2000. – № 2. – С. 32–34.
3. Fercher A. F. Optical coherence tomography // Journal of Biomedical Optics. – 1996. – Vol. 1, iss. 2. – P. 157–173. – doi: 10.1117/12.231361.
4. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
5. Звелто О. Принципы лазеров: пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1990. – 559 с.
6. Глебус И. С., Макаров С. Н., Чугуй Ю. В. Бесконтактный интерферометрический измеритель вибраций на основе волоконной оптики // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 4 (57). – С. 49–58.
7. Романов И. Активные RC-фильтры: схемы и расчеты // Радио. – 1995. – № 3. – С. 45–48.

© И. С. Глебус, С. Н. Макаров, 2015

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР БЕЛОГО СВЕТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Василий Владимирович Широков

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

Исследовано применение интерферометра частично когерентного света с двумя каналами синхронной регистрации противофазных интерферограмм для контроля глубины дефектов технических поверхностей. Принцип измерения основан на формировании слоя когерентности на заданной глубине от поверхности контролируемого изделия. Показано, что использование двух каналов позволяет увеличить быстродействие контроля, и снижает влияние вибраций на погрешность измерения.

Ключевые слова: частично когерентный свет, быстродействие, двухканальный интерферометр, слой когерентности.

TWO-CHANNEL WHITE LIGHT DIFFERENTIAL INTERFEROMETER

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Laboratory Head, tel. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Vasily V. Shirokov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

Using the white light interferometer with two synchronous phase and antiphase interferograms registration channels for inspection of technical surfaces is studied. The measuring principle is based on forming the coherence layer at the specified depth from the surface under inspection. It is shown that the use of two channels improves inspection performance and reduces the measurement error caused by vibrations.

Key words: partially coherent light, productivity, two-channel interferometer, coherence layer.

Бесконтактный высокопроизводительный контроль дефектов технических поверхностей является актуальной задачей при производстве ответственных изделий. На сегодняшний день для решения этой задачи широко используются методы токовихревого контроля и различные оптические методы.

При контроле дефектов поверхности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), используется система, основанная на токовихревом методе. В системе используется высокоскоростной узел вращения, который имеет ограниченный по времени ресурс работы. Кроме того, контроль некоторых типов дефектов (например, протяженная вмятина) осуществляется с большой погрешностью, что приводит как к перебраковке, так и пропуску дефектных изделий.

Более перспективными по сравнению с токовихревым методом являются оптические низкокогерентные интерференционные методы [1, 2]. Системы измерения, реализованные на этих методах, обладают высокой разрешающей способностью по высоте и малой погрешностью измерения [3, 4]. Принцип действия таких систем основан на регистрации нескольких интерферограмм сдвинутых друг относительно друга на определенную фиксированную фазу [5]. Фазовый сдвиг в интерферограммах обычно осуществляется при помощи изменения длины одного из оптических путей интерферометра. Быстродействие процесса измерения этих систем напрямую связано с количеством регистрируемых интерферограмм, временем изменения оптического пути света в одном из плеч интерферометра и частотой работы камеры. Однако такие системы не устойчивы к воздействию вибраций и требуют дополнительных систем виброизоляции [4].

В статье представлена реализация интерферометра с двумя оптическими каналами синхронной регистрации [6], позволяющая уменьшить воздействие вибраций и повысить производительность измерений. Принцип измерения, используемый в данной системе, основан на получении дифференциальных интерферограмм [7, 8]. Схема интерферометра, представленная на рис. 1, состоит из основной части 11 и объекта измерения 8. Основная часть 11 включает в себя источник частично когерентного света 1, объектив осветителя 2, светоделительные кубики 3 и 4, два идентичных объектива 5 и 6, опорное зеркало 7 и две идентичные ПЗС камеры 9, 10.

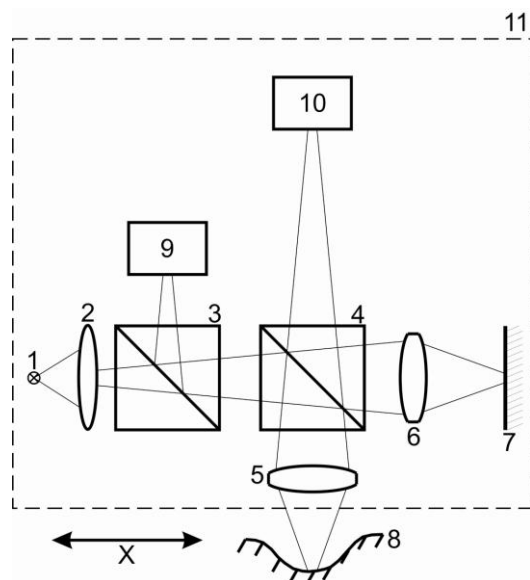


Рис. 1. Интерферометр с двумя каналами синхронной регистрации

Свет от источника частично когерентного излучения (красный светодиод, имеющий среднюю длину волны $\bar{\lambda} = 631,2$ нм и длину когерентности $l_c = 20,2$ мкм) проходит через объектив осветителя 2 и попадает на светоделительный кубик 3. Прошедший пучок попадает на светоделительный кубик 4, где делится на два пучка. Первый пучок, распространяясь в опорном плече, проходит через микрообъектив 6 и освещает поверхность опорного зеркала 7. Второй, распространяясь в измерительном плече, проходит через микрообъектив 5 и освещает поверхность объекта измерения 8. Далее, частично отраженные и рассеянные по-

верхностями 7 и 8 световые волны проходят объективы 6 и 5, соответственно, попадают на светоделительный кубик 4. На границе деления кубика 4 световые волны интерферируют. Часть энергии попадает на ПЗС камеру 10, где происходит регистрация интерферограммы. Другая часть энергии попадает на светоделительный кубик 3 и регистрируется на ПЗС камере 9. Интерферограммы, синхронно регистрируемые ПЗС камерами 9 и 10, находятся в противофазе за счет фазовых набегов, получаемых на двух светоделительных кубиках в результате отражений.

Сканирование поверхности объекта измерения 8 на наличие дефектов производится путем его перемещения относительно основной части интерферометра 11 вдоль оси X. Дифференциальная интерферограмма формируется как модуль разности противофазных интерферограмм, синхронно регистрируемых ПЗС камерами. Так как используется источник частично когерентного света, то амплитуда дифференциальной интерферограммы будет отлична от нуля только для тех участков контролируемой поверхности, которые попадают в слой когерентности [7, 8].

Контроль дефекта поверхности осуществляется за счет установки основной части интерферометра относительно поверхности измеряемого объекта на фиксированное расстояние, определяемое допуском на глубину дефекта. В случае попадания дефекта в зону измерения интерферометра наблюдается максимальный контраст интерференционных полос. При перемещении контролируемой поверхности происходит обнаружение зон интерференции. Наличие этих зон свидетельствует о наличии дефектов.

На макете экспериментальной установки, показанной на рис. 2, были проведены эксперименты по получению синхронных интерферограмм. Добиться идеального совмещения изображений области измерения регистрируемой двумя камерами не удалось. В связи с этим, одна из камер была установлена на ме-

ханический позиционер, имеющий шесть степеней свободы (перемещение и поворот по X , Y , Z). Это позволило совместить получаемые изображения с ошибкой в несколько пикселей.



Рис. 2. Макет интерферометра с двумя каналами синхронной регистрации

Для прецизионного совмещения было предложено использовать цифровую обработку изображений. Для этого было разработано программное обеспечение, в котором реализованы алгоритмы, позволяющие изменять геометрические параметры (преобразование прямоугольной области в произвольную четырехугольную) и яркость одного из изображений. Применение этих алгоритмов не позволило полностью отказаться от механической подстройки камер, так как программная подгонка дает субпиксельное совмещение двух изображений лишь при небольших изменениях одного из них.

Результаты эксперимента по получению дифференциальных интерферограмм представлены на рис. 3. На рис. 3, а приведена дифференциальная интерферограмма, полученная путем позиционирования слоя когерентности на поверхности оболочки ТВЭЛ. Темные области на светлой полосе свидетельствуют о наличии вмятин глубиной более 20 мкм. На рис. 3, б показан результат контроля фрагмента монеты, содержащий выступающие над основной частью поверхности буквы, высотой ~ 70 мкм. Слой когерентности установлен на вершины этих букв. Интерференция в областях основной части поверхности монеты не наблюдается.

Закключение

Показано, что использование двух оптических каналов регистрации позволяет увеличить быстродействие контроля более чем в два раза за счет синхронной регистрации двух противофазных интерферограмм.

Использование данной схемы интерферометра позволяет снизить влияние вибраций на достоверность результатов контроля благодаря синхронной регистрации противофазных интерферограмм.

В дальнейшем для повышения быстродействия процесса измерения планируется использование высокоскоростных камер.

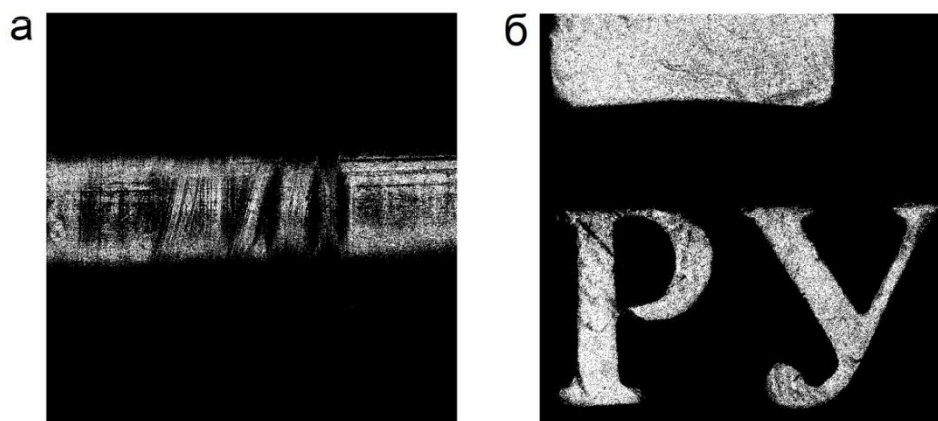


Рис. 3. Дифференциальные интерферограммы полученные в результате синхронной регистрации: поверхность оболочки ТВЭЛ (а), поверхность монеты (б)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Albertazzi A. J. and Pont A. D. Preliminary measurement performance evaluation of a new white light interferometer for cylindrical surfaces // Journal of Physics. – 2005. – Vol. 13. – P. 28–31.
2. Höink A., Meiners-Hagen K., Jusko O., Abou-zeid A. Application of diode lasers in interferometrical length measurements // Proceedings of ISMTII-2009 (The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments). Published by D.S. Rozhdestvensky Optical Society, Russia. Saint-Petersburg, Russia, 29 June – 2 July 2009. – Vol. 4. – P. 4-006 – 4-010.
3. Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Сысоев Е. В., Широков В. В. Зависимость погрешности измерений интерференционного профилометра от длины когерентности света // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 98–99.
4. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Широков В. В. Влияние случайного сдвига фазы интерферограмм на погрешность измерений рельефа поверхности интерференционным профилометром // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 28–31.
5. Ильиных С. П., Гужов В. И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 122–126.
6. Andretzky P., Lindner M. W., Bohn G., Neumann J., Schmidt M., Ammon G., and Häusler G. Modifications of the coherence radar for in vivo profilometry in dermatology // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3567. – P. 88–96.
7. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 4–13.
8. Сысоев Е. В., Голубев И. В. Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.

© Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков, 2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИСТОЧНИКА СВЕТА В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ПРОФИЛОМЕТРЕ

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Василий Владимирович Широков

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

Исследовано влияние оптической системы интерферометра на спектр используемого в нем источника света с целью получения достоверного значения эффективной длины волны. Показано, что спектр излучения источника имеет смещение эффективной длины волны в интерферометре. Осуществлена привязка спектра излучения широкополосных источников света к длине волны гелий-неонового (HeNe) лазера.

Ключевые слова: интерферометр продольного сдвига, интерференционный профилометр.

DETERMINATION OF THE LIGHT SOURCE EFFECTIVE WAVELENGTH IN THE INTERFERENCE PROFILOMETER

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Laboratory Head, tel. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Vasily V. Shirokov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

The effect of interferometer optical system on light source spectrum for obtaining the reliable value of effective wavelength has been studied. It is shown that the spectrum of the light source has shift of effective wavelength in the interferometer. Binding of the radiation spectrum of broadband light source to the wavelength of helium-neon (HeNe) laser is realized.

Key words: longitudinal shear interferometer, interferometric profilometer.

Системы измерения, основанные на интерференции световых волн, широко применяются в метрологии и научных исследованиях. Одной из задач, которые решают такие системы, является измерение и реконструкция топографии рельефа поверхности. Главным компонентом этих систем является интерферометр. Оптическая система профилометра представляет собой интерферометр Майкельсона в его различных модификациях. Основным компонентом оптической системы и интерферометра является источник излучения. Реализация процесса измерения требует точного знания длины волны источника излучения. Длина волны, используемая в расчетах нано- и пикорельефа, определяется максимальным пиком спектра источника излучения и называется эффективной длиной волны ($\bar{\lambda}$). Однако оптические компоненты профилометра представляют собой частотный фильтр, который обрезает спектр и смещает $\bar{\lambda}$. Следовательно, $\bar{\lambda}$, измеренная с помощью спектрометра, не является достоверной величиной, применительно к профилометру. В связи с этим актуальной задачей при измерении рельефа поверхности является определение достоверной величины $\bar{\lambda}$ источника в интерференционном профилометре.

Для решения этой задачи в работе предлагается использовать сам интерферометр в режиме Фурье-спектрометра [1]. Выбор данного метода обусловлен простотой реализации, высокой точностью и достоверностью получаемых результатов.

Фурье-спектрометр представляет собой интерферометр (оптическая схема Майкельсона, Линника, Захарьевского [2]), в плечах которого расположены зеркальные поверхности. Равномерное перемещение одного из зеркал приводит к изменению интенсивности за счет разницы оптического пути в плечах интерферометра. В результате регистрации можно получить зависимость интенсивности от времени. Как известно из Фурье-анализа, функция временной переменной связана с функцией частотной переменной через обратное преобразование Фурье:

$$f(\nu) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) e^{-i\nu t} dt,$$

где $f(\nu)$ – функция частотной переменной, $F(t)$ – функция временной переменной. Таким образом, имея зависимость интенсивности сигнала интерференции

от времени, можно получить зависимость интенсивности от частоты, используя обратное преобразование Фурье.

В настоящем исследовании использовался микроскоп нанопрофилометр МНП-1 [3]. Общий вид профилометра представлен на рис. 1. МНП-1 состоит из измерительного блока, контроллера управления и компьютера. Основой измерительного блока профилометра является интерферометр Линника в параллельных пучках. В данном профилометре имеется возможность смены источника излучения и установки микрометрического поворотного столика для позиционирования объекта измерения относительно интерферометра.

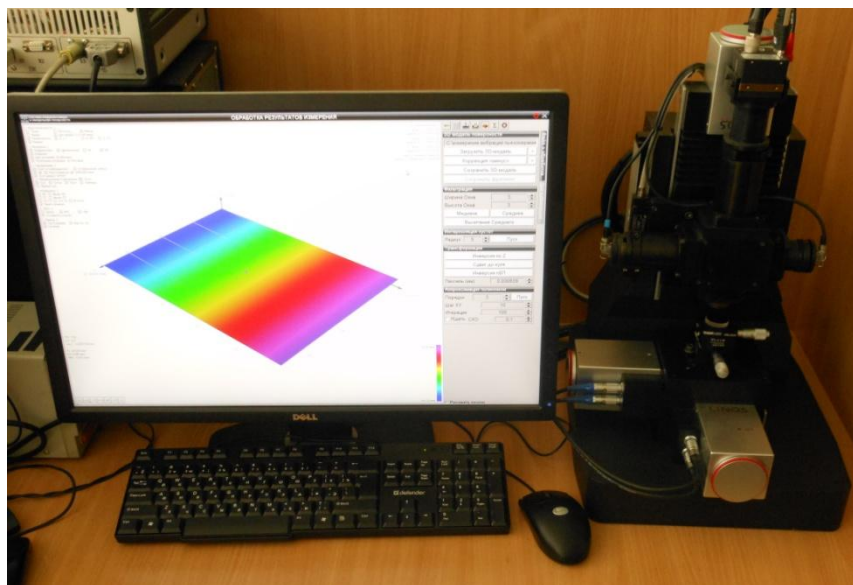


Рис. 1. Микроскоп нанопрофилометр МНП-1

Использование интерферометра как Фурье-спектрометра осуществлялось в режиме наноизмерений [4] программного обеспечения МНП-1 с применением дополнительно написанной программы, выполняющей преобразования набора интерферограмм в спектр излучения источника. Для привязки полученной зависимости интенсивности от частоты использовался HeNe лазер с известной длиной волны $\bar{\lambda} = 632,81$ нм. Излучение лазера позиционировалось на входном отверстии интерферометра, а перед лазером, с целью устранения спеклов, устанавливался вращающийся рассеиватель.

Для получения спектральной плотности мощности использовался набор двумерных изображений интерферограмм (256 кадров), полученных в результате сканирования одного из зеркал, закрепленного на пьезокерамическом элементе, вдоль оптической оси интерферометра. В дальнейшем для каждой вертикальной строки пикселей каждой интерферограммы было получено ее Фурье-преобразование. Было проведено усреднение полученного спектра по количеству столбцов интерферограммы и по количеству используемых интерферограмм. Процедура усреднения позволила снизить влияния шума и повысить точность измерения. Так как получаемые спектры имели относительные едини-

цы частоты, была осуществлена привязка всех спектров к спектру HeNe лазера с известной частотой.

Процесс измерения производился для различных источников излучения. Измерительное зеркало наклонялось относительно оптической оси таким образом, чтобы получить на интерферограмме максимальное количество разрешаемых интерференционных полос. На протяжении всего эксперимента положение измерительного зеркала не изменялось.

Так же спектры излучения исследуемых источников были получены с помощью спектрометра Qwave.

На рис. 2 представлены результаты, полученные на спектрометре Qwave и интерферометре в режиме Фурье-спектрометра.

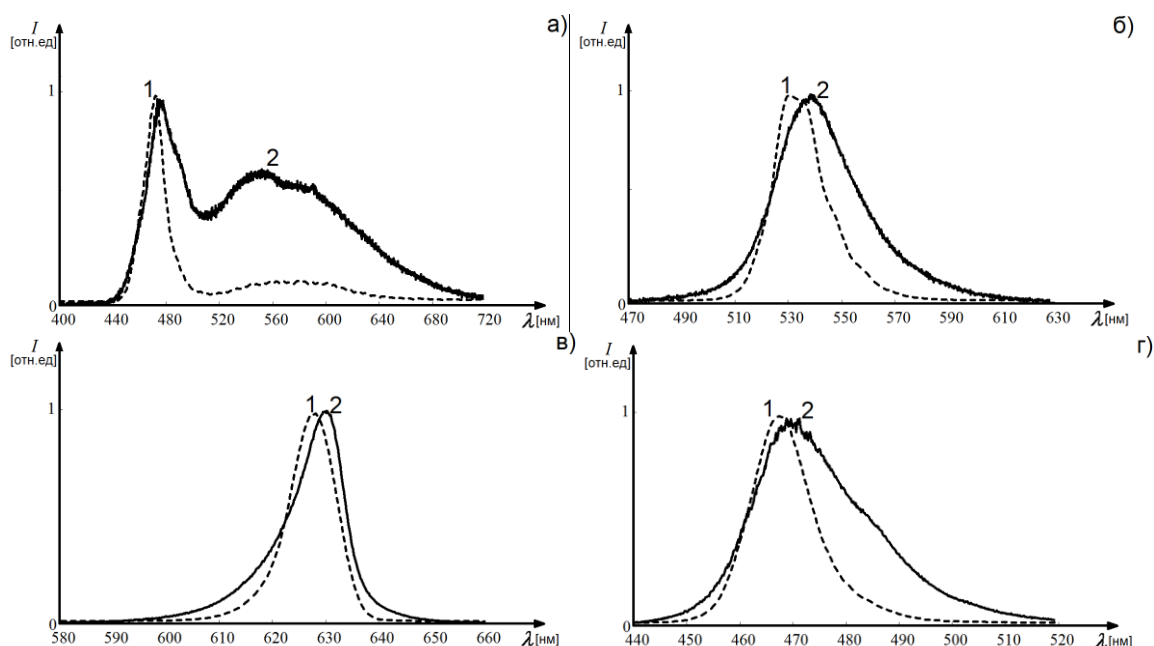


Рис. 2. Спектры источников излучения:
белый светодиод (а); зеленый светодиод (б); красный светодиод (в); синий светодиод (г);
1 – Фурье-спектрометр; 2 – спектрометр Qwave

Спектры излучения, полученные с помощью спектрометра Qwave и интерферометра в режиме Фурье-спектрометра, заметно отличаются. Эффективная длина волны источников, полученная с помощью интерферометра, имеет смещение. Так же видно, что спектры излучения, полученные с помощью спектрометра Qwave шире, чем спектры, полученные на интерферометре.

Закключение

Показано что, компоненты оптической системы интерферометра существенно влияют на спектральный состав проходящего света и смещают максимум спектра на несколько десятков нанометров.

Применение интерферометра в режиме Фурье-спектрометра и привязка спектра излучения источника света к длине волны HeNe лазера позволяет полу-

чить достоверную эффективную длину волны и увеличить точность измерений нано- и пикорельефа поверхности.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по измерению межатомного расстояния в кристаллах Si с ориентацией [111].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chao T.-H., Lu T. T., Davis S. R., Rommel S. D., Farca G., Luey B., Martin A., Anderson M. H. Compact liquid crystal waveguide based Fourier transform spectrometer for in-situ and remote gas and chemical sensing // Proc. SPIE. – 2008. – P. 69770P-1 – 69770P-11.
2. Захарьевский А. Н., Панов В. А., Кузнецова А. Ф. Интерференционный микрообъектив // ОМП. – 1960. – № 6. – С. 34–37.
3. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 119–128.
4. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микро-рельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 107–115.

© Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков, 2015

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ НАГОЛОВНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ПРЕДМЕТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Владимир Иванович Патерикин

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 1-3, тел. (383)306-59-40, e-mail: vipater@yandex.ru

Представлен обзор работ и направление развития методов и алгоритмов для наголовных средств измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов в реальном времени, среди которых можно особо выделить времяпролетные датчики 3D изображения, представляющие собой функционально законченные высокотехнологичные устройства, в которых наряду с оптоэлектронными элементами восприятия и сбора данных имеются встроенные средства для формирования конечного продукта изображения в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: зондирование поверхности, оптические средства, поверхность трехмерных объектов, времяпролетные датчики.

OPTICAL SOUNDING METHODS FOR HEAD MEASURING MEANS OF 3D OBJECTS SURFACE SPATIAL PARAMETERS IN REAL TIME

Vladimir I. Paterikin

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya St., Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)306-59-40, e-mail: vipater@yandex.ru

An overview of the works and trends of methods and algorithms developments for head measuring means of 3D objects surface spatial parameters in real time is presented. Among these measuring means we can select the 3D images time-of-flight sensors, which are the functionally completed High-Tech devices, where along with the optoelectronic perception elements and data collection are the integrated means for forming the product final image in real time.

Key words: surface sensing, optical means, 3D object surface, time-of-flight sensors.

Современные бесконтактные оптические методы зондирования трехмерных объектов в настоящее время широко обсуждаются в связи с интенсивным развитием средств технического зрения, направленных на практическое применение в весьма разнообразных сферах применения: космической, военной, в робототехнике, мультимедиа, картографии, распознавании образов и т.п. Оптические средства, реализованные с привлечением тех или иных методик, используются для бесконтактного автоматизированного измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов, и могут являться лучшим или единственным решением, например, при очень больших или очень коротких расстояниях. Средства этого типа используются для измерения расстояний до объектов и связанных с ними параметров, таких как перемещение, профиль поверхности, скорость и вибрация, включают восприятие указанных

параметров на основе метода интенсивности (амплитуды), триангуляции, время-пролетного, конфокального, доплеровского, а также интерферометрические методы [1]. Описание и рассмотрение каждого метода включает и его физическую основу, что дает более четкое понимание его сильных и слабых сторон, а также достижимые с их помощью точность, быстродействие, рабочий диапазон и т.п.

На рис. 1 приведена диаграмма, показывающая применимость различных методов измерения поверхностей трехмерных объектов в отношении точности и рабочего расстояния. Границы области применимости и пространственное разрешение каждого типа датчика, по понятным причинам, являются достаточно приблизительными. Основные особенности, которые можно увидеть из графика, состоят в том, что разрешение большинства методов ухудшается при увеличении рабочего расстояния. Исключение составляет только лазерная интерферометрия, которая может применяться в широком диапазоне расстояний с умеренной постоянной точностью. Однако этот метод является достаточно сложным, громоздким и дорогостоящим. Времяпролетные датчики со встроенным микропроцессором и минимальным форм-фактором в этом отношении являются наиболее подходящими. Времяпролетные (ВП) методы – с фазовой, частотной, амплитудной или импульсной модуляцией обладают достаточно большим диапазоном по расстоянию (от 0,5 до 30 и более метров) с сохранением приемлемого разрешения по глубине (от 10 мм или 2% от диапазона).

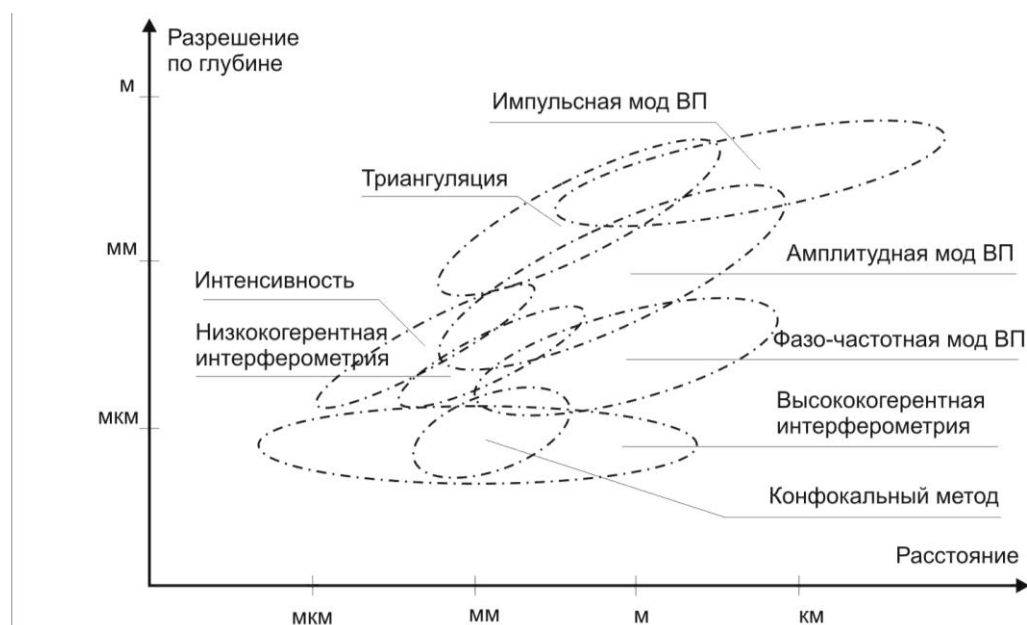


Рис. 1. Диаграмма реализуемых возможностей для современных способов измерения 3D поверхностей объектов и расстояний

Большинство лазерных времяпролетных датчиков работают, используя освещение объектов сцены короткими (наносекундной длительности) импульсами. Для объектов, находящихся на расстоянии более 50 м, пролетное время импульса света до цели и обратно гораздо больше длительности импульса и может быть легко измерено, а аппаратные средства реализуются с помощью относительно простых датчиков и электроники [2].

На расстояниях меньше, чем десятки метров при измерении транзитного времени импульса для измерения коротких расстояний без потери точности, необходимо учитывать временные параметры формы сигнала, чтобы правильно учесть задержку между пиками входного и обратного импульсов, например, путем укорочения длительности импульсов, применение датчиков, работающих в режиме счета фотонов [3], фазочастотных методов модуляции света и, во всяком случае, применения очень быстрых алгоритмов обработки.

Использование лавинных фотодиодов может значительно повысить эффективность обнаружения оптических сигналов, так как приемнику достаточно только одного обнаруженного фотона. Однофотонная чувствительность фотоприемников обеспечивает значительные преимущества в снижении размеров, массы, мощности лазера и снижение сложности. Формирование изображения с помощью матричного массива детекторов вместо одного фотодиода снижает вероятность ложных срабатываний на порядки. Если внешний мешающий фон в достаточной степени подавлен, 3D изображение сцены отличается достаточно высоким качеством [4].

В последнее время отмечено интенсивное развитие вычислительных средств для времяпролетных камер в виде встраиваемых процессоров с соответствующим программным обеспечением [5, 6, 7], которые позволяют проводить одновременное измерение расстояния до объектов, распределенных в различных точках сцены. С алгоритмической точки зрения процессы, участвующие в генерации 3D данных и последующего извлечения информации, можно разделить на пять групп: сбор данных, формирование изображения в виде облака точек, фильтрация шумов, расширенная пост-обработка и анализа данных, формирование предлагаемого продукта изображения. Для каждой группы ключевых параметров, которые влияют на качество 3D-данных, определяются параметрические и синтезированные данные соответствующих ситуаций, влияющих на производительность системы и извлечения качественной информации 3D изображений.

На порог обнаружения в значительной степени влияют оптико-геометрические характеристики объектов, отражающие параметры поверхности и множественные эхосигналы, приводящие к неточности в определении расстояния. Для прогнозирования выходных данных 3D или 4D мультимедийных камер разработана численная модель Laser imaging [8]. Модель предлагает значительные потенциальные возможности для формирования 3D изображений, картографирования местности и классификации объектов, идентификации целей, в том числе при наличии растительности, камуфляжа, находящихся за стеклом, днем и ночью, при любых погодных условиях.

Времяпролетные датчики (Time-of-Flight Single-Chip) 3D изображения типа IRS1010 и IRS1020 являются высоко интегрированными, со встроенным процессором и всеми ингредиентами для создания 3D-технологий. Датчики разработаны совместно фирмами Infineon и Pmdtechnologies GmbH [9] имеют высокое быстродействие, надежные и точные данные по глубине, а по размеру и потребляемой мощности удовлетворяют требованиям мобильных наголовных

устройств (матрица датчика IRS1010C имеет разрешение 160×120 , а IRS1020C – 352×288 пикселей).

Для примера на рис. 2 приведена структурная схема датчика типа IRS1010, который в своем составе содержит: управляемый источник света с модулятором, матрицу фотоприемников с переключателями, АЦП, контроллер и конфигуратор с интерфейсом I2C. Основные особенности датчика: малый форм-фактор, прямое измерение расстояния в каждой точке, работа при ярком солнечном свете и в темноте, подавление фоновой подсветки, встроенный АЦП преобразователь, контроллер и логика для управления освещением, пиксельной матрицей, модуляцией и автономной визуализацией последовательности фаз, цифровые интерфейсы высокоскоростной передачи данных.

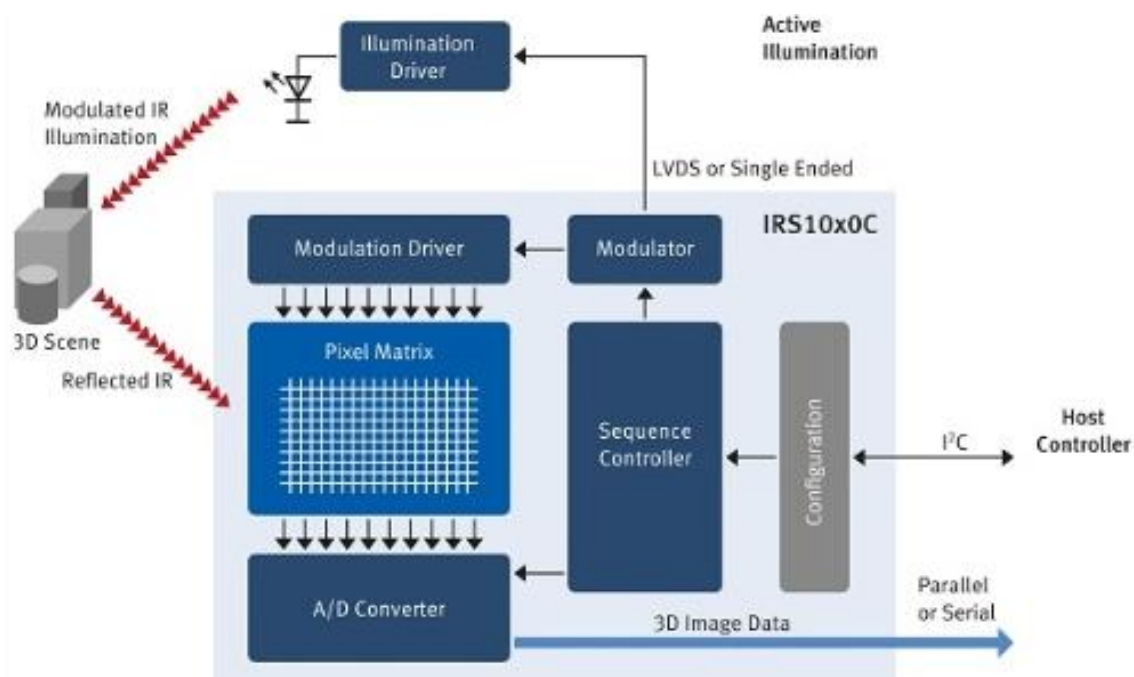


Рис. 2. Структурная схема датчика 3D изображения

Большинство существующих моделей формирования 3D изображения не учитывают временные и поперечные параметры лазерного импульса, испускаемого системой, характеристики оптико-электронного приемного тракта системы, влияния на распространение луча лазера турбулентности и атмосферного рассеяния, взаимодействие с объектами, присутствующими в поле зрения. Новое поколение систем с применением соответствующих алгоритмов обработки позволит обойти эти ограничения путем регистрации временных сигналов, поступивших в систему так, что обработка данных может улучшить телеметрию и облако точек будет лучше соответствовать действительности.

Заключение

Среди новых методов и алгоритмов для наголовных средств измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов в реальном

времени можно выделить времяпролетные датчики 3D изображения (активные 3D камеры), в которых для измерения коротких расстояний без потери точности используются датчики, работающие в режиме счета фотонов, а также фазочастотные методы модуляции света и очень быстрые алгоритмы обработки. Современные времяпролетные датчики 3D изображения представляют собой функционально законченные высокотехнологичные устройства, в которых наряду с оптоэлектронными элементами восприятия и сбора данных имеются встроенные средства для формирования конечного продукта изображения в реальном масштабе времени. Активные 3D камеры находят применение во все большем количестве решений технических проблем, таких как навигация, управление ориентацией аппаратов в автономном режиме во время сближения и захвата цели, 3D-визуализация объектов наблюдения в космическом пространстве. Военные применения включают в себя портативные средства, например, в виде карманного моноблока [10] или наголовных бинокулярных устройств с дополненной реальностью, интегрированных в современные системы вооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Berkovic G. and Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // *Advances in Optics and Photonics*. – 2012. – № 4, pp. 441–471.
2. Amann M.-C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., and Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement // *Optical Engineering*. – 2001. – 40 (1). – P. 10–19.
3. Guo Y., Huang G., Shu R. 3D imaging laser radar using Geiger-mode APDs: analysis and experiments // *Proc. SPIE. Laser Radar Technology and Applications XV*. – 2010. – Vol. 7684. – 768402, 8 pages.
4. Lopez N. A., Burton R. R., Kamerman G. W., Miles B. H. Product chain analysis of three-dimensional imaging laser radar systems employing Geiger-mode avalanche photodiodes // *Proc. SPIE. Laser Radar Technology and Applications XV*. – 2010. – Vol. 7684. – 76840A, 10 pages.
5. Lange R. and Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera // *IEEE Journal Quantum Electron*. – 2001. – 37 (3). – P. 390–397.
6. Payne A. D., Dorrington A. A., Cree M. J., and Carnegie D. A. Improved measurement linearity and precision for AMCW time-of-flight range imaging cameras // *Applied Optics*. – 2010. – 49 (23). – P. 4392–4403.
7. Cui Y., Schuon S., Chan D., Thrun S., and Theobalt C. 3D shape scanning with a time-of-flight camera // *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2010. – P. 1173–1180.
8. Guillaume A., Hamoir D. et al. Physical modeling of 3D and 4D laser imaging // *Proc. SPIE. Laser Radar Technology and Applications XV*. – 2010. – Vol. 7684. – 768415, 9 pages.
9. Электронный ресурс URL: <http://www.infineon.com/cms/en/product/> (дата обращения 5.11.2014).
10. Nettleton J. E., Schilling B. W., Barr D. N., and Lei J. S. Monoblock laser for a low-cost, eyesafe, microlaser range finder // *Applied Optics*. – 2000. – 39 (15). – P. 2428–2432.

© В. И. Патерикин, 2015

СЕГМЕНТАЦИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ЦИТОФОТОМЕТРИИ

Ирина Георгиевна Пальчикова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, зав. лабораторией; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, тел. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

Александр Александрович Конев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, ведущий программист, тел. (383)306-62-20, e-mail: lexykonev@yandex.ru

Евгений Сергеевич Смирнов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Рассмотрены особенности работы двух алгоритмов сегментации применительно к цифровым изображениям, моделирующим пропускание препаратов клеточных ядер с дифракционным размытием, окрашенных по Фельгену. Методом вычислительного эксперимента найдено, что количественные показатели морфометрического анализа микроизображений, определённые различными алгоритмами сегментации, могут варьироваться в пределах 5 %.

Ключевые слова: цифровое изображение, микроскоп, сегментация, пиксель.

IMAGE SEGMENTATION IN THE COMPUTER CYTOPHOTOMETRY

Irina G. Palchikova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Sc. D., Laboratory Head; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Physical Department, tel. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

Alexander A. Konev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Leading Programmer, tel. (383)306-62-20, e-mail: lexykonev@yandex.ru

Evgenii S. Smirnov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Features of action of two image segmentation procedures are considered by applying to digital images, which simulate the transmission of the cells nuclei, dyed by Felgen, with the diffraction blurring. It is found by computing experiment that the quantitative indices of the morphometric analysis of microimages defined by the various image segmentation procedures can vary in the range of 5 %.

Key words: the digital image, microscope, segmentation, pixel.

Цитологическая диагностика [1] является основным средством раннего распознавания организменных изменений на клеточном уровне. Она решает задачи оценки структурных и функциональных признаков клеток и ядер, в частности, – задачу регистрации распределения хроматиновых субстанций интерфазного ядра. На ранней стадии развития цитофотометрические методы включали: метод сканирования, двух и много волновой методы, фотоэмульсионный и интегральный методы. Альтернативным и более перспективным подходом в этой области может оказаться аппаратура, использующая цифровую технику [2, 3]. Развивая этот подход, мы стали использовать современные камеры с повышенной дигитализацией, разработали способы калибровки цитофотометрической установки и учёта блика оптики, что позволило по точностным характеристикам метода определения содержания ДНК в ядрах приблизиться к лучшим мировым показателям [3, 4].

Объективизация заключения по цитологической картине возможна путём отображения описания на количественные показатели, которые подразделяются на два типа: оптические (коэффициенты пропускания, фон препарата, окрашиваемость, чёткость границ) и геометрические (размеры и формы клеток и ядер). Такого рода обработка и анализ цифрового микроизображения предполагают определение геометрических областей, отличающихся средней яркостью, отнесение каждой из них к определённом виду и количественный подсчёт её геометрических характеристик. То есть сегментация цифрового микроизображения является необходимой процедурой при выполнении количественного описания цитологических препаратов. Одной из особенностей изображений, получаемых в микроскопе, является сильное дифракционное размытие границ. Анализ дифракции в микроскопе посвящён целый ряд работ [5, 6, 7]. В компьютерной цитофотометрии особый интерес приобретает рассмотрение вклада дифракционного размытия в погрешности вычисления интегральной оптической плотности ядра [7] и его геометрических характеристик, которые в свою очередь, определяются алгоритмами обработки цифровых микроизображений. Цель настоящей работы состоит в выявлении и рассмотрении особенностей работы двух алгоритмов сегментации применительно к цифровым изображениям с дифракционным размытием границ, моделирующим пропускание препаратов клеточных ядер, окрашенных по Фельгену.

Для реализации компьютерной цитофотометрии нами разработан специализированный программный пакет *ImgCyto* для математической обработки берутся сырые файлы, полученные непосредственно с камеры цитофотометрической установки. Программа *ImgCyto* выполняет оптико-структурный анализ микроизображений клеточных ядер на препаратах, окрашенных по Фельгену, и организует базу данных характеристик изображений клеточных ядер в виде *Excel* таблицы. За один сеанс программой *ImgCyto* обрабатывается серия снимков. Каждый снимок может содержать как одно ядро, так и несколько ядер. Результаты обработок всех ядер со всех снимков из серии записываются в одну результирующую *Excel* таблицу. Главное окно программы *ImgCyto* показано на рис. 1. Рассчитываются следующие характеристики ядер: периметр и площадь;

интегральная оптическая плотность; площадь, занимаемая диффузным хроматином; площадь, занимаемая компактным хроматином; количество диффузного хроматина; количество компактного хроматина; суммарный периметр гетерохроматиновых структур; коэффициент округлости ядра; средняя оптическая плотность диффузного хроматина; средняя оптическая плотность компактного хроматина. Программа предназначена для использования в клинических и биологических лабораториях в процессе проведения цитофотометрических анализов. В ходе вычислительных экспериментов сравнивались результаты пороговой сегментации, выполняемой, во-первых, с помощью алгоритма кластеризации Оцу [8] и, во-вторых, локального алгоритма путём вычисления первой и второй производных [9] в пикселях изображения.

В *I*-алгоритме Оцу [8] порог сегментации выбирается путем анализа гистограммы распределения значений яркости в пикселях цифрового полутонового изображения. Если на гистограмме выделить две области так, что каждая из этих областей была наиболее компактна, то граница между этими областями на гистограмме будет наилучшим порогом между фоном и объектом на изображении. *I*-алгоритм ищет порог так, чтобы взвешенная сумма дисперсий двух областей была минимальной. Алгоритм Оцу чувствителен к однородности фона.

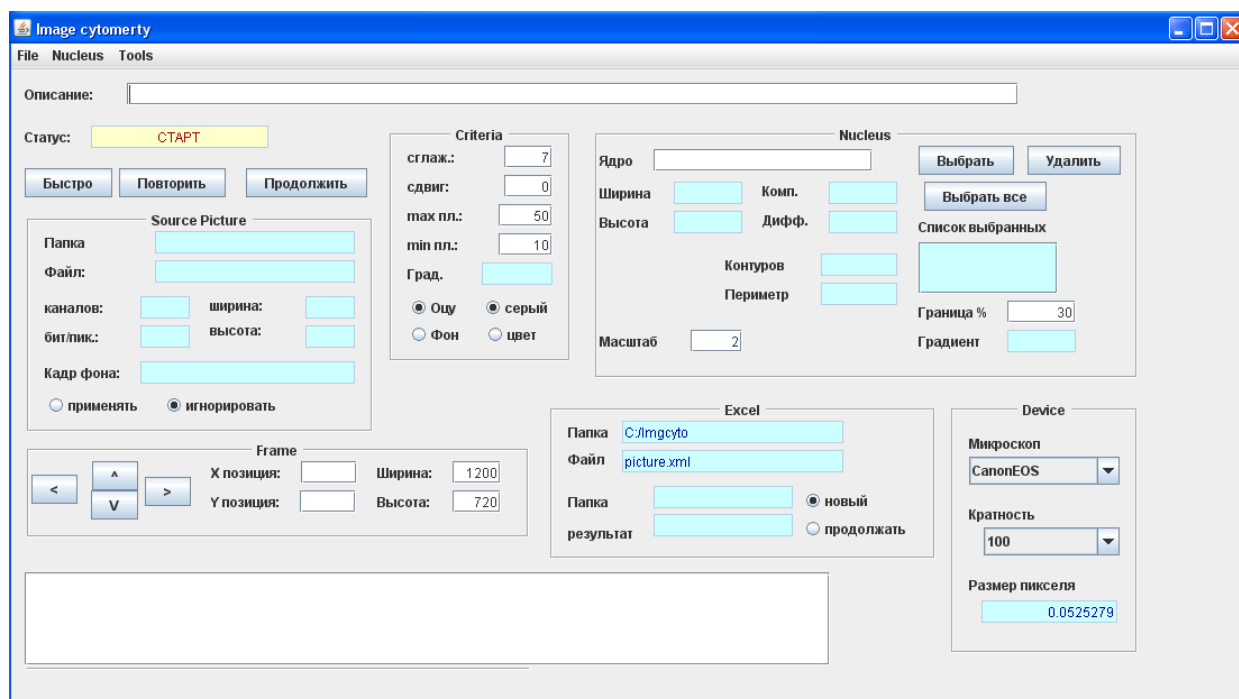


Рис. 1. Главное окно программы *ImgCyto*

Во *II*-алгоритме определение порога на основе градиента яркости [9] осуществляется путём пространственной фильтрации изображения с помощью соответствующих пространственных масок. По сути дела измеряется взвешенная сумма разностей значений центрального пикселя маски и его 8-ми соседей. Граница ядра устанавливается линиями, в пикселях которых обнаруживается максимальный градиент яркости.

В вычислительных экспериментах использовались два типа тестовых объектов: *I* тип – это разработанные нами ранее [7] тестовые объекты для цитофотометрии, показанные на рис.2, *II* тип – изображения с перепадами яркости, моделирующими дифракционное размытие, и построенные с помощью среды программирования *MathCad*. Объект *I* типа представляет собой стеклянную пластинку, покрытую слоем хрома. Пропускание подложек варьируется в пределах 0,1 - 0,9. На поверхности хрома нанесены тестовые фигуры в виде наборов кружков и квадратов, с одинаковыми размерами в каждом наборе (например, в области {7,2}). Характерные размеры фигур в областях: 3, 5, 7, 9, 11, 22 мкм. Цифровые изображения в виде RAW-файлов получали на установке компьютерной цитофотометрии [3] с микрообъективами план-ахромат 40[×], NA 0,65 и 10[×], NA 0,25.

Проводилась обработка изображений тестовых объектов с помощью программы *ImgCyto* с использованием *I*-алгоритма. Геометрические характеристики более чем 300 фигур, полученные в ходе обработки, были сравнены с их ха-

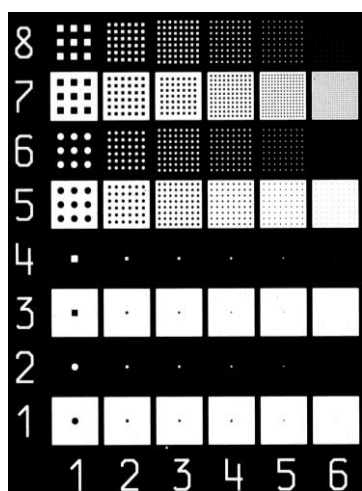


Рис. 2. Микрофотография фрагмента специального тестового объекта для цитофотометрии. Размер объекта: 2×3 мм

рактеристиками (размер, периметр и площадь фигуры), найденными с помощью *II*-алгоритма. Оба алгоритма дают близкие значения для оценки периметра и площади (выборочные данные см. в табл. 1). Размеры фигур, найденные с использованием *I*-алгоритма, на ~3–5% отличаются от найденных с использованием *II*-алгоритма. Проведённые расчёты выявили существенное влияние размера пикселя в цифровом изображении на результаты. Граничные пиксели учитываются при расчёте площади фигуры с весовым коэффициентом 0,5. Размер стороны квадрата оценивается из рассчитанного периметра и площади фигуры по классическим формулам, в то время как в изображении на контурах все углы сглажены, что вносит определённую ошибку. Численные данные для набора квадратов (области {7,2} на рис. 2) приведены в табл.

Тестовые объекты *II* типа строились средствами *MathCad* как монохромные цифровые изображения квадратов формата *TIFF* 16 бит. Перепад яркости на границах квадрата от 128 до 255 градаций (что соответствует 50% пропускания света биологическими препаратами) моделировал дифракционное размытие края изображения квадратного объекта, получаемого в микроскопе с объективом 10[×], NA 0,25 (или 40[×], NA 0,65). Размытие рассчитывалось численно в дифракционном приближении Френеля [7] в некогерентном случае, исходя из заданных значений размера объекта в пространстве предметов, увеличения и апертуры объектива, длины световой волны. Расчёты показали, что точка перегиба находится на уровне интенсивности 0,495 от максимальной, в то время как граница геометрооптического изображения – на уровне 0,497. Разница составила 0,4%. Далее мы учитывали тот факт, что фото-

матрица в микроскопе регистрирует распределение световой интенсивности и на выходе камеры синтезируется цифровое изображение, сигналы в котором усреднены по поверхности каждого фотоэлемента. Цифровое изображение (тестовый объект *II* типа) рассчитывалось путем наложения двумерной матрицы «псевдопикселей» (с размером каждого «псевдопикселя» $5,2 \times 5,2$ мкм) на двумерную матрицу рассчитанных с шагом $0,2 \times 0,2$ мкм значений интенсивности в изображении квадратного объекта с последующим усреднением интенсивности по каждому «псевдопикселю». То есть осреднение производилось по 26×26 рассчитанным значениям интенсивности. Количество значений для осреднения (26×26) выбиралось из условия согласования с размером «псевдопикселя», который является характерным для микроскопических камер.

Таблица

Средние значения характеристик фигур и коэффициенты вариации

	<i>II</i> -алгоритм	<i>I</i> -алгоритм	
Темные квадраты на белом фоне (области {7,2} на рис.2)			
Периметр, мкм	37	33,076	
Площадь, мкм ²	85		77,75
Размер стороны, мкм	8,9	8,3	8,8
Коэффициент вариации, %	0,3	0,5	1,0

Внешний вид одного из объектов *II* типа представлен в верхней части рис. 3, распределение интенсивности в его поперечном сечении – в нижней его части. Выбор объекта основывался на опыте работы с препаратами крови различных биологических видов. На рис. 4 даны фотография ядра в препарате крови *Rana Arvalis* и распределение интенсивности в его поперечном сечении. Перепад яркости на границе соответствует дифракционному.

Ряд объектов *II* типа, рассчитанных с 10 (и 40) кратным увеличением для квадратных объектов со сторонами 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 3; 5; 7; 9; 11 и 22 мкм в пространстве предметов, использовался для испытания работы алгоритмов и выявления влияния пространственной дискретизации (конечного размера элементов фотоматрицы или «псевдопикселей» цифрового изображения) на достоверность определения характеристик клеточных ядер. Качество передачи мелких деталей изображения определяется частотой Найквиста. Для цифровых микроскопных изображений частота Найквиста в координатном пространстве предмета рассчитывается как $\lambda/(4 \times NA)$ и равна 0,56 мкм/пиксель (с микрообъективом $10^\times$, NA 0,25) или 0,21 мкм/пиксель (с микрообъективом $40^\times$, NA 0,65). Пересчет размеров пикселей фотоматрицы в обратном ходе лучей относительно построения изображения дает величины $0,52 \times 0,52$ мкм/пиксель (с микрообъективом $10^\times$, NA 0,25) или $0,13 \times 0,13$ мкм/пиксель (с микрообъективом $40^\times$, NA 0,65). То есть критерий Найквиста выполняется и дискретизация не ограничивает качество визуального изображения.

Методом вычислительного эксперимента мы выявили влияние дискретизации на результаты расчёта периметра, площади и размеров тест-объектов *II* типа. На рис. 5 в виде графиков приведены результаты обработки ряда тест-объектов по *II*-алгоритму ряда тест-объектов, рассчитанных с увеличением $10^\times$.

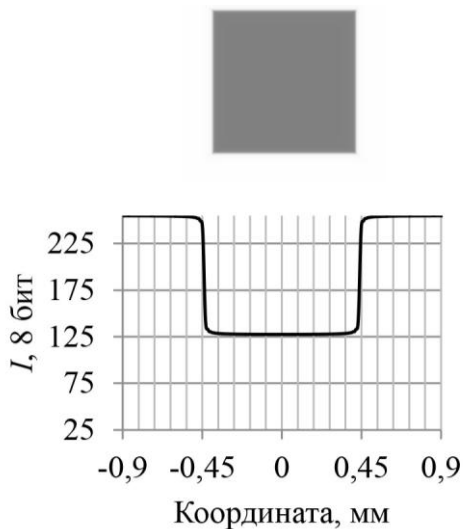


Рис. 3. Объект II типа, моделирующий увеличенное ($40\times$) изображение квадрата со стороной 22 мкм

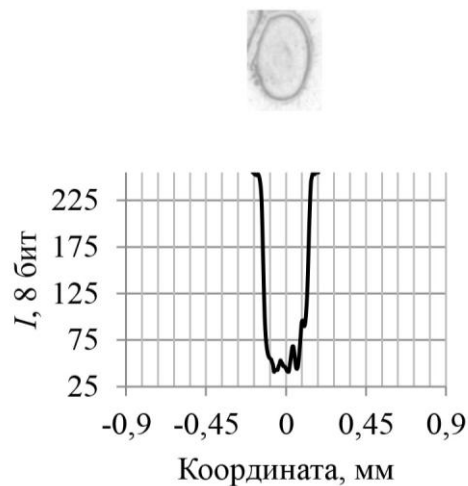


Рис. 4. Фотография ядра в препарате крови *Rana Arvalis* и распределение интенсивности в его поперечном сечении

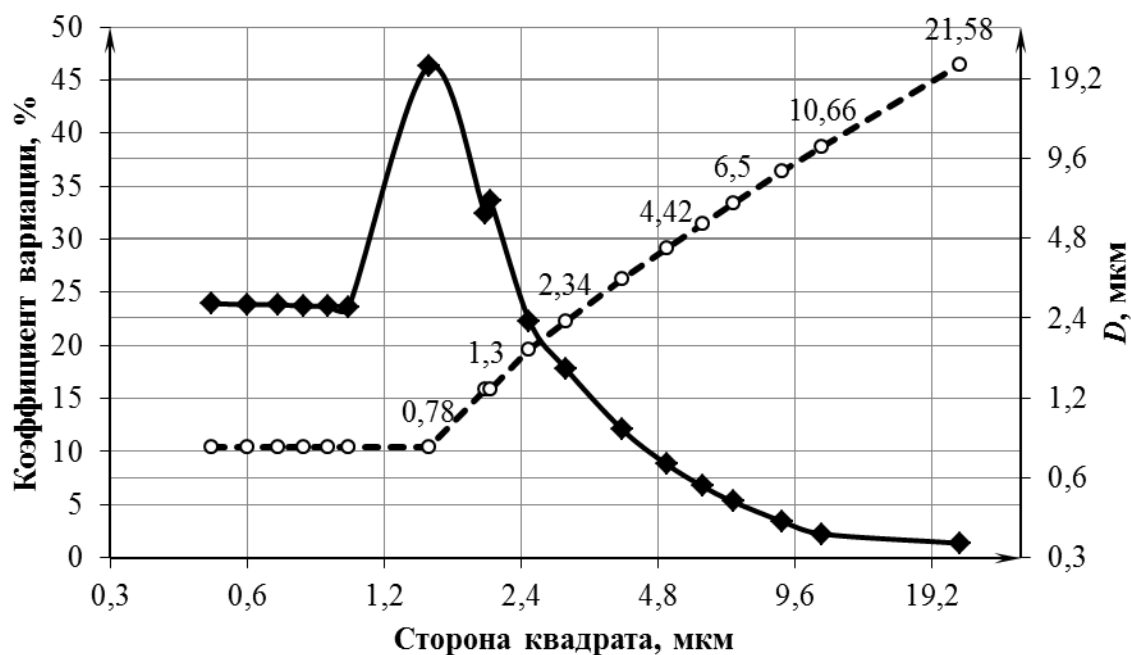


Рис. 5. Графики зависимостей вычисленных размеров D (линия —o—) и величин коэффициентов их вариации (линия —♦—) от заданных размеров для ряда объектов II типа

По оси абсцисс отложен размер стороны тестового квадрата в предметной плоскости в логарифмическом масштабе. По правой оси ординат — вычисленный размер стороны D в логарифмическом масштабе, соответствующий график обозначен маркерами —o—, рядом с которыми надписаны значения величины. По левой оси ординат отложены величины коэффициентов вариации в линейном масштабе, соответствующий график маркирован ♦. Коэффициент вариации

ции имеет значение 23,9% для квадратов, сторона которых менее 2 пикселей. Пик на графике для коэффициента вариации достигает 46,2% и находится в точке, где сторона квадрата увеличивается ещё на 1 пиксель. При дальнейшем увеличении размера стороны погрешность измерения стремится к нулю. Коэффициент вариации становится менее 10% для стороны 5 мкм (8 пикселей), и менее 1% – 26,7 мкм (50 пикселей). То есть, если размеры тестового квадрата близки или меньше размера кружка Эйри, то вносится дополнительная ошибка в вычисления, связанная с дискретизацией (с размером пиксела фотоматрицы). Обработка тест-объектов II типа с применением I-алгоритма дала аналогичные результаты. Мы привели и обсудили результаты для $10\times$ объектива в виду их наглядности. Обычно применяются объективы с увеличением $40\times$ и более, которые демонстрируют, по крайней мере, на порядок меньшие величины коэффициентов вариации.

Тестирование II-алгоритма определения порога сегментации на основе градиента яркости с помощью объектов с дифракционным перепадом яркости показало возможность достоверной оценки размеров объектов с высокой точностью, ограниченной размером приёмного пиксела, что позволяет считать данный способ опорным.

Авторы благодарят сотрудников Медицинского университета (НГМУ, г. Новосибирск) д.м.н., проф. Н. Т. Ясакову и В. Е. Гарного за плодотворные обсуждения результатов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агроскин Л. С., Папаян Г. В. Цитофотометрия. Аппаратура и методы анализа клеток по светопоглощению. Л.: Наука, 1977. 295 с.
2. Puech, M., Giroud, F. Standardisation of DNA Quantitation by Image Analysis: Quality Control of Instrumentation // Cytometry. 1999. – V.36. – P. 11 – 17.
3. Пальчикова И. Г., Омелянчук Л. В., Пальчиков Е. И., Смирнов Е. С., Семешин В. Ф. Особенности применения цифровых камер для цитофотометрического определения количества ДНК в ядрах клеток // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 2–12.
4. DNA Feulgen cytophotometry and chromatin diminution / I.G. Palchikova, E.V. Ivankina, V.F. Semeshin, L.V.Omelyanchuk, I.F. Zhimulev, E.S. Smirnov // Intern. Multidisciplinary Microscopy Congress (InterM-2013) (Antalya, Turkey, 10-13 Oct., 2013) : Springer proc. in physics. – 2014. – V. 154. – Chap. 33. – P. 233 – 239.
5. Nyysönen, D. Linewidth measurement with an optical microscope: the effect of operating conditions on the image profile // Appl. Opt. – 1977. – V.16. – N.8. – P. 2223 – 2230.
6. Haroske, G., Meyer, W. D., Theissig, F., Kunze, K. D. Increase of precision and accuracy of DNA cytometry by correcting diffraction and glare errors // Analytical cellular pathology. – 1995. – Vol.9. – Issue 1. – P. 1 – 12.
7. Пальчикова И. Г. Омелянчук Л. В., Смирнов Е. С. О влиянии дифракции на результаты количественной цитофотометрии // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 92-101.
8. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1979. – Vol. 9. – No. 1, – P. 62 – 66.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.

© И. Г. Пальчикова, А. А. Конев, Е. С. Смирнов, 2015

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПОПЕРЕЧНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ МИКРОСКОПЕ

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Хоан Хун Хай

Национальный университет Тайваня, Отделение механического приборостроения, 1, сектор 4, 10617, Тайвань, г. Тайпей, ул. Рузвельта, аспирант, e-mail: hoanghai.aoibk@gmail.com

Юрий Васильевич Чузуй

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, директор; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)306-58-95, e-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Лян-Чиа Чень

Национальный университет Тайваня, Отделение механического приборостроения, 1, сектор 4, 10617, Тайвань, г. Тайпей, ул. Рузвельта, профессор, e-mail: lchen@ntu.edu.tw

Куан-Чао Фань

Национальный университет Тайваня, Отделение механического приборостроения, 1, сектор 4, 10617, Тайвань, г. Тайпей, ул. Рузвельта, профессор, e-mail: fan@ntu.edu.tw

Предложено использовать датчик обнаружения положения резкого края для обеспечения высокого поперечного разрешения линейных измерений в оптическом интерференционном микроскопе. Приводится схема экспериментальной установки, включающей в себя интерферометр Линника, используемый для измерения нанорельефа поверхности и модуль обнаружения положения резкого края. Представлено описание процесса измерения и экспериментальные результаты. Совмещение результатов измерений, выполненных интерферометром Линника и датчиком обнаружения положения резкого края, на примере измерения ступенчатой структуры позволило нам показать возможность прецизионного определения положения резкого края.

Ключевые слова: интерферометр, поперечное разрешение, измерение нанорельефа.

HIGHPRECISION LATERAL LINEAR MEASUREMENTS IN THE OPTICAL INTERFERENCE MICROSCOPE

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Leading Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Hoang Hong Hai

National Taiwan University, Department of Mechanical Engineering, 1, Sec. 4, 10617, Taiwan, Taipei, Roosevelt Road, Postgraduate student, e-mail: hoanghai.aoibk@gmail.com

Yuri V. Chugui

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Director; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St.; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Prospekt, tel. (383)306-58-95, e-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Laboratory Head, tel. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Liang-Chia Chen

National Taiwan University, Department of Mechanical Engineering, 1, Sec. 4, 10617, Taiwan, Taipei, Roosevelt Road, Professor, e-mail: lchen@ntu.edu.tw

Kuang-Chao Fan

National Taiwan University, Department of Mechanical Engineering, 1, Sec. 4, 10617, Taiwan, Taipei, Roosevelt Road, Lifetime Distinguished Professor, e-mail: fan@ntu.edu.tw

The application of sensor for sharp-edge position detection to ensure the high lateral resolution of linear measurements in the optical interference microscope has been proposed. Optical scheme of experimental setup including Linnik interferometer which is used to measure surface nanorelief and module of sharp-edge position detection are given. The measurement process description and experimental results are presented. The combination of measurement results performed by Linnik interferometer and sensor of the sharp-edge position detection using as the example the step structure measurement allows us to show the possibility of sharp-edge position precision finding.

Key words: interferometer, lateral resolution, nanorelief measurement.

Современные оптические интерференционные профилометры обладают высоким продольным разрешением. Предельное, экспериментально подтвержденное, разрешение по высоте составляет величину менее 30 пм [1]. Однако

поперечное разрешение ограничено дифракционным пределом и составляет 200 – 300 нм. Измерительные технологии последнего времени требуют значительно более высокого поперечного разрешения [2]. Такая задача встречается, например, при измерении шага периодических структур [3]. Одним из способов повышения поперечного разрешения является высокоточное определение положения резкого края 3D рельефа поверхности. Для решения этой задачи в работе [4] предложен датчик, который позволяет определять положение резкого края с разрешением 1 нм.

В данной работе предложено в одной оптической схеме совместить интерференционный микроскоп [5] и датчик положения резкого края. Это может существенно увеличить точность определения положения резкого края относительно измеренного рельефа поверхности. Также описывается оптическая схема экспериментальной установки и полученные экспериментальные результаты.

Для реализации этого подхода в интерферометр добавляется дополнительный источник света и оптический канал регистрации, находящиеся на одной оси с оптическими элементами схемы интерферометра. В качестве дополнительного источника света используется лазер, свет которого фокусируется в зоне измерения интерферометра. На рис. 1 показана схема макета экспериментальной установки, состоящего из следующих элементов: 1 – лазер (HeNe, $\lambda_{cp} = 633$ нм), 2 – осветитель (светодиод, $\lambda_{cp} = 533$ нм), 3 – светоделительная пластина, 4 – светоделительный кубик, 5 и 6 – два микрообъектива (Nikon CF Plan 50 $\times$ /0.55 EPI EWLD ∞ /0 WD 8.7 $f' = 4$ мм), 7 – тубусная линза (Nikon $f' = 200$ мм), 8 – оптическое зеркало, установленное на пьезокерамический актюатор 9 (PI P-725.4CD PIFOC) в опорном плече, объект измерения 10 (QC 88 VLSI калибр высоты 880Å), установленный на однокоординатный пьезо-столик 11 (PI P-622.1CD PIHera) в измерительном плече интерферометра. В канале регистрации установлен дополнительный светоделительный кубик 12 для обеспечения двух каналов регистрации. Регистрация интенсивности лазерного пятна, отраженного объектом измерения, выполнялась при помощи квадрантного фотоприемника 13 (SPOT 4D). Регистрация интерферограмм выполнялась ПЗС камерой 14 (SONY XC-HR50, размер пикселя 7,4 $\times$ 7,4 мкм, количество пикселей 659 $\times$ 494, размер матрицы 4,87 $\times$ 3,65 мм). Размер поля измерения рельефа поверхности 97,5 $\times$ 73,1 мкм. Размер пятна лазера в поле измерения ~ 6 мкм.

Процесс измерения состоит из двух частей: интерференционное измерение высоты рельефа поверхности и определение положения резкого края.

При интерференционном измерении высоты рельефа поверхности выполняется регистрация нескольких интерферограмм с заданным фазовым сдвигом. По этим интерферограммам производится расчет высоты 3D рельефа поверхности (ось Z). Поперечные координаты рельефа поверхности (оси X и Y) вычисляются по сетке пикселей ПЗС-камеры, исходя из увеличения оптической системы и физического размера пикселя.

Для определения положений резких краев выполняется прецизионное перемещение объекта измерения в плоскости (по осям X и Y). В каждом положении, при помощи дополнительного фотоприемника, регистрируется интенсив-

ность сфокусированного на поверхности объекта измерения лазерного пятна. В случае перемещения резкого края поверхности через лазерное пятно света в распределении интенсивности наблюдается локальный минимум. Совмещение результатов измерений позволяет уточнить положения резких краев на 3D рельефе, измеренном при помощи интерферометра.

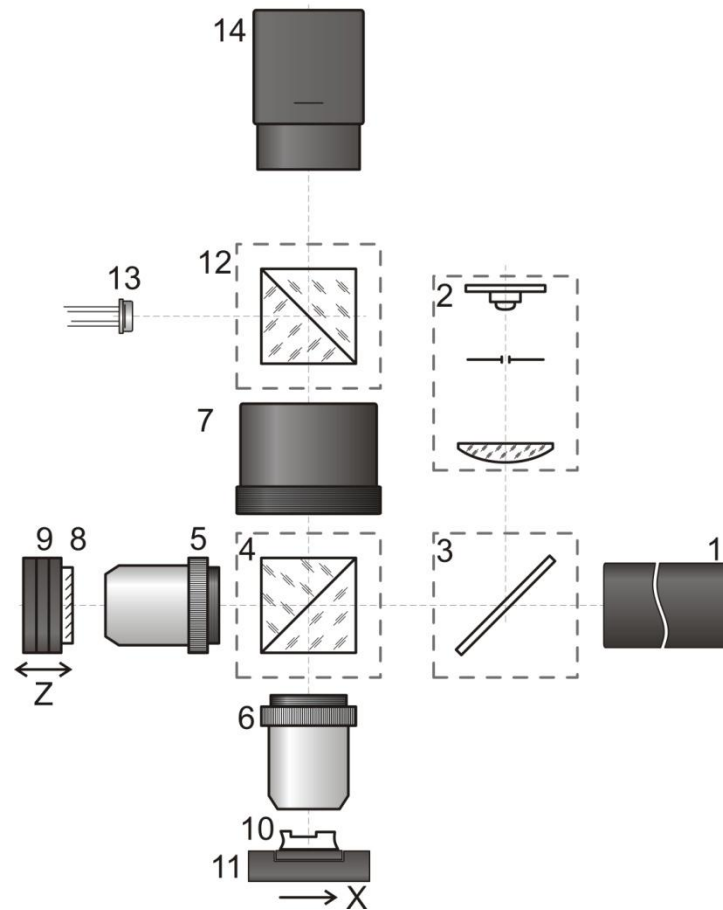


Рис. 1. Схема экспериментального макета

Для проверки предлагаемого способа повышения точности линейных измерений в интерферометре был проведен эксперимент по измерению рельефа поверхности и определению положения резкого края ступеньки калибра высоты.

Объект измерения позиционировался таким образом, чтобы в поле измерения находилась ступенька. Далее, опорное плечо интерферометра перекрывалось, и ПЗС камерой регистрировалось изображение поля измерения, содержащее край ступеньки и лазерное пятно. Это изображение сохранялось на компьютере и в дальнейшем использовалось для определения положения лазерного пятна в поле измерения (рис. 2). После этого опорное плечо интерферометра открывалось, лазер – закрывался. При помощи ПЗС камеры регистрировалось пять интерферограмм, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° . Интерферограммы сохранялись на компьютере и использовались для восстановления измеренного рельефа поверхности. Далее, открывался лазер, а светодиод и опорное плечо интерферометра перекрывались. При помощи квадрантного фотоприемника регистрировалось суммарное (по 4-м элементам) значение ин-

тенсивности лазерного пятна в текущем положении объекта измерения. В следующем положении объекта измерения выполнялась та же процедура регистрации интенсивности. Перемещение объекта измерения выполнялось с шагом 1 мкм, диапазон перемещений от 0 до 24 мкм. Полученные значения интенсивности были сохранены в компьютере и представлены в виде зависимости интенсивности от перемещения объекта измерения. В результате определения начального положения лазерного пятна в поле измерения рельефа поверхности было определено сечение измеренного рельефа поверхности, соответствующее полученному распределению интенсивности. Результаты измерений рельефа поверхности ступеньки и соответствующее распределение интенсивности совмещены на одном графике.



Рис. 2. Начальное положение объекта измерения

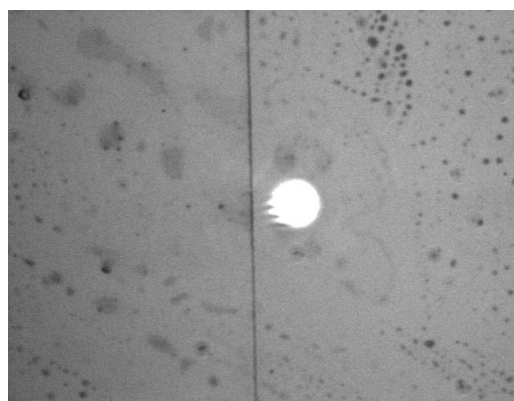


Рис. 3. Конечное положение объекта измерения

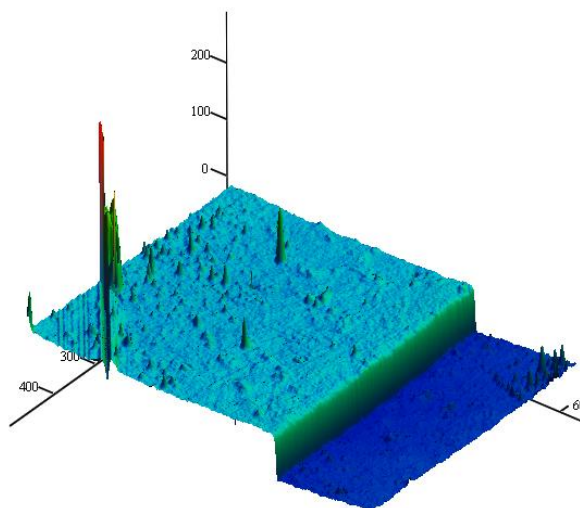


Рис. 4. 3D модель поверхности измеренного рельефа

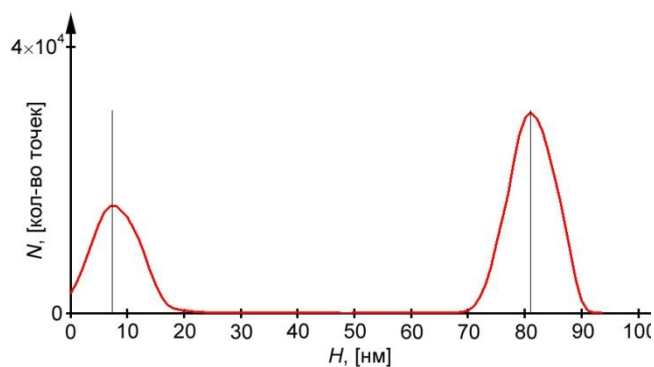


Рис. 5. Распределение высот в измеренном рельефе

В результате проведенного эксперимента было получено распределение интенсивности с шагом сканирования 1 мкм. Расчетное поперечное разрешение оптической системы на длине волны $\lambda_{cp} = 533$ нм составляет 591 нм.

Процесс определения положения резкого края не был автоматизирован, что затруднило выполнение прецизионного перемещения образца измерения и совмещения результатов измерений.

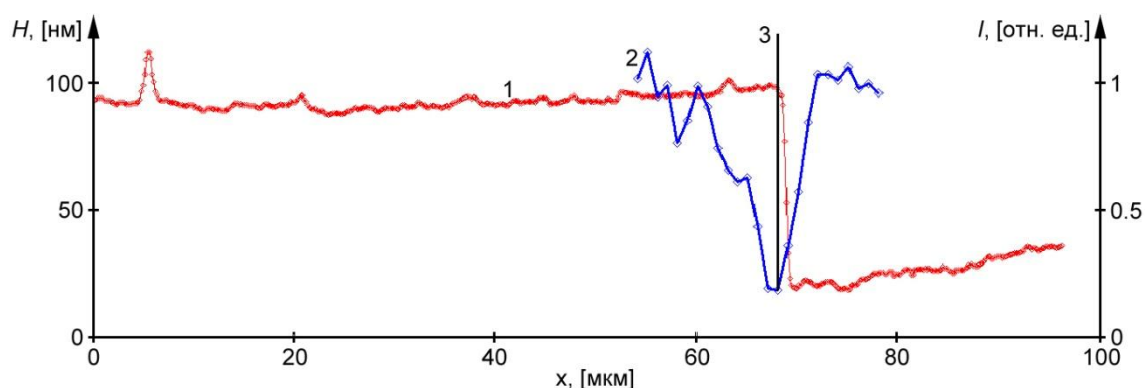


Рис. 6. Результат измерений:

- 1 – измеренное сечение рельефа поверхности,
 2 – зависимость регистрируемой фотоприемником интенсивности
 от положения объекта измерения, 3 – положение минимума

Полученные экспериментальные результаты подтвердили надежность определения резкого края предложенным методом и возможность совмещения положения резкого края с измеряемым 3D рельефом.

В дальнейшем планируется повторить эксперимент, в котором процесс определения положения резкого края будет автоматизирован.

Данная работа выполнена в рамках совместной работы КТИ НП СО РАН и Национального университета Тайваня (проект СО РАН №13).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sysoev E. V., Kosolobov S. S., Kulikov R. V., Latyshev A. V., Simikov S. V., Vykhristuk I. A. Precision measurements of subnanoscaled relief by interferometric method // ISMTII 2013. 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (Germany, Aachen, 1-5 July, 2013): [Abstr.] – Aachen, 2013. – P. 170.
2. Huebner U., Morgenroth W., Boucher R., Meyer M., Mirande W., Buhr E., Ehret G., Dai G., Dziomba T., Hildt R., Fries T. A nanoscale linewidth/pitch standard for high-resolution optical microscopy and other microscopic techniques // Measurement Science Technology. – 2006. – No. 17. – P. 1–8.
3. Xiao D., Tong-Bao L., Li-Hua L., Yan M., Rui M., Jun-Jing W., Yuan L. Fabrication and measurement of traceable pitch standard with a big area at trans-scale // Chinese Physics B. – 2014. – Vol. 23, No. 9. – P. 090601-1 – 090601-5.
4. Fan K.-C., Zhang K., Zhang Y.-L., Zhang Q. Development of a non-contact focusing probe for the measurement of micro cavities // International Journal of Automation Technology. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 156–162.
5. Сысоев Е. В., Выхристук И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 119–128.

© Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, Хоан Хун Хай, Ю. В. Чугуй,
 И. А. Выхристук, Лян-Чиа Чень, Куан-Чао Фань, 2015

КРУГОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЫВАЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОЗ НА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Александр Григорьевич Верхогляд

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Марина Андреевна Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Леонид Борисович Касторский

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, главный конструктор, тел. (383)306-58-66, e-mail: lkas@tdisie.nsc.ru

Антон Евгеньевич Качкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-91, e-mail: antoshka787@yandex.ru

Сергей Александрович Кокарев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, главный специалист, тел. (383)306-58-66, e-mail: kokarev@tdisie.nsc.ru

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Олег Юрьевич Моисеев

Институт систем обработки изображений РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (846)332-56-20, e-mail: moiseev@smr.ru

Александр Григорьевич Полещук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsk.su

Руслан Владимирович Шиманский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Работа посвящена применению круговой лазерной записывающей системы для изготовления дифракционных элементов на сферических поверхностях. Лазерная запись может быть сделана как на пленке фоторезиста, так и непосредственно на тонкой пленке хрома, нанесенных на вогнутую или выпуклую сферическую поверхность.

Ключевые слова: круговая лазерная записывающая система (КЛЗС), датчик автоматической фокусировки, фоторезист, дифракционный оптический элемент (ДОО).

APPLICATION OF CIRCULAR LASER WRITING SYSTEM FOR FABRICATION OF DOES ON SPHERICAL SURFACES

Aleksander G. Verhoglyad

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Head of Laboratory, tel. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Marina A. Zavyalova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Scientist, tel. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Leonid B. Kastorsky

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Chief Designer, tel. (383)306-58-66, e-mail: lkas@tdisie.nsc.ru

Anton E. Kachkin

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Academician Koptyuga Prospekt, Software Engineer, tel. (383)333-30-91, e-mail: antoshka787@yandex.ru

Sergey A. Kokarev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Chief Specialist, tel. (383)306-58-66, e-mail: kokarev@tdisie.nsc.ru

Viktor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Academician Koptyuga Prospekt, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientist, tel. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Oleg Yu. Moiseev

Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, 443001, Russia, Samara, 151 Molodogvardeikaya St., Candidate of Technical Sciences, Senior Scientist, tel. (846)332-56-20, e-mail: moiseev@smr.ru

Aleksander G. Poleshchuk

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Academician Koptyuga Prospekt, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsk.ru

Ruslan V. Shimansky

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Academician Koptyuga Prospekt, Researcher, tel. (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.ru

The paper is devoted to application of circular laser writing system for manufacturing of diffractive elements on spherical surfaces. Laser writing can be made on photoresist film or directly on thin chromium film coated on convex or concave spherical surface.

Key words: circle laser writing system (CLWS), autofocus sensor, photoresist, diffractive optical element (DOE).

Круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС) доказали свою точность и многофункциональность при изготовлении широкого ряда дифракционных элементов и угловых шкал на основе применения прямой технологий записи на термочувствительных материалах [1]. Однако наличие огромного разнообразия фоторезистов для бинарной и аналоговой фотолитографии ставит естественный вопрос о разработке варианта КЛЗС специализированного только для прямой лазерной записи на фоторезисте. Такие установки были созданы для Харбинского технологического института (КНР) [2] и Самарского аэрокосмического университета совместно КТИ НП СО РАН и ИАиЭ СО РАН. Отличительной особенностью этих установок является то, что они позволяют осуществить запись по сферической поверхности. Системы построены по схеме с одним записывающим диодным УФ лазером, имеющим мощность 60-120 мВт и длину волны 405 нм, и дополнительным DPSS лазером с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 50–200 мВт. Оптический канал с УФ лазером полностью мобильный, то есть размещается целиком на каретке радиального перемещения (рис. 1).

Дополнительный зеленый лазер используется для записи юстировочных структур путем проплавления фоторезиста и измерения их положения. Фоторезист не чувствителен к длине волны 532 нм и только плавится при высокой мощности пучка. Формирование кольцевых юстировочных канавок путем плавления и испарения фоторезиста возможно и с помощью УФ лазера, но в этом случае при плавлении резиста имеет место эффект волноводного распространения светового пучка большой интенсивности вдоль пленки фоторезиста. Это приводит к переэкспонированию фоторезиста на участке (до сотен микрометров в диаметре) вокруг оси вращения.

Применение диодного лазера PhoxX-405 (Omicron Laser GmbH) позволило расширить функциональность управления записывающим лазером. В этом лазере имеется цифровой вход Laser enable для полного выключения лазера (ВКЛ/ВЫКЛ на рис. 1). Он использовался как высокоскоростной затвор, так как частотная полоса этого входа 150 кГц с временем нарастания/спада 200 нс и он не подходит для режима радиальной импульсной модуляции.

Формирование сигналов радиальной аналоговой (РАМ) и радиальной импульсной (РИМ) модуляции для диодного УФ лазера, а также сигнала угловой аналоговой модуляции (УАМ) для АОМ осуществлялось с помощью высокоскоростной РСІ-платы векторного функционального генератора (ВФГ), установленной в управляющий компьютер [3]. В ВФГ также реализована возможность сохранения и оперативного использования нескольких многоуровневых передаточных характеристик для компенсации совместной нелинейности моду-

лятора и регистрирующей среды. В ФВГ также заложена возможность генерации РИМ для АОМ и задержанной РИМ для диодного лазера. РИМ используется для записи в радиальном диапазоне от оси вращения до примерно 1 мм, позволяя компенсировать изменение скорости сканирования в диапазоне не менее 1:1000.

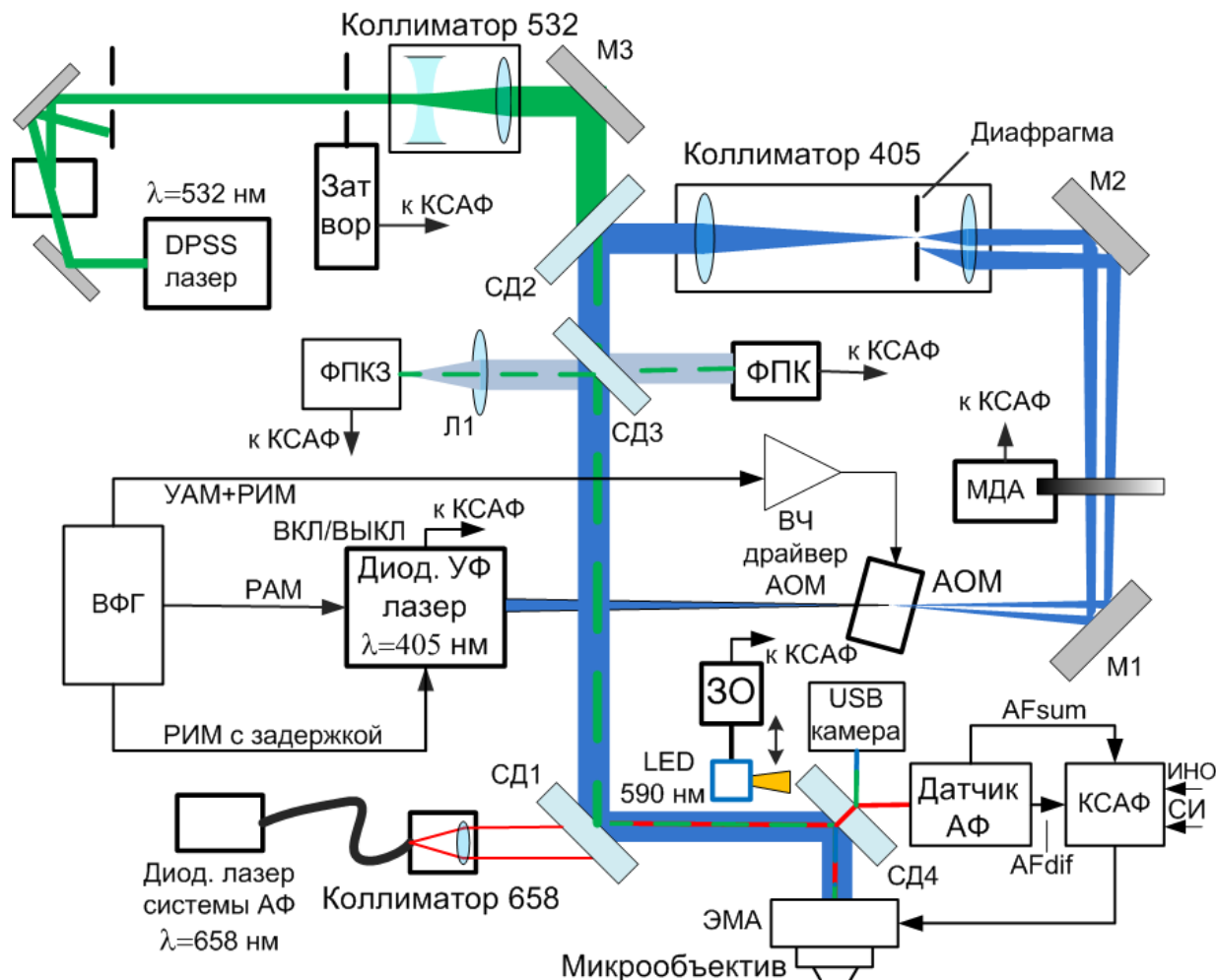


Рис. 1. Схема оптического канала КЛЗС.

Условные обозначения: СД1-СД4 – дихроичные светоделители, Л1 – линза, М1-М3 – зеркала, КСАФ – контроллер системы автофокусировки, ЗО – затвор-осветитель, ЭМА – электромагнитный актюатор, ФПК и ФПК3 – фотоприемники калибровки и контроля записи

Моторизованный дифракционный attenuator (МДА) с переменным пропусканием [4] используется для грубой компенсации изменения линейной скорости сканирования пучка attenuацией его мощности при записи фоторезисту. Формирование сигналов управления моторизованным attenuатором, затвором-осветителем, включением-выключением УФ лазера, а также чтение сигналов с ФПК и ФПК3 осуществляется контроллером системы автофокусировки наряду с его основной функцией – формированием сигнала обратной связи для электромагнитного актюатора, перемещающего микрообъектив по сигналу с датчика АФ. Этот контроллер позволяет также производить синхронное с вращением подложки (по сигналам импульсам начала оборота (ИНО) и тактовым импуль-

сам СИ) считывание фотоприемника контроля записи и разностного и суммарного сигналов датчика автофокусировки.

Наряду с полностью мобильным оптическим каналом отличительной особенностью рассматриваемых КЛЗС является также то, что они могут производить запись по осесимметричной вогнутой или выпуклой поверхности. Для реализации этого режима схема датчика автофокусировки [5] построена таким образом, что плоскость фокусировки красного (658 нм) лазера датчика АФ совпадает с плоскостью фокусировки записывающего УФ лазера и зеленого дополнительного лазера. Поскольку микрообъектив не полностью ахроматизирован, то при коллимированных входных пучках излучение с тремя разными длинами волн фокусируется на разных расстояниях от объектива. Для решения этой проблемы коллиматоры для лазерных пучков с длинами волн 405 и 532 нм юстировались так, чтобы получить сходящиеся пучки, имеющие диаметр 5–5,5 мм на входной апертуре микрообъектива и фокусирующиеся в фокальной плоскости для лазерного излучения с длиной волны 658 нм, используемого в датчике АФ.

В более ранних КЛЗС пучок записывающего лазера всегда коллимировался после прохождения модуляторов и перед тем как направлялся на каретку радиального перемещения к фокусирующему объективу. При перемещении каретки диаметр пучка на апертуре микрообъектива оставался неизменным, гарантируя постоянство распределения интенсивности записывающего пучка во всем радиальном диапазоне сканирования. Схема датчика АФ была построена таким образом, что красный лазерный пучок от датчика АФ падал на входную апертуру микрообъектива под небольшим углом и отражаясь от регистрирующей среды проходил снова через объектив и далее через оптическую схему к сдвоенному фотодиоду [6]. Дефокусировка приводила к перемещению пучка относительно границы раздела между секциями сдвоенного фотоприемника. При этом записывающий пучок и лазерный пучок датчика АФ фокусировались не только в разных плоскостях, но и их точки фокусировки были удалены друг от друга на десятки микрометров. Такая схема надежно работает для записи на плоской поверхности, но не подходит для записи по криволинейной поверхности, где происходит изменение угла отражения пучков от поверхности заготовки. В связи с чем и был разработан датчик АФ [5], для реализации которого потребовалось фокусировать записывающий пучок в то же самое место, что и красный лазерный пучок датчика АФ. Принцип действия данного датчика подробно описан в [7]. Следует отметить, что для его стабильной работы при записи на сферических поверхностях (выпуклых или вогнутых) необходимо, чтобы поверхность заготовки находилась строго в перетяжке лазерного зондирующего пучка. В противном случае, сферическая поверхность начинает влиять на расходимость отраженного пучка, что приводит к формированию ошибочного сигнала рассогласования.

Новый датчик АФ оказался очень удобен для операции поиска центра вращения заготовки по кольцу записанному зеленым лазером, так как лазер датчика АФ включен всегда и не влияет на фоторезист. При таком способе счи-

тывается суммарный сигнал AFsum с датчика автофокуса, пропорциональный коэффициенту отражения регистрирующей среды.

КЛЗС, разработанная для Самарского аэрокосмического университета, показана на рис. 2. На ней были изготовлены линейные дифракционные решетки на сферической поверхности диаметром 50 мм и радиусом кривизны 250 мм фирмы Thorlabs (рис. 3).

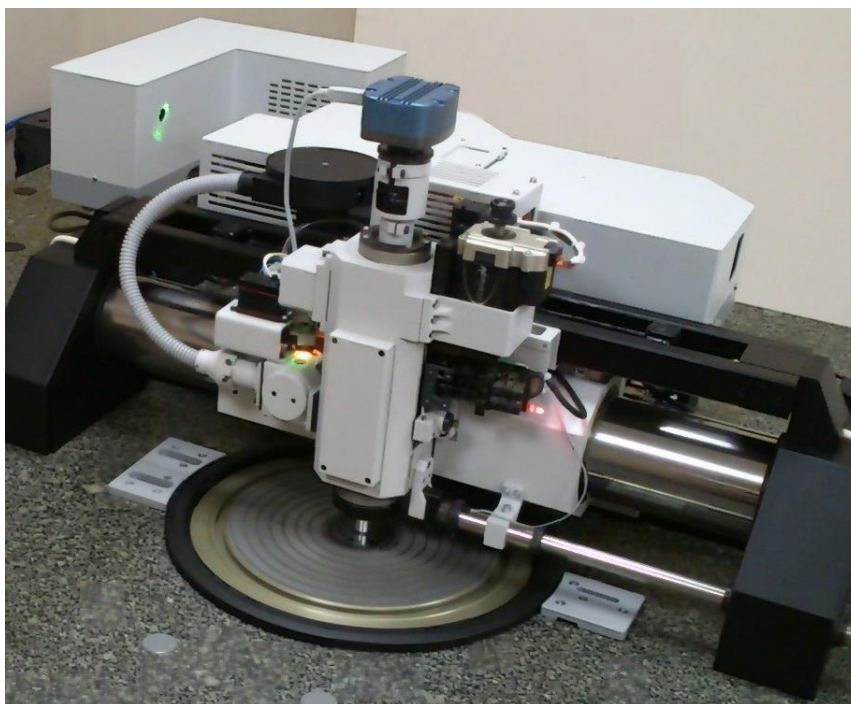


Рис. 2. КЛЗС для записи на сферической поверхности (СГАУ, 2015 г.)

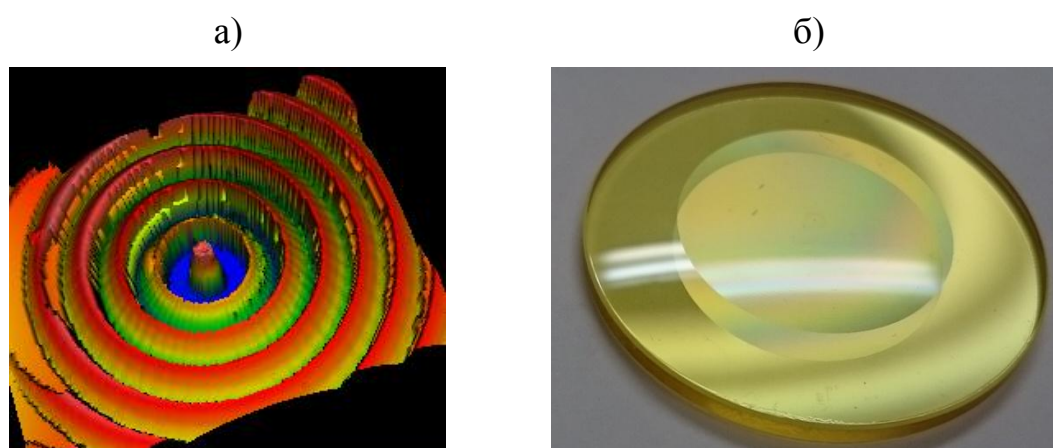


Рис. 3. Топология зон дифракционного аксикона (период зон – 30 мкм), записанного на сферической поверхности диаметром 50 мм и радиусом 250 мм (а), внешний вид дифракционной линейной решетки, записанной на сфере с такими же параметрами (б)

Таким образом, с использованием лазерных технологий синтеза микроструктур высокой точности на плоских и криволинейных поверхностях в КТИ НП совместно с ИАиЭ СО РАН разработана и создана коммерческая модель КЛЗС нового поколения на базе полупроводникового лазера. Она может быть эффективно использована для производства прецизионных широкоапертурных (до 250 мм) дифракционных оптических элементов, шкал, лимбов, масок, цифровых голограмм на плоских и сферических поверхностях.

В настоящее время КЛЗС поставляется по контрактам в ряд организаций и предприятий России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38, No. 8. – P. 1295–1301.
2. Chugui Yu., Verkhoglyad A., Poleshchuk A., Korolkov V., Sysoev E., Zavyalov P. 3D Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications // *Measurement Science Review*. – 2013. – Vol. 13, No. 6. – P. 322–328.
3. Korolkov V., Shimansky R., Cherkashin V., Denk D. Computer controlling of writing beam in laser microfabrication of diffractive optics // *Компьютерная оптика*. – 2003. – Вып. 25. – С. 79–88.
4. Полещук А. Г., Саметов А. Р., Донцова В. В., Шиманский Р. В. Дифракционные аттенюаторы лазерного излучения: методы изготовления и оптические характеристики // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 86–95.
5. Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Корольков В. П. Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 117–122.
6. Денк Д. Э., Полещук А. Г. Исследование методов увеличения точности работы системы автоматической фокусировки кругового лазерного записывающего устройства // *Автометрия*. – 2010. – Т. 46, № 1. – С. 107–117.
7. Верхогляд А. Г., Гуренко В. М., Касторский Л. Б., Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Кокарев С. А., Саметов А. Р. Способ автоматической фокусировки для записи информации на криволинейных поверхностях // *Патент РФ № 2262749*, опубл. 20.10.2005.

© А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Л. Б. Касторский, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков, О. Ю. Мусеев, А. Г. Полещук, Р. В. Шиманский, 2015

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ 3D-ОБЪЕКТОВ

Петр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Леонид Валентинович Финогенов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)306-62-24, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Евгений Владимирович Власов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-24, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

В данной работе рассматривается расчет двух типов специализированных объективов: для контроля отверстий и для контроля цилиндрических поверхностей. Разработанные объективы формируют плоские изображения данных 3D-объектов благодаря специально увеличенной собственной кривизне поля.

Ключевые слова: 3D-объект, отверстие, цилиндр, кривизна поля, дисторсия, объектив.

DEVELOPMENT OF THE SPECIALIZED LENSES FOR OPTOELECTRONIC INSPECTION OF 3D OBJECTS

Petr S. Zavyalov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Laboratory Head, tel. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Leonid V. Finogenov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Senior Scientist, tel. (383)306-62-24, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Evgeny V. Vlasov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., Junior Scientist, tel. (383)306-62-24, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

The calculation for two types of specialized lenses, namely, hole inspection lens and lens for inspection of cylindrical surfaces is presented. The developed lenses form the flat images of 3D-objects due to own field curvature that has been intentionally increased.

Key words: 3D-object, hole, cylinder, field curvature, distortion, lens.

Введение

Одной из актуальных задач в сфере оптико-электронных технологий является необходимость формирования изображений 3D-объектов, в частности, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей. Обычно для этого используются различные методы механического сканирования, развертки и т. п., обладающие существенными недостатками: низким быстродействием, сложностью конструкции. Существенные преимущества при контроле таких 3D-объектов может дать применение специализированных оптических систем, которые благодаря намеренно увеличенным аберрациям и/или особому ходу лучей формируют плоские изображения, регистрация которых осуществима обычными матричными или линейными фотоприёмниками.

В данной работе рассматривается расчет двух типов объективов: для контроля отверстий и для контроля наружной цилиндрической поверхности. Разработанные объективы за счет большой кривизны поля формируют плоские изображения цилиндрических поверхностей. Объектив для контроля отверстий был разработан и применен в системе контроля дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов [1-3]. Объектив для контроля цилиндров был разработан для контроля внешнего вида топливных таблеток ТВС [4].

Объектив для контроля отверстий

Рассмотрим случай формирования изображения цилиндрического отверстия (диаметром D_h и длиной L_h) идеальной тонкой линзой (рис. 1, а).

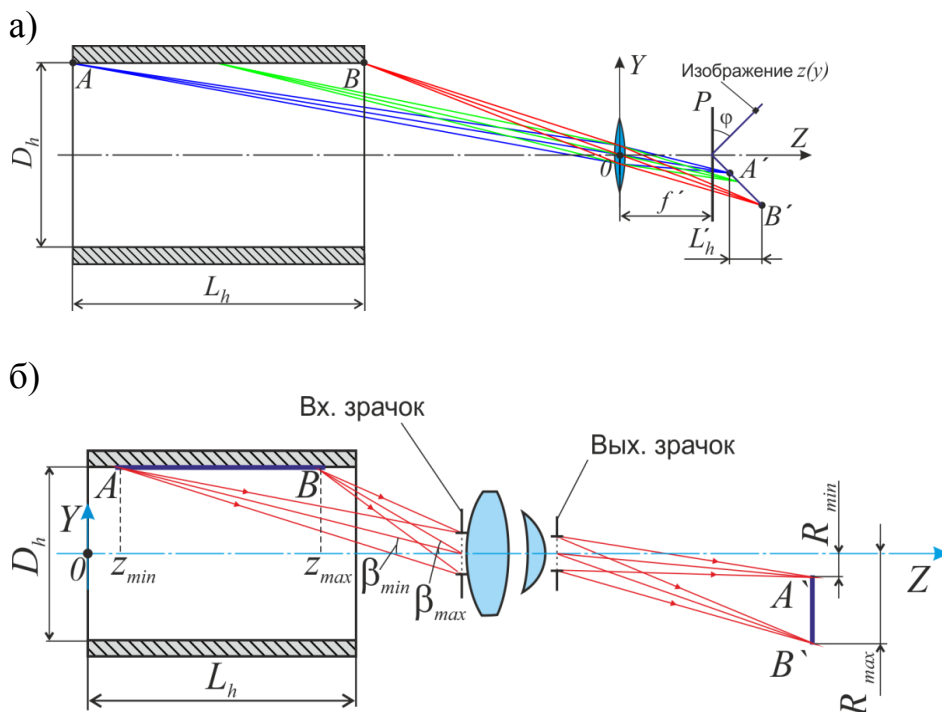


Рис. 1. Формирование изображения цилиндрического отверстия:

а) тонкой линзой ($f' = 5$ мм, $D_h = 10$ мм $\rightarrow \varphi = 45^\circ$),

б) специализированным объективом для контроля отверстий

Как известно, продольный отрезок проецируется тонкой линзой в наклонный отрезок (отрезки АВ и А'В' на рис. 1, а), т. е. изображение поверхности отверстия в данном случае будет коническим. Используя формулу тонкой линзы можно показать, что форма изображения отверстия описывается выражением:

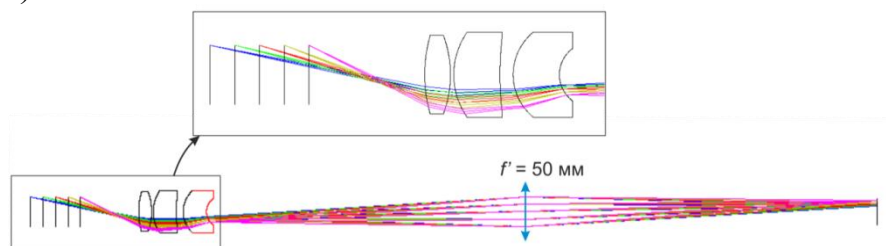
$$z(y) = \frac{2f'}{D_h}|y| + f' = \operatorname{tg}(\varphi) \cdot |y| + f' \quad (1)$$

Из (1) следует, что угол конуса ($\pi - 2\varphi$) увеличивается при увеличении соотношения f'/D_h . Это означает, что тонкая линза (или стандартный объектив) может быть использована для формирования изображений отверстий при условии $f' \ll D_h$, т.е. для больших отверстий. В этом случае коническое изображение стремится к плоскости Р ($\varphi \rightarrow 0$). Однако использовать данный подход не представляется возможным для отверстий небольшого диаметра (менее 100 мм) вследствие значительных трудностей, связанных с изготовлением ультракороткофокусных объективов ($f' \ll 5$ мм).

Очевидно, что стандартным объективом построить качественное изображение протяженных отверстий с малым диаметром невозможно. Для этих целей необходима разработка специализированного объектива, который можно назвать объективом для контроля отверстий (ОКО). Суть преобразования, выполняемого таким объективом, поясняется на рис. 1, б. Объектив должен спроецировать цилиндрическую поверхность отверстия диаметром D_h в плоскость фотоприемной матрицы. Выполнить такое преобразование способен объектив, обладающий значительной собственной кривизной поля.

Одной из задач, где необходимо использовать подобный объектив, является контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ТВС ядерных реакторов. Решение этой задачи в целом описано нами в работах [1-3]. Оптическая схема разработанного объектива представлена на рис. 2, а. Диаграммы пятен рассеяния для различных точек по длине отверстия показаны на рис. 2, б. Видно, что большинство пятен имеют значительный астигматизм.

а)



б)



Рис. 2. Характеристики рассчитанного объектива:

а) оптическая схема, б) диаграммы пятен рассеяния в зависимости от длины отверстия z

Можно показать, что собственная кривизна поля данного объектива недостаточна для наблюдения поверхности отверстия. Однако большой астигматизм данного объектива вносит существенную добавку к кривизне, такую, что изображение отверстия в меридиональных пучках является практически плоским.

Применение данного объектива позволило существенно упростить оптическую схему системы контроля дистанционирующих решеток, повысить точность измерения, а также значительно расширить номенклатуру измеряемых решеток по сравнению с ранее разработанной системой, где применялись стандартные объективы [5].

Недостатками разработанного объектива являются его малая апертура (относительное отверстие $\sim 1:12$) и большой уровень aberrаций. Что объясняется простой конструкцией объектива (три сферические линзы).

Одним из подходов, позволяющих добиться лучшего качества изображений отверстий с малым диаметром и/или большим соотношением L_h/D_h , является разработка объективов, имеющих несколько промежуточных изображений (два и более). В этом случае можно добиться большей суммарной кривизны поля объектива и без использования значительного астигматизма пучков.

На рис. 3 показан результат расчета объектива из семи линз, имеющего два промежуточных изображения и формирующего плоское изображение отверстия без астигматических пучков.

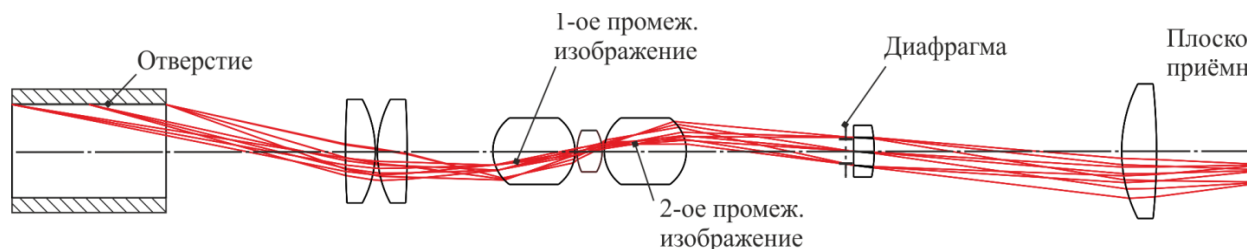


Рис. 3. Объектив для контроля отверстий без астигматических пучков

Данный объектив, в отличие от предыдущего, формирует более качественное изображение. Разрешение как в меридиональном, так и в сагиттальном направлениях достаточно высокое. При этом второй объектив имеет большее относительное отверстие ($1:7$ против $1:12$).

Примечательно, что в последнее время объективы для контроля отверстий стали появляться на рынке оптических систем [6, 7]. Так, объектив РСНІ компании Opto Engineering предназначен для контроля отверстий диаметром 10 – 120 мм с небольшим соотношением $L_h/D_h \approx 1$.

Объектив для контроля наружной цилиндрической поверхности

При формировании изображений наружной цилиндрической поверхности, как правило, используют методы развертки, вращая изделие вокруг оси и производя последовательное накопление узких участков изображения в суммарный кадр развёртки. Данный метод позволяет получить изображение боковой поверхности цилиндра хорошего качества, с высоким контрастом дефектов. Однако данный метод не применим в ряде случаев, например, при высоких требо-

ваниях по производительности контроля или при контроле длинных изделий (трубы, кабель и т. п.). В этом случае обычно используют многоканальный осмотр. При этом для создания равномерного освещения цилиндра необходимо использовать распределенные источники рассеянного света, избегать создания бликов от поверхности цилиндра и применять ряд других сложных подходов. Такая конфигурация освещения приводит к значительному снижению контраста дефектных областей, особенно на поверхностях, имеющих узкую диаграмму рассеяния.

Для получения высококонтрастных изображений таких поверхностей и решения задачи быстрой регистрации цилиндрической поверхности был предложен метод на основе специального объектива [4]. На рис. 4 поясняется предложенный принцип контроля цилиндрической поверхности.

Оптическая система построена таким образом, что освещение и наблюдение цилиндрической поверхности 1 производится всегда по нормали к поверхности. Объект 1 движется вдоль своей оси со скоростью V . Изображение поверхности формируется с помощью специального объектива, состоящего из конденсора 2 и корректора 5. Для того чтобы наблюдение поверхности производилось по нормали к цилиндрической поверхности в любой её точке, входной зрачок объектива должен находиться на оси цилиндра. Эту задачу выполняет конденсор 2, имеющий при этом диаметр достаточный для охвата большого участка цилиндрической поверхности. Корректор 5 выполняет задачу исправления аберраций конденсора, которые довольно значительны при большом увеличении оптической системы $\Gamma \geq 1^x$. При малом увеличении $\Gamma \ll 1$ аберрации не значительны, поэтому вместо корректора можно использовать стандартный объектив.

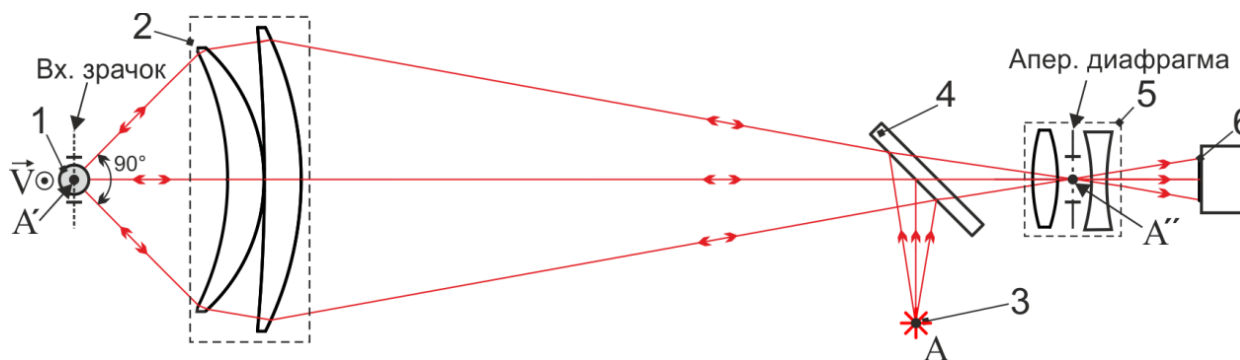


Рис. 4. Метод получения изображения боковой поверхности цилиндра:
1 – объект, 2 – конденсор, 3 – источник света, 4 – полупрозрачное зеркало,
5 – корректор, 6 – фотоприёмник

Регистрация изображения осуществляется камерой 6. Освещение объекта производится через полупрозрачное зеркало 4. При этом для соблюдения оптимальных условий освещения и наблюдения, необходимо чтобы конденсор 2 формировал изображение источника 3 на оси цилиндра 1. Таким образом, в оптической схеме должны быть оптически сопряжены источник света (точка A), ось цилиндра, входной зрачок (точка A') и апертурная диафрагма (точка A'').

Применяя несколько таких оптических каналов можно получить полное изображение развертки боковой поверхности в процессе движения цилиндрического изделия вдоль оси.

Для реализации предложенного метода был разработан специализированный объектив для контроля цилиндрической поверхности. Оптическая схема разработанного объектива представлена на рис. 5, а. Диаграммы пятен рассеяния для различных точек цилиндрической поверхности приведены на рис. 5, б. Видно, что разрешение объектива близко к дифракционному пределу. Относительное отверстие объектива равно 1:6, фокусное расстояние 11,7 мм, параксиальное увеличение $\Gamma = -0,62^x$, диаметр контролируемых цилиндров $7 \div 9$ мм, поле зрения 90° .

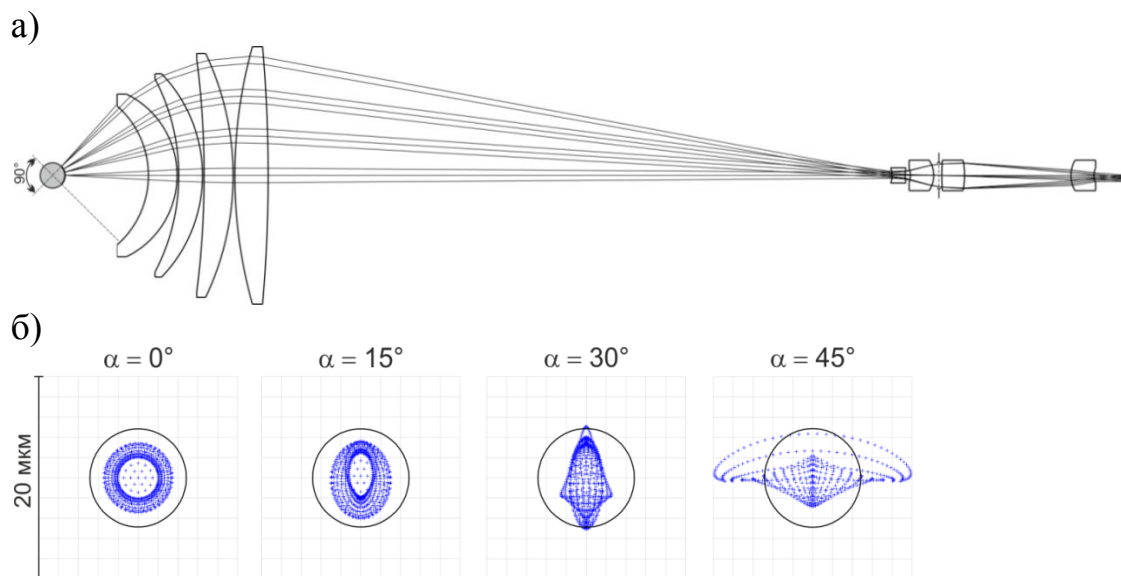


Рис. 5. Характеристики рассчитанного объектива для контроля цилиндров: оптическая схема (а), диаграммы пятен рассеяния (б)

Данный объектив был разработан, изготовлен и использован в высокопроизводительной системе контроля боковой поверхности топливных таблеток. Полученное с помощью четырёх таких объективов изображение боковой поверхности таблеток представлено на рис. 6. Скорость движения таблеток составляла 100 мм/с (около 10 изд./с).

Применение разработанного объектива позволило получить высококонтрастные изображения топливных таблеток. Качество изображений позволило применить простые, быстрые и надёжные алгоритмы обработки изображений, работающие в темпе технологического конвейера.

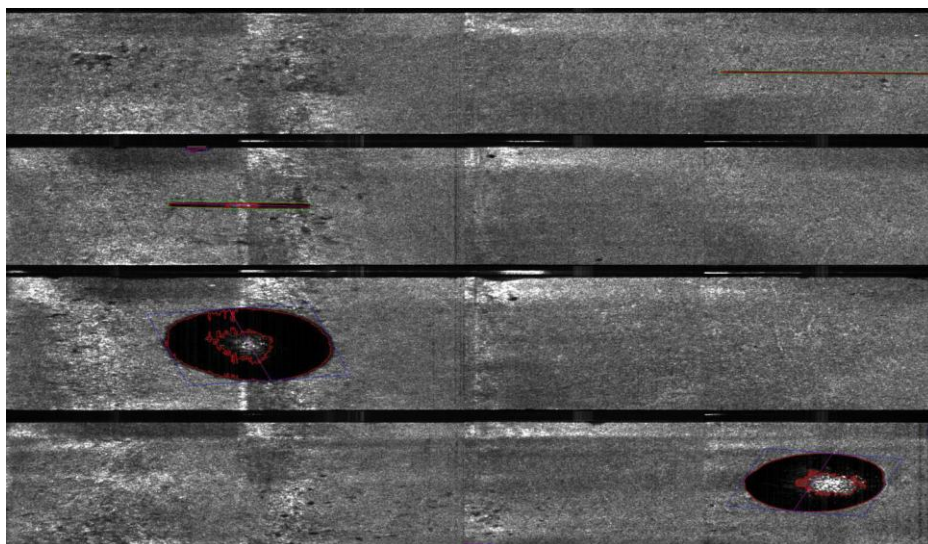


Рис. 6. Примеры обработанных изображений таблеток с характерными дефектами

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Finogenov L. V., Lemeshko Yu. A., Zav'yalov P. S., and Chugui Yu. V. 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffraction optical elements // Measurement Science and Technology. – 2007. Vol. 18, No. 6. – P. 1779–1785.
2. Завьялов П. С., Лемешко Ю. А., Финогенов Л. В., Чугуй Ю. В. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 23–31.
3. Lemeshko Yu. A., Finogenov L. V., Zav'yalov P. S. Using the Diffractive Optics for 3D Inspection of Nuclear Reactor Fuel Assembly Grid Spacers // Measurement Science Review. – 2008. – Vol. 8, Section 3, No. 3. – P. 74–77.
4. Белобородов А. В., Власов Е. В., Завьялов П. С., Финогенов Л. В. Многоканальный высокопроизводительный оптико-электронный контроль качества поверхности топливных таблеток // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 121–129.
5. Битюцкий О. И., Вертопрахов В. В., Гущина А. А. и др. Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 5. – С. 4–18.
6. Vertoprakhov V., Yew T. P. Hole Inspection Method and Apparatus. US20110128368 A1.
7. Hole inspection optics for 360° inside view in perfect focus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opto-engineering.com/products/pchi-hole-inspection-optics>

© П. С. Завьялов, Л. В. Финогенов, Е. В. Власов, 2015

О СПОСОБАХ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОПЛАНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В 3D-ДИСПЛЕЯХ

Евгений Владимирович Власов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (983)134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Рассматриваются способы построения 3D изображений в виде линейной комбинации двумерных изображений, разнесённых по глубине вдоль зрительной оси глаза.

Ключевые слова: 3D дисплей, стимулы аккомодации, многоплановое изображение.

ON THE WAYS OF MULTIPLANE IMAGES CONSTRUCTION IN 3D-DISPLAYS

Evgenii V. Vlasov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, Junior Scientist, tel. (983)134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

The ways of 3D images construction as a linear combination of two-dimensional images, spaced along the depth of the eye visual axis are considered.

Key words: 3D display, stimulus of accommodation, multiplane image.

Восприятие расстояния человеком основывается на признаках глубины. Прямые признаки глубины стимулируют близкую к корректной аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность. Косвенные признаки включают в себя окклюзии и автоокклюзии, многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента структуры, двигательный параллакс и др.

При разработке стереоскопических дисплеев, не вызывающих ощущения дискомфорта при восприятии объёмных изображений, основная сложность состоит в создании и согласовании стимулов аккомодации и конвергенции глаз. По сути, наличие стимулов аккомодации означает, что изображение каждой из стереопар должно быть трехмерным, т. е. иметь протяженность по глубине для каждого элемента изображения (пиксела). При фиксации взгляда на неподвижном объекте, контрастность изображения на сетчатке (субъективно воспринимаемая как чёткость, или резкость) является стимулом для аккомодации глаза.

Светоделительные элементы

На рис. 1 представлена схема, состоящая из модели бипланового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком *a*. Окуляр содержит два плоских изображения P1 и P2, и с помощью линзы L формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубу S мнимые изображения P1 и P2 оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ. Излучения элементов изображений P1, P2 фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изо-

бражений $p1$ и $p2$ таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в районе фовеа q .

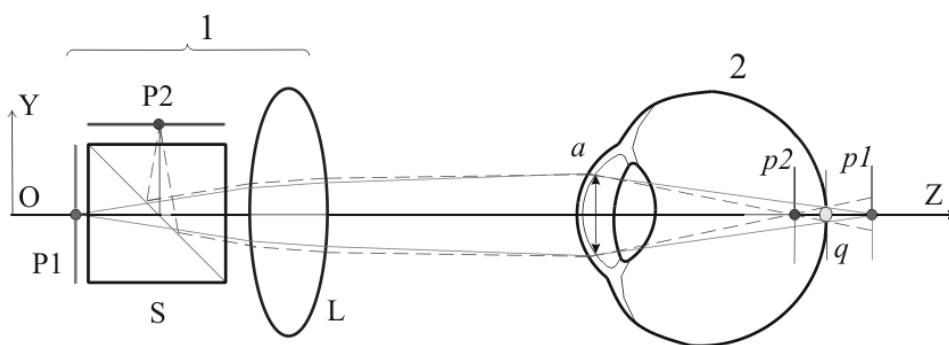


Рис. 1

Данный дисплей является разновидностью дисплеев иммерсивного типа. Изображения с двух микродисплеев, пройдя через светоделительный кубик и окуляр, попадают на сетчатку человеческого глаза. Объемность изображения достигается за счет стереоизображения и разноудаленных от светоделительного кубика микродисплеев.

Явным недостатком дисплеев, построенных на данном принципе, является ограниченное число планов, не более двух. Проведенный дифракционный анализ пиксельных изображений на основе определенных количественных характеристик дифракционной глубины в зависимости от остроты разрешающей способности и диаметра зрачка глаза [1, 2], а также рассчитанные потери контраста [3, 4] вносят свои изменения в формулу построения изображений для ближнего и дальнего планов. На основе этих данных оптимальным межплановым расстоянием является значение 0,6 дптр. Это диоптрийное расстояние позволяет построение качественного ограниченного объема глубины. К примеру, интервал от 30 см (3,33 дптр) до 36,6 см (2,73 дптр), интервал от 70 см (1,43 дптр) до 1,2 м (0,83 дптр), интервал от 1,18 м (0,85 дптр) до 4 м (0,25 дптр). Как видно, если требуется построить объемное изображение на расстоянии вытянутой руки от человека и до бесконечности, то необходимо построение гораздо большего количества планов-изображений.

Активные оптические элементы

В качестве примера использования активных оптических элементов представлена статья Дэвида Хоффмана [5]. На рис. 2 изображена оптическая схема дисплея созданного на основе использования жидких линз. Активный оптический элемент расположен между глазом и источником изображения, который оптически сопряжен с входным зрачком. Элемент имеет варьируемую оптическую силу: за счет управления ей можно построить несколько мнимых изображений на разных расстояниях. Через окуляр изображение попадает на сетчатку глаза.

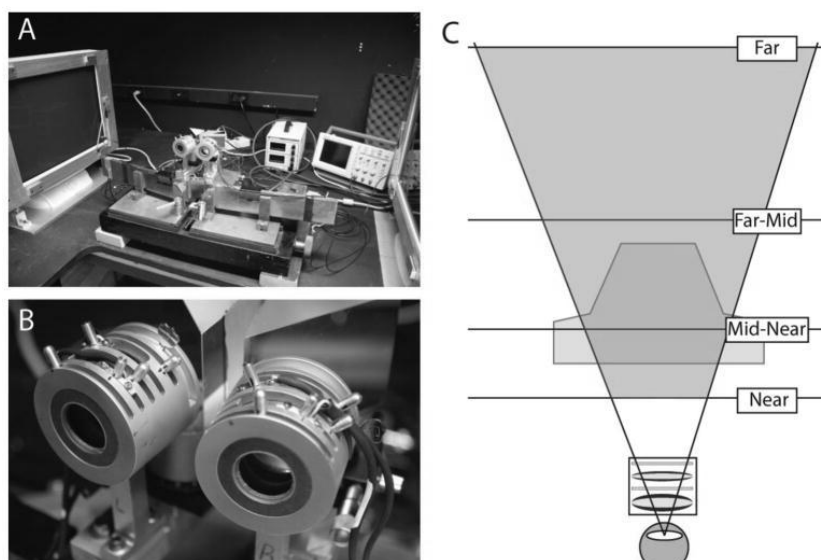


Рис. 2

Дисплеи, использующие активные оптические элементы, могут быть как просветного, так и иммерсионного типа, в зависимости от поставленных требований и задач [6]. Просветная среда также позволяет зрителю видеть реальные объекты, как и ретрорефлективная, и так же обеспечивает естественное когнитивное зрительное восприятие реальных предметов.

Преимуществом такого типа дисплеев над дисплеями, основанными лишь на светоделительных элементах, является возможность построения большего числа планов-изображений и, соответственно, большего объема глубины изображаемого пространства.

Вращатели поляризации, двулучепреломляющие кристаллы

В качестве альтернативного способа построения многопланового 3D дисплея предлагается использовать поляризационные методы, основываясь на двойном лучепреломлении некоторого вида кристаллов. Одним из примеров таких кристаллов является кальцит CaCO_3 , с разными показателями преломления для разнополяризованной волны: $n_o = 1,640 - 1,660$ и $n_e = 1,486$. Кальцит – прозрачный материал, из которого можно изготавливать оптические элементы с высоким светопропусканием, так же у него большая разница в показателях преломления. На основе этого свойства в программной среде Zemax была рассчитана оптическая схема 3D дисплея. На рис. 3 представлен четырехплановый вариант дисплея, с возможностью выбора и переключения положения планов. Первый вариант предусматривает объемную среду «Близь» с планами, расположенными на расстояниях 29,3 см (3,4 дптр), 37 см (2,7 дптр), 50,3 см (1,98 дптр), 78 см (1,28 дптр) и второй вариант – «Даль» – с положениями планов-изображений на расстояниях 47 см (2,12 дптр), 70 см (1,42 дптр), 1,4 м (0,71 дптр), бесконечность (0 дптр). Межплановое расстояние 0,7 дптр взято на основе расчета дифракционной глубины 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза [3].

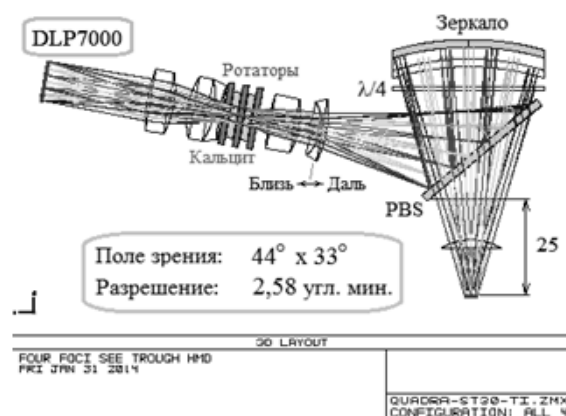


Рис. 3

Предлагаемая технология не имеет таких сильных аберраций, как при использовании жидких линз, однако так же позволяет строить многоплановые изображения, используя минимум компонентов, таких, как микродисплеи.

В заключение следует отметить, что помимо визуального комфорта, многоплановый 3D дисплей обеспечивает прямые и косвенные признаки глубины, позволяющие естественным образом оценивать расстояния и размеры предметов. Прямые признаки глубины стимулируют близкую к корректной аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность. Косвенные признаки поддерживаются программным обеспечением и включают окклюзии и автоокклюзии, многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента текстуры, двигательный параллакс и др. В перспективе планируется применение такого типа дисплеев при разработке тренажеров нового поколения для космонавтов и авиатренажерах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев А. М., Власов Е. В. Биплановое изображение, стимулирующее аккомодацию глаза // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 75–79.
2. Ковалев А. М., Власов Е. В. О качестве трехмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 33–40.
3. Ковалев А. М., Власов Е. В. Дифракционная глубина 3D изображений, стимулирующих аккомодацию глаза // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 3–8.
4. Власов Е. В., Ковалев А. М. О контрасте комбинированных изображений в 3D дисплеях, стимулирующих аккомодацию глаза // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 45–48.
5. Hoffman D. M., Hands P. J. W., Kirby A. K., Love G. D., and Banks M. S. Stereo display with time-multiplexed focal adjustment // Proc SPIE. – 2009. – Vol. 7237: 72370R. doi:10.1117/12.807170.
6. Ковалев А. М. О дисплеях персонального пользования для виртуальных сред с добавленной реальностью // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 22–29.

© Е. В. Власов, 2015

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАСАДНОЙ ЖИДКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕДНЕГО ОТРЕЗКА ОБЪЕКТИВА ВИДЕОКАМЕРЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опто-техники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Диана Георгиевна Макарова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и опто-техники, тел. (383)344-29-29, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и опто-техники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Рассмотрен вариант расчета оптической системы видеокамеры для телеуправляемых робототехнических устройств, состоящей из жидкой линзы с изменяемым фокусным расстоянием и объектива типа «Тессар».

Ключевые слова: оптическая система, жидкая линза, переменное фокусное расстояние, увеличение.

USAGE OF A MOUNTED LIQUID LENS FOR VARIATION OF A FRONT SEGMENT OF THE OBJECTIVE OF VIDEOCAMERA THE ROBOT TECHNICAL OF ARRANGEMENTS

Victor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Diana G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Post-graduate student of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

The alternative of calculation of an optical system of a videocamera for long-distance the robot technical the devices, consisting of a liquid lens with a changed focal length and an objective such as «Тессар» surveyed.

Key words: optical system, liquid lens, variable focal length, magnifying.

В последние годы значительно возрос интерес к оптическим системам с жидкими (жидкостными) линзами (ЖЛ), основанными на различных физических принципах [1–4]. В частности, их применение может оказаться эффективным в измерительной и медицинской технике, дистанционно управляемых устройствах систем безопасности и др., когда в процессе работы необходимо оперативно перенастраиваться на разноудаленные объекты. При этом оптика видеокамер телеуправляемых робототехнических средств должна обладать достаточно большими относительными отверстиями, чего не требуется для «мобильников» и устройств считывания штрих-кодов.

Одним из наиболее распространенных приемов фокусировки на заданное расстояние, особенно широко используемый в фотографии, является применение вспомогательной линзы (рис. 1). Основной объектив тогда функционирует в неизменных условиях, а наведение на конечные расстояния производится при помощи сменных насадных линз с фиксированными фокусными расстояниями. Именно последние рационально заменить на одну-единственную ЖЛ, радиус кривизны, которой регулируется, например, за счет эффекта электросмачивания («electrowetting») [5]. Так как ЖЛ не нуждаются в продольных подвижках, то конструктивно вся система может быть выполнена в виде сборки типа «моноблок» с элементами, ориентированными относительно друг друга с необходимой степенью точности и жестко соединенными между собой клеем без дополнительных оправ [6].

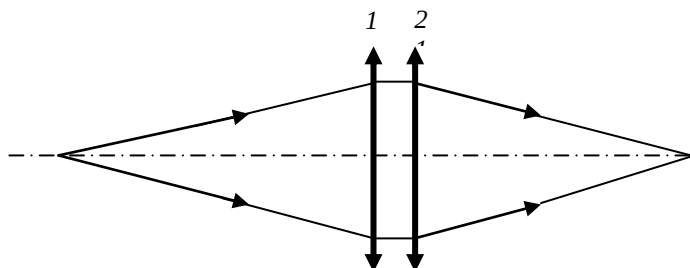


Рис. 1. Фокусировка оптической системы на конечное расстояние с помощью насадной линзы:

1 – насадная линза; 2 – основной объектив

В докладе проиллюстрированы возможности применения ЖЛ для изменения переднего отрезка объективов видеокамер робототехнических устройств на примере базового объектива по схеме «Тессар» [7] с относительным отверстием 1:4,5. С целью обеспечения эффективной работы в реальных условиях освещения объектов при сохранении диаметра входного зрачка относительное отверстие было увеличено до значения 1:2, а фокусное расстояние, наоборот, уменьшено до 6,5 мм, для чего перед и после базового объектива введено по одной линзе. Полученной модификации присвоено обозначение «М-Тессар». Комбинация составляющих ЖЛ растворов выбрана из [8] (состав 27); значение коэффициента дисперсии Аббе определено приблизительно (поскольку для большинства наполнителей ЖЛ оптические константы не приводятся, а даются

только значения показателей преломления n_D), по «основным» жидкостям (этиленгликоль и вода – по 48 %); расчет системы ЖЛ + «М-Тессар» выполнен для фокусировки на объекты, находящиеся на расстояниях от 500 мм до 10 000 м.

Оптическая система ЖЛ + «М-Тессар» показана на рис. 2. Здесь 1 – ЖЛ, состоящая из непроводящей и проводящей жидкостей, помещенных между двух плоских защитных стекол, 2 – 6-линзовый объектив «М-Тессар».

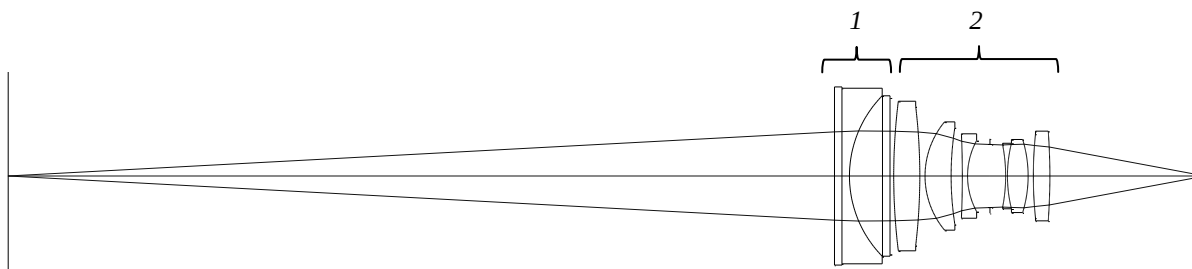


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема ЖЛ + «М-Тессар»:

1 – жидкая линза; 2 – объектив «М-Тессар»

Результаты расчетного моделирования подобной системы для расстояний до объекта 500, 750 и 1 000 мм, 5, 10 и 10 000 м приведены в табл.

Таблица

Оптические характеристики системы ЖЛ + «М-Тессар»

Параметр	Расстояние до объекта, м					
	0,5	0,75	1,0	5,0	10,0	10 000
Радиус ЖЛ, мм	8,09	8,35	8,49	8,86	8,91	8,98
Линейное поле зрения в плоскости предметов, м	0,36	0,54	0,72	3,62	7,25	6561,0
Размер изображения, мм	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Линейное увеличение, $\times 10^5$, крат	660	440	330	66	33	0,0376
Полихроматическая концентрация энергии в пределах пиксела 5×5 мкм						
Дифракционный предел	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
В центре поля зрения	0,61	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Для зоны поля зрения 0,707	0,62	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60
На краю поля зрения	0,72	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72

В качестве примера качества абберационной коррекции на рис. 3 представлены графики концентрации энергии в пределах пиксела 5×5 мкм системы ЖЛ + «М-Тессар» при расстоянии до объекта 500 мм.

К достоинствам данной системы следует отнести быстрое (в пределах мс) изменение фокусного расстояния, постоянство относительного отверстия, малый диапазон (менее 1 мм) изменения радиуса кривизны преломляющей поверхности ЖЛ.

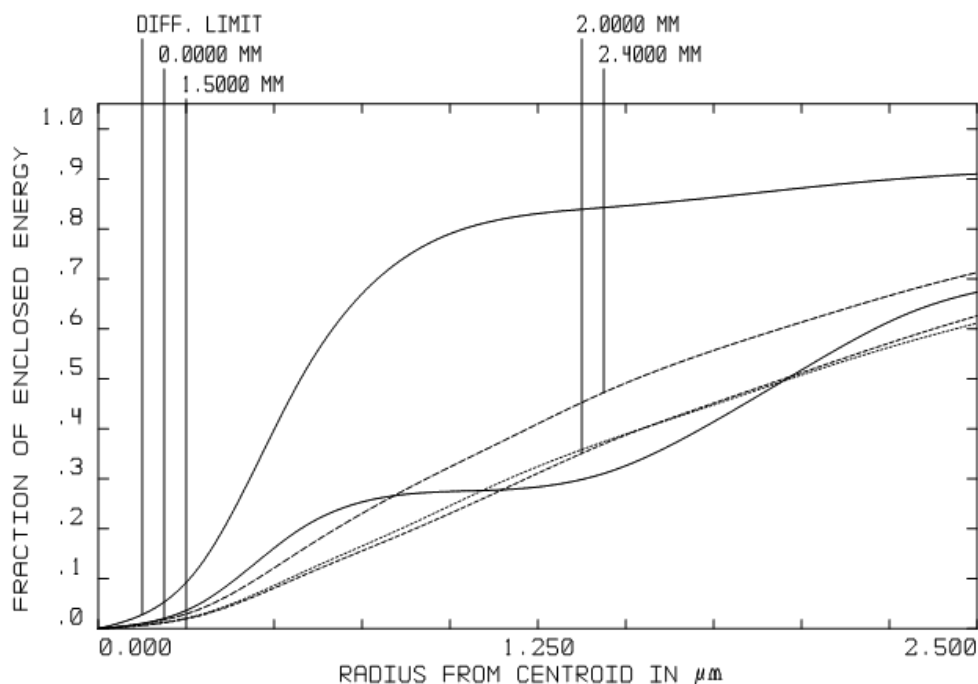


Рис. 3. Графики концентрации энергии в пределах пиксела 5×5 мкм системы ЖЛ + «М-Тессар» при расстоянии до объекта 500 мм

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pat. 1999018456 WO. Lens With Variable Focus / B. Berge, J. Peseux. Publication Date: 04.15.1999.
2. Pat. 7126903 US. Variable Focus Lens / B. J. Feenstra, S. Kuiper, S. Stallinga, B. H. W. Hendriks, R. M. Snoeren. Publication Date: 10.24.2006.
3. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, В. С. Ефремов, И. О. Михайлов, Н. В. Оревова, Б. В. Федоров, В. Б. Шлишевский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.
4. Голицын А. В., Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Некоторые варианты оптических систем на основе жидкостных элементов // Сборник трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика–2014». – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2014. – Т. 3. – С. 55.
5. Chioua P. Y., Moonb H., Toshiyoshic H., Kimb C.-J., Wua M. C. Light actuation of liquid by optoelectrowetting // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – Vol. 104 (3). – P. 222–228.
6. Голицын А. В., Михайлов И. О., Шлишевский В. Б. Конструкция миниатюрного комбинированного объектива-моноблока с жидкими линзами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 76–80.
7. Вычислительная оптика: Справочник. Изд. 2. / М. М. Русинов [и др.]; под ред. М. М. Русинова. – СПб.: Политехника, 2008. – 424 с.
8. Pat. EP1979771B1. Multi-phase liquid composition and variable- focus optical lens driven by electrowetting that incorporates the / Amiot F., Malet G., Liogier D'ardhuy Gaëtan. Publication Date: 02.11.2011.

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский, 2015

ОПТИМАЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)798-15-60, e-mail: gricew49@mail.ru

Полина Александровна Звягинцева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (923)135-79-78, e-mail: polina11-03@mail.ru

В статье частично решается задача оптимального согласования отдельных звеньев различной физической природы между собой, например, определяется оптимальный радиус кружка рассеяния объектива относительно геометрических размеров фоточувствительного элемента фотоприемника, обеспечивающий минимальную погрешность, также определения количества элементов относительно пятна, для которого будет производиться обработка.

Ключевые слова: моделирование, измерение, погрешность, согласование, оптико-электронная система.

OPTIMUM MATCHING OF THE PARAMETERS OF THE OPTOELECTRONIC CHANNEL MEASUREMENT SYSTEM ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMIZING THE DISTRIBUTED ERROR

Evgenij V. Grickevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (913)798-15-60, e-mail: gricew49@mail.ru

Polina A. Zviagintcheva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., lecturer of department of nanosystems and optoelectronics, tel. (923)135-79-78, e-mail: polina11-03@mail.ru

In article there is defined the problem of the optimum coordination of separate links of the various physical nature among themselves, for example partially there is solves the optimum radius of a circle of dispersion concerning the photodetectors photosensitive elements geometrical sizes which provides the minimum error also determine the number of elements relative to the spot for which you will be processing.

Key words: simulation, measurement, accuracy, harmonization, electro-optical system.

Определение координат точечных объектов в плоскости фотоприемной матрицы является базовой процедурой в различных практических приложениях использования оптико-электронных измерительных комплексов: координаторов, следящих устройств, систем наведения, геодезических приборов, прицелов

и т.д. Соответственно, возникает задача такого подбора параметров различных звеньев оптико-электронного тракта, сочетание которых приводило бы к минимизации погрешностей измерений. Причем, в состав контролируемых параметров должны быть включены не только параметры непосредственно прибора, но и параметры объекта измерения, а также канала передачи информации. Совокупный вклад всех факторов, влияющих на значение конечной погрешности, целесообразно было бы назвать распределенной погрешностью.

Схематично общий принцип измерения показан на рис. 1.

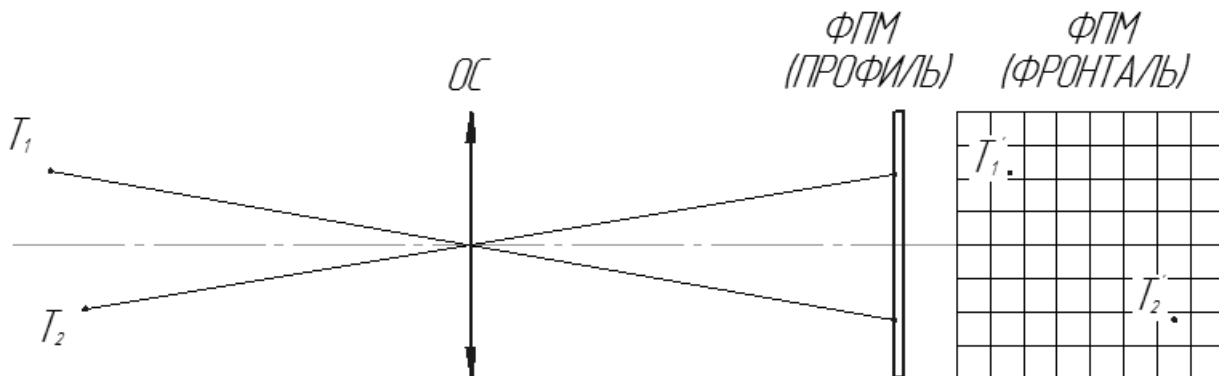


Рис. 1. Упрощенная схема измерения координат

На рис. 1 обозначены два точечных источника T_1 и T_2 , которых в реальности может быть больше. Оптическая система (ОС) создает изображение этих источников T_1' и T_2' в плоскости фотоприемной матрицы (ФПМ). Сигналы, снимаемые с выхода фотоприемника поступают в блок цифровой обработки (БЦО), где определяются координаты центров пятен рассеяния изображений точечных объектов. Очевидно, что на конечную погрешность измерения будут влиять следующие факторы:

- 1) нестабильность измеряемых объектов (например, вибрации, деформации);
- 2) турбулентность атмосферы;
- 3) аберрации и децентрирование оптической системы;
- 4) несоосность оптической системы и фотоприемника;
- 5) вибрации приемной части прибора;
- 6) шумовые флуктуации фотоприемника;
- 7) конечные размеры элементарных сенсоров матрицы;
- 8) погрешности применяемого метода расчета координат.

Особенностью рассматриваемой системы измерения является то, что некоторые из вышеприведенных факторов могут приводить как к уменьшению точности измерений, так и к ее увеличению.

В работе [1] показано, что увеличение радиуса кружка рассеяния объектива при определенных условиях приводит к уменьшению погрешности измерений. Но к таким же результатам могут привести, например, вибрация источника сигнала, вибрация приемной части прибора, расфокусировка объектива, дрожание изображения за счет турбулентности атмосферного канала и т.д. Практиче-

ски все эти факторы являются случайными и не могут быть точно учтены аналитическими методами. Поэтому при проектировании измерительных оптико-электронных систем необходимо использовать методы статистического моделирования, предусматривающие многократный процесс имитации прохождения информационного сигнала от источника возникновения до детерминирующего устройства (БЦО) при случайном распределении параметров звеньев, составляющих оптико-электронный тракт. Тогда целенаправленное изменение параметров звеньев прибора, контролируемых проектировщиком, может обеспечить их оптимальное согласование по критерию минимизации погрешности измерений.

На рис. 2 показано положение кружка рассеяния объектива в плоскости матричного анализатора, ниже приведен профиль распределения энергии в кружке по горизонтальной оси. Для упрощения этот профиль описывается гауссовой функцией. Распределение зарядовых пакетов (под осью X рис. 2), накопленных элементами матрицы, соответствует средним освещенностям каждого пикселя изображения. Координаты центра пятна рассеяния (X_u, Y_u) соответствуют точному положению точки в плоскости изображения.

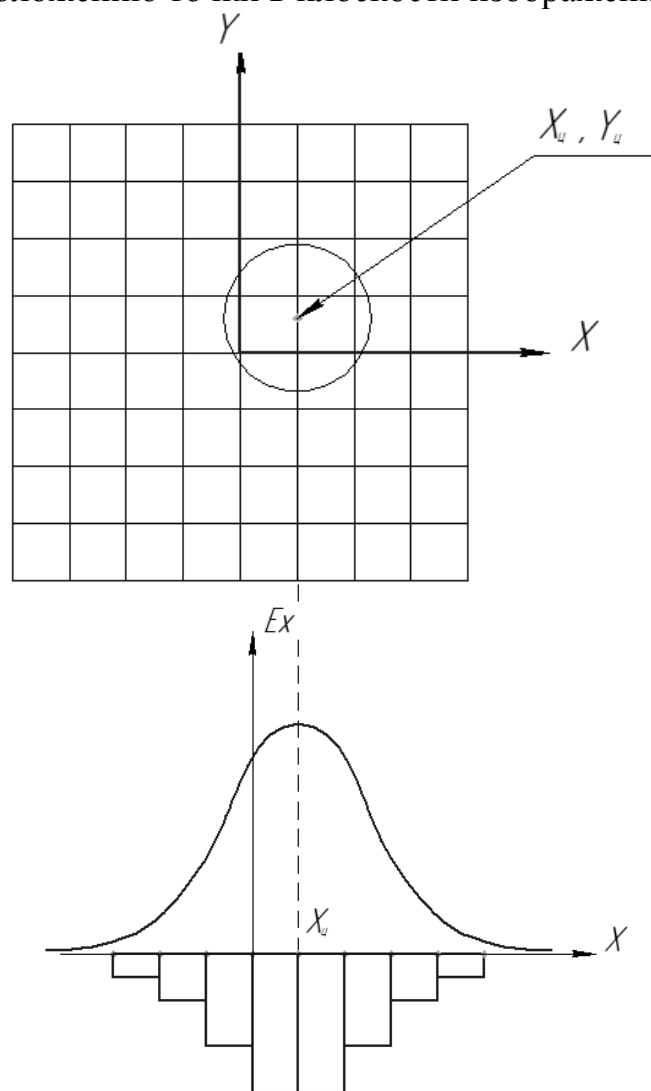


Рис. 2. Распределение освещенности на фоточувствительной площадке фотоприемника и формирование зарядового рельефа

Для определения этих координат можно использовать любой интерполяционный алгоритм, например, метод энергетического центра [1].

По дисбалансу зарядовых пакетов, накапливаемыми под элементами рассчитывается положение центра пятна. Если бы в системе не существовало шумов, то точность определения координат определялось бы погрешностями вычисления. Тогда размер кружка рассеяния, соответствующий трем элементам растра, обеспечивал бы эту точность полностью. Но реальный фотоприемник имеет шумы, которые приводят к перераспределению зарядов под элементами, что в конечном итоге, создает погрешность измерения Δx . Очевидно, что исходя из фундаментальных законов теории информации, появление неопределенности требует увеличения информационной выборки.

Увеличение количества отсчетов требует увеличения размеров пятна рассеяния. В то же время очевидно и другое – слишком большой кружок рассеяния приведет к нивелированию поэлементной разницы зарядовых пакетов относительно шумовых флуктуаций.

Возникновение самого пятна рассеяния не обязательно связано с искажениями, создаваемыми объективом, но и может быть следствием вибрацией и (или) турбулентности. Таким образом, оптимальное согласование параметров звеньев является результатом одновременного учета всех факторов, определяющих распределенную погрешность.

Пусть на фотоприемной матрице размером 240×240 пикселей проецируется пятно определенного радиуса. Для упрощения целесообразно выделить одну строку, включающую пиксель с максимальным сигналом.

Рассматриваемая имитационная модель позволяет определить зависимость конечной погрешности измерений центра пятна рассеяния от количества элементов выборки (дискретных отсчетов), участвующих в обработке. Очевидно, что нецелесообразно использовать отсчеты по всем пикселям фотоматрицы для определения координат, поскольку каждый пиксель содержит шумовую составляющую. Моделирование позволяет найти оптимальное количество обрабатываемых элементов.

На рис. 3 показаны результаты моделирования. Очевидно, что для конкретного набора параметров, используемого в рассматриваемом примере моделирования, оптимальное количество элементов, включаемых в обработку, составляет 10 отсчетов.

То есть, снижение погрешности произошло не за счет изменения конструктивных параметров прибора, а за счет простого изменения количества обрабатываемых элементов, что подтверждает эффективность выбранного направления исследований.

В ближайшее время планируется провести экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность применяемой имитационной модели. Кроме того, рассматривается вопрос о моделировании процесса фиксации параметров движения динамических объектов, включая их вибрационные характеристики. Такое моделирование потребует учета инерционных характеристик ФПМ.

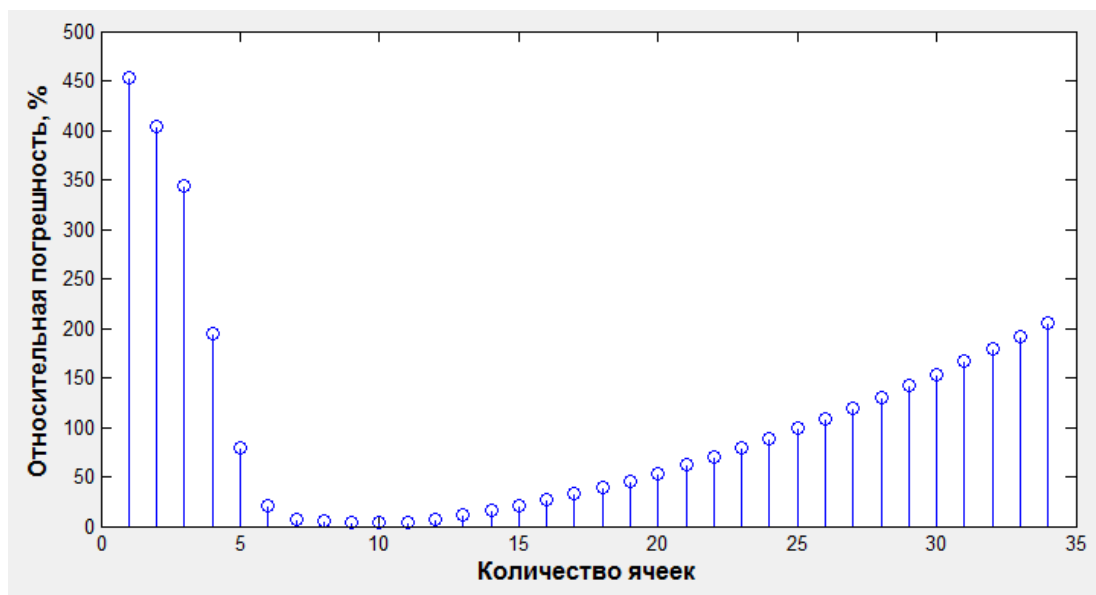


Рис. 35. Расчет оптимального количества элементов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А Разработка методики виртуальных испытаний оптико-электронной системы измерения координат // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 81–85.

© Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева, 2015

ДИСТАНЦИОННАЯ ГИПЕР- И УЛЬТРАСПЕКТРАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Георгий Георгиевич Горбунов

ОАО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», 199053, Россия, г. Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., 5, корп. 2, доктор технических наук, научный руководитель отделения, тел. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

Константин Никитич Чиков

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, тел. (812)232-14-01, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Обсуждаются возможности и перспективы применения современных видеоспектрометров в задачах дистанционного зондирования.

Ключевые слова: видеоспектрометр, дистанционное зондирование, оптико-электронная система, система наблюдения Земли.

REMOTE HYPERSPECTRAL AND ULTRASPECTRAL APPARATUS

George G. Gorbunov

Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation «Vavilov State Optical Institute», 199034, Russia, Saint Petersburg, 2 Birzhevaya line, Doctor of Technical Science, Research Head of Department, tel. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

Konstantin N. Tchikov

ITMO University, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., Associate professor, Associate professor of Department of Computer Systems Design and Security, tel. (812)305-89-47, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Discussion about opportunities and prospects of application modern imaging spectrometric in remote sensing tasks.

Key words: imaging spectrometer, remote sensing, electro-optic system, Earth observing system.

Развитие методов и технических средств высокоэффективного дистанционного зондирования (ДЗ) в оптическом диапазоне спектра возможно по двум основным направлениям. Первое связано с дальнейшим совершенствованием традиционных панхроматических (черно-белых и цветных) оптико-электронных приборов и систем (ОЭПС) наблюдения, разведки и обнаружения, информативность которых напрямую зависит от достижимого ими пространственного разрешения. Именно ОЭПС подобного типа пока еще преобладают в аппаратных комплексах ДЗ для получения интегральных и широкополосных спектральных (многоспектральных) изображений, по которым осуществляется картографирование и распознавание исследуемых объектов согласно топологическим признакам и особенностям [1].

Второе направление ориентируется на переход от распознавания по топологическим образам к распознаванию по спектрально-топологическим и спектральным образам. По сути, это означает переход к новым методам и технологиям решения задач распознавания в оптическом диапазоне, которые базируются на использовании дополнительной системы индивидуальных идентификационных признаков, обусловленных спецификой спектров отражения, излучения или поглощения природных и антропогенных объектов. К аппаратуре такого типа относятся видеоспектрометры (ВС) [2] и гиперспектральные сканеры (ГПС) [3].

В ВС излучение от узкой полосы на сканируемом объекте с помощью оптической системы с полихроматором разлагается в спектр на матричный приемник излучения. ГПС также включают в себя полихроматор, но помимо него снабжены еще и сканирующим оптико-механическим блоком, что позволяет разлагать в спектр на линейчатый фотоприемник излучение каждого пиксела от исследуемого объекта. Достоинства матричных ВС – компактность, небольшие масса (5–8 кг) и энергопотребление (20–40 Вт), интегрирование сигнала каждым пикселом матричного приемника в течение всего периода строки (что увеличивает отношение сигнал/шум), статическое состояние всех элементов, систем и блоков в процессе работы, недостаток – ограниченное поле обзора (до $\approx 40^\circ$). Достоинства ГПС – более широкий рабочий спектральный диапазон и большое поле обзора (до 90° и выше), недостатки – существенно бóльшие масса и энергопотребление, худшее спектральное разрешение [4].

Как и других ОЭПС наблюдения, пространственное разрешение ВС и ГПС по-прежнему характеризует их способность геометрически распознавать отдельные объекты или их детали в пространстве предметов (или в плоскости изображений) и определяется минимальными размерами исследуемого участка зондируемой поверхности, который распознается как отдельный элемент (пиксел). Спектральное же разрешение указывает на возможности улавливания «цветовых оттенков» в спектрах объектов, причем количество разносpekтральных информационных каналов внутри заданного рабочего диапазона длин волн задается размерностью фотоприемной матрицы. В результате формируется так называемый «информационный параллелепипед» («куб данных», «гиперкуб»), несущий об исследуемых объектах максимум сведений. При этом из получае-

мого набора монохроматических видеокадров потребитель может осуществить дискретную выборку только тех, которые необходимы ему для решения каждой конкретно стоящей задачи.

Немаловажно и то, что привлечение дополнительной спектрометрической информации в ряде случаев позволяет несколько снизить требования к пространственному разрешению [5], а это, в свою очередь, дает возможность, с одной стороны, уменьшить габариты и массу ОЭПС, а с другой – увеличить полосу захвата (размер кадра) при том же формате фотоприемника.

В зависимости от числа N рабочих каналов, ВС и ГПС разделяются, хотя и достаточно условно, на три класса [6]: 1) упоминавшиеся выше многоспектральные (multispectral) – системы с небольшим числом спектральных каналов (как правило, не более 20, но потенциально, в связи с быстрым совершенствованием элементной базы, до $N \approx 100$) и невысоким спектральным разрешением (спектральной шириной каналов) $\delta\lambda$ на рабочих длинах волн λ ($\delta\lambda \gtrsim \lambda/100$); 2) гиперспектральные (hyperspectral) – системы с числом каналов от $N \approx 100$ до $N \approx 1\,000$ и спектральным разрешением $\lambda/500 \lesssim \delta\lambda \lesssim \lambda/100$; 3) ультраспектральные (ultraspectral) – системы с числом каналов от $N \approx 1\,000$ и высоким спектральным разрешением ($\delta\lambda \lesssim \lambda/500$).

В многоспектральных приборах выбор тех или иных спектральных интервалов диктуется, в первую очередь, желанием усилить контрастность изображения в исследуемой (широкой) спектральной области, что часто желательно для распознавания ограниченного класса заданных объектов при заранее известных условиях наблюдения.

К основным задачам, решаемым гипер- и ультраспектральными системами, можно отнести: 1) поиск и выделение требуемых объектов из множества им подобных или обнаружение целей, размер которых меньше номинального размера пиксела; отображение их физических и химических свойств; 2) распознавание материалов, составление карт их географического распространения; 3) дифференциация материалов, обладающих сходными спектральными свойствами; 4) отображение особенностей поверхности, нераспознаваемых на других снимках.

Гиперспектральные системы помогают также выявить характерные особенности химического состава многих твердых и жидких образований, провести их идентификацию, а в некоторых случаях – и количественные измерения [7]. В частности, для силикатов наибольшую информативность несут спектральные интервалы в окрестностях длин волн $\lambda = 1,0$ мкм и $\lambda = 2,0$ мкм, для карбонатов – вблизи $\lambda = 2,35$ мкм и $\lambda = 2,5$ мкм, для окисей железа – в районе $\lambda = 1,0$ мкм и т. д.

Ультраспектральная аппаратура (именно с числом рабочих каналов от $N \approx 1\,000$ и более) существует пока еще только в проектах и единичных экземплярах, но она представляет будущее (и, вполне возможно, что недалекое) гиперспектральной технологии формирования изображений. Благодаря высокому

спектральному разрешению, с ее помощью становится возможным идентифицировать химический состав атмосферных составляющих и загрязнителей [8].

Актуальность дальнейшего развития и создания новых гипер- и ультра-спектрометрических систем обусловлена требованиями к повышению эффективности технических средств ДЗ для получения высококачественных монохроматических изображений объектов естественного и/или искусственного происхождения с одновременной интегральной визуализацией кадра.

Для эффективного функционирования такой аппаратуры требуется высокий уровень информационного обеспечения, а именно: радиометрическая и пространственная информация, позволяющая привязать тот же сюжет к топографической основе и аэрокосмическим снимкам высокого разрешения; мощные базы данных опорных спектров наблюдаемых сюжетов, фонов и целей; математические модели изменения спектрального состава исследуемых объектов, учитывающие индикатрисы излучения и отражения; математические модели спектрального пропускания и излучения атмосферы; алгоритмы и программное обеспечение преобразования общефизической видеоспектральной информации в целевую информацию (получение максимально полезной информации при минимальных затратах); специализированные тематические алгоритмы и программное обеспечение для перехода от целевой информации к тематической; математические модели, описывающие связи тематических параметров со спектральными параметрами целевой информации.

При всем этом нужно иметь в виду, что привычные методы определения корреляционных зависимостей имеющегося банка спектральных данных и зарегистрированной информации исследуемого спектро-геометрического изображения сцены уже не могут быть реализованы из-за огромных объемов информации, требующих многочасовой работы мощных ЭВМ. Отсюда становится очевидной важность выделения наиболее информативных участков зарегистрированных спектров, позволяющих значительно уменьшить число основных спектральных компонентов при их последующей идентификации, и методов сжатия спектральной информации при идентификации различных ландшафтных (фоноцелевых) ансамблей.

При существующих технологических возможностях развитие гипер- и ультраспектральной аппаратуры идет в направлении повышения ее энергетической чувствительности, расширения рабочего спектрального диапазона и улучшения спектрального разрешения, повышения точности калибровки по шкале длин волн, совершенствования методов и способов борьбы со «смазом» изображения, вызываемого движением носителя, увеличения быстродействия обработки и передачи данных, уменьшения массогабаритных параметров и унификации системообразующих узлов и модулей.

С некоторыми отечественными разработками видеоспектрометров для задач ДЗ можно ознакомиться в [4, 5, 8–20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральное космическое агентство. «Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gisa.ru/file/file766.doc> (дата обращения: 24.12.2014).
2. Van der Meer F. D, De Jong S. M. Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications. – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 403 p.
3. Петров С. Б., Смирнов А. П. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 5. – С. 82–93.
4. Груздев В. Н., Красавцев В. М., Марков А. В., Чиков К. Н., Шилин Б. В. Действующие образцы видеоспектрометров видимого–ближнего ИК диапазона для авиационных и космических носителей // Сборник трудов VIII Международной конференции «Прикладная оптика–2008». – СПб.: ОО им. Д. С. Рождественского, 2008. – Т. 1. – С. 352–362.
5. Горбунов Г. Г. Многоспектральная и гиперспектральная аппаратура, мировой уровень, состояние вопроса в России // Оптический вестник. – 2011. – № 132. – С. 5–6.
6. What is Imaging Spectroscopy (Hyperspectral Imaging)? [Электронный ресурс]. URL: <http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html> (дата обращения: 11.01.2015).
7. Schwartz C. R., Cederquist J. N., Eismann M. T. Target detection using IR spectral sensors // SPIE. – 1996. – Vol. 2819. – P. 182–194.
8. Афонин А. В., Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометрическая аппаратура на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 9. – С. 823–826.
9. Чиков К. Н., Гуд В. В., Красавцев В. М., Сандаков А. Н. Видеоспектрометры для экологического мониторинга // Известия вузов «Приборостроение». – 1998. – Т. 41, № 3. – С. 5–10.
10. Чиков К. Н., Панков Э. Д., Порфирьев Л. Ф., Гуд В. В., Красавцев В. М., Тимофеев А. Н. Особенности построения бортовых оптико-электронных систем спектрального мониторинга // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 9. – С. 60–67.
11. Горбунов Г. Г., Еськов Д. Н., Рябова Н. В., Серегин А. Г. Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 8. – С. 71–77.
12. Балтер Д. Б., Белов А. А., Воронцов Д. В., Ведешин Л. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов А. И., Родионова И. П., Федунин Е. Ю. Проект спутникового гиперспектрометра, предназначенного для малого космического аппарата // Исследования Земли из Космоса. – 2007. – № 2. – С. 43–55.
13. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 74–79.
14. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометры – новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 89–94.
15. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Некоторые особенности расчета и проектирования перспективных видеоспектральных систем для дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 2. – С. 164–169.
16. Орлов А. Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов // Автореф. канд. дис. – М.: ИКИ РАН, 2008. – 26 с.
17. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Статический фурье-спектрометр как основной элемент построения современного гиперспектрального видеоспектрометра // ГЕО-Сибирь-

2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 87–88.

18. Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Малогабаритный гиперспектральный датчик // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 89–94.

19. Горбунов Г. Г., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Скворцов Ю. С., Сокольский М. Н., Трегуб В. П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 75–82.

20. Архипов С. А., Ляхов А. Ю., Тарасов А. П. Работы ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования // Тезисы докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». – Красногорск, 2013. – С. 25–30.

© Г. Г. Горбунов, К. Н. Чиков, В. Б. Шлишевский, 2015

ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НАНОДРОНОВ

Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Рассчитана оптическая система, работающая в ультрафиолетовом и визуальном диапазонах спектра для получения комбинированного изображения, используя два спектральных диапазона одновременно.

Ключевые слова: ультрафиолетовый и визуальный диапазоны спектра, комбинированное изображение, двухспектральная оптическая система, решение задач наблюдения и разведки.

TWO SPECTRAL OPTICAL SYSTEM FOR NANODRONS

Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Senior lecturer, Department of Nanosystems and optics engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

The optical system working in the ultraviolet and visible wavelengths for obtaining the combined image is calculated, using two spectral ranges at the same time.

Key words: ultraviolet and visible spectral ranges, combined image, two spectral optical system, problem solving surveillance and reconnaissance.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для решения самых разных задач в интересах военных и гражданских пользователей - для оперативного проведения аэрофотосъемки, радиовещания, поисково-спасательных работ, разведки и наблюдения, поддержания правопорядка и т. д. БПЛА отличаются большим разнообразием, их конструкция и размеры зависят от задач, для которых они предназначаются.

В последнее время повысился интерес к разработке сверхлегких БПЛА для решения задач наблюдения и разведки (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Нанодроны:
а) PD-100 Black Hornet; б) вертолет-дрон Zano

Масса сверхлегких беспилотных летательных аппаратов достигает 50 – 100 г, поэтому объективы от общей массы должны занимать не более 1/4 веса аппарата, т.е. быть весом не более 15 - 25 г. Поэтому необходимо изготовление оптических систем из легких оптических материалов.

Рассчитанная оптическая система изготовлена из полистирола (ПС) - это один из легких полимеров (плотность – от 0,902 до 1,04 г/см³). Он прозрачен в ультрафиолете и видимом диапазонах спектра. Его показатель преломления 1,59 – 1,60 мкм.

Для расчета в ППП «Zemax» была выбрана многоспектральная зеркально-линзовая оптическая система (МЗЛО), выполненная из одного оптического материала, содержащая отражающие компоненты в виде линз Манжена и компенсаторы с положительной оптической силой в параллельном ходе лучей. В этом случае происходит частичная взаимная компенсация хроматических aberrаций между компонентами. Для более полной компенсации aberrаций в схему объектива после системы зеркал вводится дополнительный компенсатор из того же оптического материала (рис. 2).

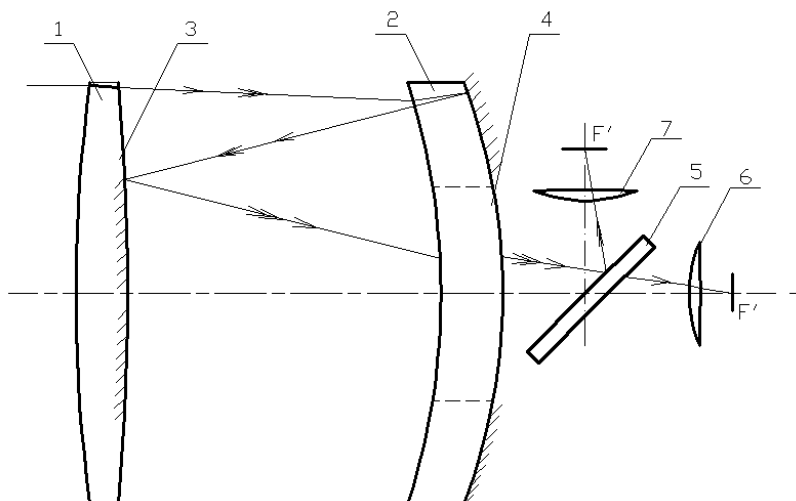


Рис. 2. Двухспектральная зеркально-линзовая система:

1 – положительная линза, выполненная в виде мениска; 2 – отрицательный мениск (зеркало Манжена); 3 - зеркало с наружным отражением, совмещенное со второй поверхностью положительной линзы 1; 4 - компенсатор aberrаций, выполненный расклеенным из отрицательной линзы, являющейся центральной частью отрицательного мениска 2; 5 – спектроделительное зеркало; 6 и 7 – линзы Пиацци-Смита

Предлагаемая оптическая система выполнена по патенту [1], теория расчета приведена в работах [2, 3]. Двухспектральная зеркально-линзовая система имеет единую оптическую ось, а разделение потока излучения по спектру производится перед фокальной плоскостью. Незначительная корректировка смещения фокальных плоскостей производится линзами Пиацци-Смита. Эта оптическая система позволяет получить изображение одного участка объекта в едином масштабе, но в разных спектральных диапазонах. Дальнейшая электронная

обработка изображений позволит получить комбинированное изображение ультрафиолетового и визуального диапазонов спектра.

Концентрация энергии в абберационном кружке для ультрафиолетового диапазона спектра ($\Delta\lambda = 0,3 - 0,486$ мкм) и для диапазона спектра ($\Delta\lambda = 0,486 - 0,555$ мкм) приведены на рис. 3.

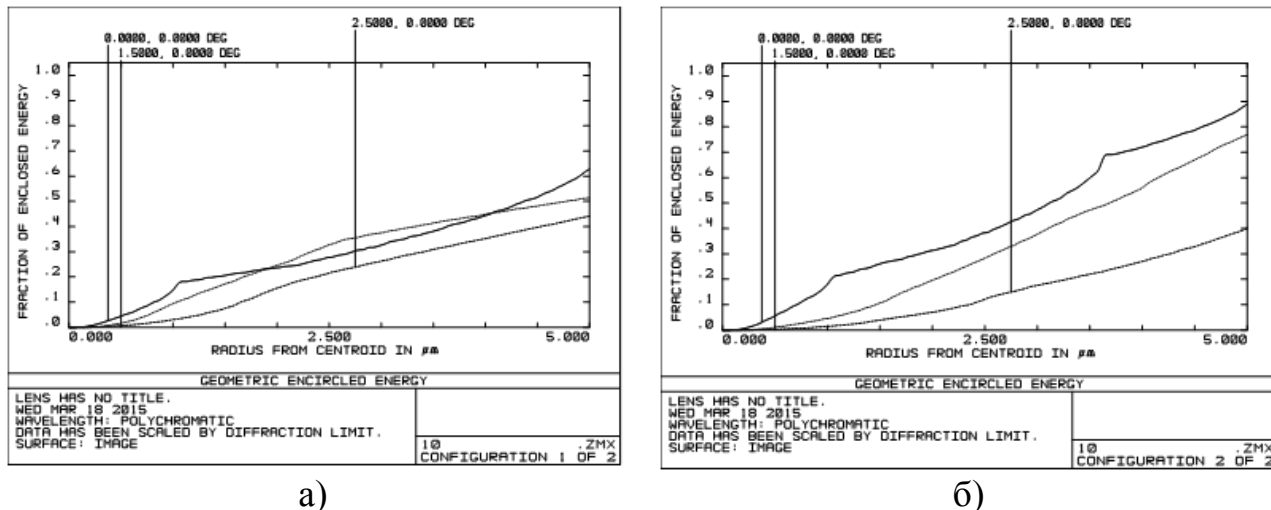


Рис. 3. Графики концентрации энергии в абберационном пятне:

а) ультрафиолетовый диапазон спектра (радиус пятна 5 мкм); б) диапазон спектра 0,486-0,555 мкм (радиус пятна 5 мкм)

Рассчитанная система имеет следующие характеристики: $f' = 10$ мм, $D/f' = 1:1,5$, размер пикселя 0,005 мм.

Результаты моделирования показывают принципиальную возможность разработки единой оптической системы для ультрафиолетового и визуального диапазонов спектра. Разработка современной оптической элементной базы позволяет совершенствовать военные и гражданские технологии для наблюдения и разведки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Пат. № 98072 Российской Федерации на полезную модель МПК⁴G02B 17/00; Двухспектральная зеркально-линзовая система; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – № 2010108755/22(012273); заявл. 09.03.10; опубл. 27.09.10.
2. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 65–69.
3. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – № 6. – С. 53–58.

© М. П. Егоренко, 2015

ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ФУРЬЕ-ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Георгий Георгиевич Горбунов

ОАО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», 199053, Россия, г. Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., 5, корпус 2, доктор технических наук, научный руководитель отделения, тел. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Обсуждаются возможности и проект создания новой высокоэффективной гиперспектральной аппаратуры для задач дистанционного зондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космос, фурье-видеоспектрометр, сравнительные характеристики.

THE PROJECT OF CREATION OF HYPERSPECTRAL IMAGING FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER FOR REMOTE SENSING

George G. Gorbunov

Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation «Vavilov State Optical Institute», 199034, Russia, Saint Petersburg, 2, Birzhevaya line, Doctor of Technical Science, Research Head of Department, tel. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Discussion of opportunities and new high hyperspectral facilities project for remote sensing tasks.

Key words: remote sensing, space, imaging fourier transform spectrometer, comparative characteristics.

В последние годы резко повысился и интерес потребителей к получению дистанционными методами сведений, способных охарактеризовать наблюдаемые объекты с максимальной достоверностью. Начиная с конца 80-х годов прошлого века, наблюдается устойчивый рост объема продаж на международном рынке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, и ведущие космические державы, прежде всего США, с помощью космических аппаратов (КА) двойного назначения активно наращивают съемки различных районов земной поверхности в коммерческих и военных целях [1]. Благодаря доступности методов, средств обработки, интерпретации и распространения космической информации и вторичных продуктов ДЗЗ, собственные КА ДЗЗ ус-

пешно разрабатывают и другие страны, не относившиеся ранее к «космическим» [2].

Становление ДЗЗ как единого междисциплинарного направления исследований в науке и технике обусловлено большой информативностью используемых методов, возможностью многократного наблюдения за обширными территориями. ДЗЗ позволяет выявлять новые процессы и явления, происходящие на поверхности Земли, изучать их динамику, но при этом значительно экономить время и средства, заменив наземные измерения различных параметров среды. Согласно некоторым данным NASA, по общей динамике развития ДЗЗ вышло на второе место после телекоммуникационного сектора среди всех направлений авиационной и космической индустрии [3].

Многообразие и постоянное усложнение решаемых научных и прикладных задач в рамках ДЗЗ, необходимость проведения анализа характеристик (сигнатур) объектов на сложных двух- и трехмерных фоновых полях, изменяющихся во времени и в пространстве, требуют внедрения новых информационных технологий и дальнейшего улучшения важнейших характеристик соответствующей аппаратуры, к которым относятся: пороговая чувствительность, рабочий интервал спектра электромагнитного излучения (ширина спектральной области съемки), пространственное разрешение (линейное разрешение на местности), ширина полосы обзора и размах полосы захвата в ее пределах, радиометрическое разрешение (число различимых градаций яркости или энергетическая чувствительность), оперативность получения и доставки видовой информации потребителю и т. п. Разумеется, конкретные требования к перечисленным параметрам существенно меняются в зависимости от поставленной задачи и условий фоноцелевой обстановки.

Целью обсуждаемого проекта является создание научной и технологической базы для разработки и изготовления высокоэффективной оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ, не имеющей в России аналогов – гиперспектральных фурье-видеоспектрометров (фурье-спектровизоров). Приборы этого типа включают в себя высокоточные оптические детали, просветляющие и светоделительные покрытия на широкую область спектра, прецизионную механику интерферометров, современные высокочувствительные малоинерционные матричные приемники излучения, специализированную высокоинформативную электронную аппаратуру управления и съема информации, разветвленную систему обработки данных [4–8].

Принципиально видеоспектрометры отличаются от аналогичных классических приборов спектрометрии и спектрорадиометрии тем, что помимо обычной спектральной информации – измерения спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) – позволяют получать высококачественные панорамные изображения исследуемого объекта во многих различных спектральных интервалах. При этом они не интегрируют СКЯ со всей поверхности объекта, а обеспечивают поэлементную регистрацию СКЯ отдельными пикселями матричного фотоприемника (МФП), что делает их наиболее пригодными для ресурсно-сырьевого

картирования и выявления объектов повышенной техногенной опасности, но в первую очередь – для военных применений.

В частности, предлагаемая к разработке гиперспектральная аппаратура может быть использована в следующих видах вооружения и военной техники:

- в танках и бронемашинах для обнаружения закамуфлированной военной техники и живой силы противника, определения наличия отравляющих веществ по мере продвижения в потенциально опасные районы;
- на самолетах и беспилотных летательных аппаратах для обнаружения скрытых объектов и для наведения высокоточного оружия (ВТО);
- на малых КА для картографирования и составления разведывательных данных о размещении скрытых объектов.

Кроме того, она может оказаться полезной для целей оперативной, долго-временной и полевой разведки.

К задачам, которые способны решаться при применении гиперспектральных фурье-спектровизоров, можно отнести:

- информационное обеспечение для ВТО (актуализация топоосновы, привязка сигнатур целей к топооснове);
- анализ фоноцелевой обстановки (предупреждение пусков ракет, идентификация движущихся целей);
- инженерная разведка (шахты ракет, блиндажи, газо- и нефтепроводы, электростанции, мосты, здания и сооружения);
- обнаружение замаскированных военно-технических средств (танки, машины, орудия, мины, ракетные установки и т. п.; идентификация сигнатур их выхлопных газов);
- тактическая разведка (разведка театра военных действий, обнаружение живой силы);
- химико-биологическая разведка (обнаружение и анализ зон химического и/или биологического поражения местности);
- военно-техническая инспекция (идентификация продуктов деятельности военно-промышленных предприятий и военных баз).

По основным техническим характеристикам предлагаемый к проработке макетный вариант фурье-спектровизора логично сравнить с гиперспектрометром, созданным специалистами НТЦ ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» и установленным на КА «Ресурс-П», запущенном в июне 2013 г. [9–11]:

Результаты сравнения свидетельствуют об убедительном превосходстве предлагаемого фурье-спектровизора абсолютно по всем параметрам.

Соединяя в себе высокоточную интерференционную оптику, прецизионную механику, требующие применения нанотехнологий матричные фотоприемники с максимальными частотами съема информации, вычислительную технику, способную посредством новейших алгоритмов быстро обрабатывать и передавать получаемые громадные объемы информации, фурье-спектровизор, по сути дела, является настоящим интегратором самых новейших высоких технологий. Следовательно, разработка подобной аппаратуры позволяет значительно повысить научную и технологическую базу тех организаций и предприятий, которые будут участвовать в ее освоении.

Основные характеристики	Предлагаемый гиперспектрометр	Гиперспектрометр КА «Ресурс-П»
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,3 – 15,0 (определяется чувствительностью МФП и разбивается на соответствующие поддиапазоны)	0,4 – 1,1 (разбит на три поддиапазона)
Число спектральных каналов	до 1 000	96 – 216
Спектральное разрешение, нм	до 1	5 – 10
Полоса захвата	до 1 000 разрешаемых пикселей	до 500 разрешаемых пикселей
Угловое разрешение	от 2" до 5'	10"
Тип спектрометрического блока	фурье-спектрометр	призмный полихроматор

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hardin R. W. Hyperspectral Imaging: How Much is Hype? // Photonic Spectr. – 1997. – No 7. – P. 82–92.
2. Волошин В. И., Драновский В. Й., Бушуев Э. И. Состояние, перспективы и проблемы рынка услуг дистанционного зондирования Земли из космоса. [Электронный ресурс]. URL: <http://space.com.ua/gateway/news.nsf/NewsALLR/A0468E97CA4B2448C2256C2B004D341A!open> (дата обращения: 06.01.2015).
3. Dorado-Munoz L. P., Messinger D. W., Ziemann A. Target Detection Using the Background Model from the Topological Anomaly Detection Algorithm // Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8743.
4. Горбунов Г. Г. Многоспектральная и гиперспектральная аппаратура, мировой уровень, состояние вопроса в России // Оптический вестник. – 2011. – № 132. – С. 5–6.
5. Горбунов Г. Г., Еськов Д. Н., Рябова Н. В., Серегин А. Г. Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 8. – С. 71–77.
6. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 74–79.
7. Афонин А. В., Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометрическая аппаратура на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 9. – С. 823–826.
8. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Статический фурье-спектрометр как основной элемент построения современного гиперспектрального видеоспектрометра // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 87–88.
9. Архипов С. А., Линько В. М., Бакланов А. И. Гиперспектральная аппаратура для КА «Ресурс-П» и перспективы ее модернизации // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социальном развитии общества». Самара, 2009. – С. 186.
10. Архипов С. А., Ляхов А. Ю., Тарасов А. П. Работы ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования // Тезисы докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск, 2013. – С. 25–30.
11. Федеральное космическое агентство. «Космический аппарат «Ресурс-П» выдал первые тестовые снимки». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.federalspace.ru/19661/> (дата обращения: 24.12.2014).

© Г. Г. Горбунов, В. Б. Шлишевский, 2015

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Лилия Александровна Евдокимова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: liliya_evdokimov@mail.ru

Александр Александрович Немогучев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: iviarius@mail.ru

Мария Викторовна Адольф

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: marysunny@mail.ru

Рассматриваются вопросы создания программно-технического комплекса для автоматизации исследований и проведения виртуальных испытаний современных некогерентных систем технического зрения широкого применения на базе матричных фотоприемников.

Ключевые слова: изображение, имитационное моделирование, цифровая обработка, система технического зрения, матричный фотоприемник.

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE-TEHNICAL COMPLEXES FOR SISTEMS OF RESEACH TECHNICAL VISION

Evgeny V. Gritskevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor at the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Liliya A. Evdokimova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: liliya_evdokimov@mail.ru

Alexander A. Nemoguchev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: iviarius@mail.ru

Maria V. Adolf

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: marysunny@mail.ru

Questions of creation of a software and hardware complex for automation of researches and carrying out virtual tests of modern incoherent systems of technical sight of broad application on the basis of matrix photodetectors are considered.

Key words: image, imitating modeling, digital processing, system of technical sight, matrix photodetector.

Оптико-электронные приборы (ОЭП) широко используются в повседневной жизни. За последние три десятилетия традиционные оптические средства измерения и контроля трансформировались в компьютеризированные контрольно-измерительные комплексы с элементами искусственного интеллекта, которые позволяют проводить селекцию объектов измерения по заранее заданным признакам без непосредственного участия оператора. Особенно актуально применение методов оптико-электронного контроля, измерений и наблюдения в условиях, когда присутствие человека в изучаемом процессе нежелательно или невозможно (опасная, агрессивная среда, подземные коммуникации, подводный мир, космическое пространство). Соответственно, возрастает потребность в развитии средств и методов анализа качества и эффективности применения ОЭП.

В настоящее время ведется разработка автоматизированного стенда для исследования ОЭП на базе матричных фотоприемников. Изображения с матрицы вводятся в компьютер для последующей цифровой обработки. Оператор наблюдает получаемую картину на экране монитора и задает требуемые параметры измерения. Сами же измерения выполняются автоматически. Искажения в изображении, возникающие за счет шумов и дискретности раstra, сглаживаются известными интерполяционными методами. Погрешность измерения при этом уменьшается в несколько раз, она перестает зависеть от субъективных факторов, время измерения сокращается многократно. Появляется возможность архивации результатов измерений вместе с картинками, к которым они относятся, для последующей статистической обработки.

Комплекс будет иметь модульный принцип построения, позволяющий быстро «складывать» (генерировать) на компьютере требуемую структуру прибора из дискретных блоков - моделей отдельных звеньев оптико-электронного тракта (ОЭТ) системы технического зрения (СТЗ). Модульность обеспечит возможность постоянного обновления используемой элементной базы по мере технологического прогресса. Базовая структура комплекса показана на рис. 1.

Ниже рассмотрено назначение каждого блока структуры.

Измерительные системы. Имитационное компьютерное моделирование ОЭП позволяет решать задачи согласования звеньев, имеющих различную фи-

зическую природу. Примером такого согласования может служить минимизация погрешностей измерения оптико-электронного координатора за счёт взаимной корректировки параметров фотоприемной матрицы и объектива. В модели генерируется входное воздействие в виде светящейся точки с заданными координатами. Рассчитывается распределение освещенности в плоскости матрицы. Моделируется процесс накопления зарядов в элементах фотоприемника с учетом внутренних шумов последнего. Затем проводится цифровая обработка матрицы отсчетов и определяются координаты объекта. Эти координаты сравниваются с заданными, и вычисляется погрешность измерения. С помощью рассматриваемой модели проводились исследования зависимости погрешности измерения от радиуса кружка рассеяния. Предполагается осуществить переход к многомерной параметрической оптимизации с учетом вибраций измеряемого объекта, измерительного прибора и инерционных характеристик (времени накопления) фотоприемного устройства.



Рис. 1. Базовая структура программно-информационного комплекса

Оптико-физические исследования. В настоящее время методики экспериментального определения качественных параметров и характеристик ОЭТ СТЗ основываются на вводе в оптический канал штриховых мир. Затем, по результатам измерений параметров выходных изображений этих мир осуществляется пересчет, например, в предельное разрешение системы, или в её частотно-контрастную характеристику (функцию передачи модуляции - ФПМ). Процесс измерения является трудоемким и, практически, не поддается автоматизации, требует применения достаточно габаритного стационарного лабораторного оборудования.

Предлагается создавать на входе прибора интерференционную картину, которую можно легко видоизменить. Особенностью таких входных сигналов является их априорная аналитическая детерминированность. Эти сигналы являются квазигармоническими, что позволяет достаточно просто отслеживать изменения и искажения гармоник в оптико-электронном тракте с целью последующего расчета объективных критериев качества испытуемого прибора в автоматическом режиме по результатам компьютерной обработки изображений.

Ввод реальных эталонных тестовых изображений в ЭВМ существенно расширит возможности имитационного компьютерного моделирования при автоматизированном проектировании ОЭС и комплексов. Имитационное компьютерное моделирование ОЭС предполагает первоначальную генерацию на входе модели виртуальных оптических сигналов – входных воздействий. Вопрос выбора входных виртуальных воздействий не является тривиальной задачей, так как всегда остаются сомнения в адекватности модельного представления этих воздействий реальным условиям работы исследуемого прибора, и, как следствие, в правдоподобности получаемых при моделировании результатов. Применение в качестве исходных сигналов физически реально существующих интерференционных картин снимает данную проблему, так как вид этих картин достаточно точно можно описать аналитически. Также снимается вопрос о проверке адекватности виртуальной модели своему материальному прототипу, поскольку установление адекватности проводится по одним и тем же входным сигналам (физическим и аналитическим).

Появляется возможность оптимальной компьютерной коррекции аппаратной (передаточной) функции моделируемого прибора по виду выходной картины, которая получается в процессе моделирования. Осуществляя внутри модели определенные преобразования с помощью процедур цифровой обработки изображений, можно добиться достижения требуемых критериев качества в выходных сигналах. Это обеспечит возможность при создании физических образцов вводить в приборы программируемые электронные компоненты, осуществляющие наперед заданную коррекцию передаточных свойств ОЭТ.

Создание автоматизированного стенда для проведения оптико-физических исследований позволит не только решить задачу автоматизации оптико-физических измерений, но и обеспечит базу для развития компьютерных методов «виртуальных» испытаний систем визуализации, их настройки, проверки и аттестации, получения метрологических характеристик и параметров.

По-сути, речь идет о создании виртуально-экспериментальной метамодели ОЭТ системы визуализации. Такая метамодель в дальнейшем может использоваться для исследования реальных систем, а так же их оптимизации. Процесс построения метамодели и её использования схематично показан на рис. 2.

Обучающая система и система информационно-поисковой поддержки предполагает наличие программных модулей обеспечивающих методологическое сопровождение процессов функционирования комплекса и включает в себя, кроме обучающих модулей, справочный материал, позволяющий оперативно получать информацию, требуемую при работе с комплексом.

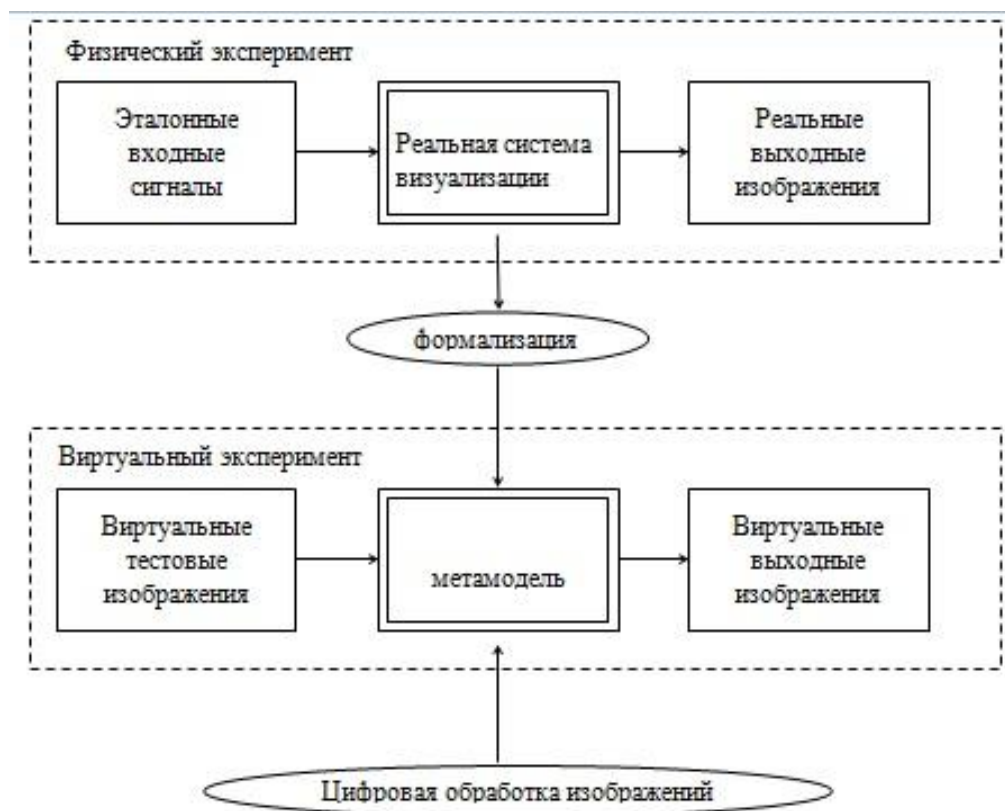


Рис. 2. Построение метамодели СТЗ

© Е. В. Грицкевич, Л. А. Евдокимова, А. А. Немогуцев, М. В. Адольф, 2015

МИКРОВОЛНОВОДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ЮНГА ДЛЯ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Михаил Михайлович Векшин

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптоэлектроники, тел. (861)219-95-66, e-mail: vek-shin@mail.ru

Валерий Александрович Никитин

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, кандидат технических наук, профессор кафедры оптоэлектроники, тел. (861)219-95-66, e-mail: nikitin@phys.kubsu.ru

Николай Андреевич Яковенко

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, доктор технических наук, зав. кафедрой оптоэлектроники, тел. (861)219-95-65, e-mail: yna@phys.kubsu.ru

Андрей Дмитриевич Кузьменко

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, магистрант кафедры оптоэлектроники, тел. (861)219-95-66, e-mail: kazak1990@inbox.ru

Разработан, изготовлен и исследован двухлучевой интегрально-оптический полностью монокристаллический интерферометр Юнга для датчиков химико-биологических реагентов и взаимодействий.

Ключевые слова: интегральная оптика, ионный обмен в стекле, оптические датчики.

INTEGRATED-OPTIC YOUNG INTERFEROMETER FOR SENSOR SYSTEMS

Mikhail M. Vekshin

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya St., associate professor of Optoelectronics Department, tel. (861)219-95-66, e-mail: vek-shin@mail.ru

Valery A. Nikitin

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya St., professor of Optoelectronics Department, tel. (861)219-95-66, e-mail: nikitin@phys.kubsu.ru

Nickolay A. Yakovenko

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya St., Ph. D., head of Optoelectronics Department, tel. (861)219-95 65, e-mail: nikitin@phys.kubsu.ru

Andrey D. Kuzmenko

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya St., master student of Optoelectronics Department, tel. (861)219-95 65, e-mail: kazak1990@inbox.ru

Two-beam integrated-optic fully monolithic interferometer for chemo-biological components and interactions has been designed, fabricated and studied.

Key words: integrated optics, ion exchange in glass, optical sensors.

Для создания высокочувствительной сенсорной системы с целью регистрации концентраций химико-биологических компонентов и взаимодействий может быть использован интегрально-оптический вариант интерферометра Юнга на основе ионообменных волноводов в стекле. В одном из вариантов своего построения сенсор представляет собой двулучевой волноводный интерферометр, в котором оптические волны на выходе обоих плеч интерферометра выводятся в широкий планарный волновод (рис. 1). Таким образом, на выходном торце интегрально-оптической схемы формируется интерференционная картина. Возможность влияния на разность хода оптического излучения между плечами интерферометра может быть использована для создания химико-биологического сенсора рефрактометрического типа. Конструкция интерферометра была впервые предложена в работе [1].

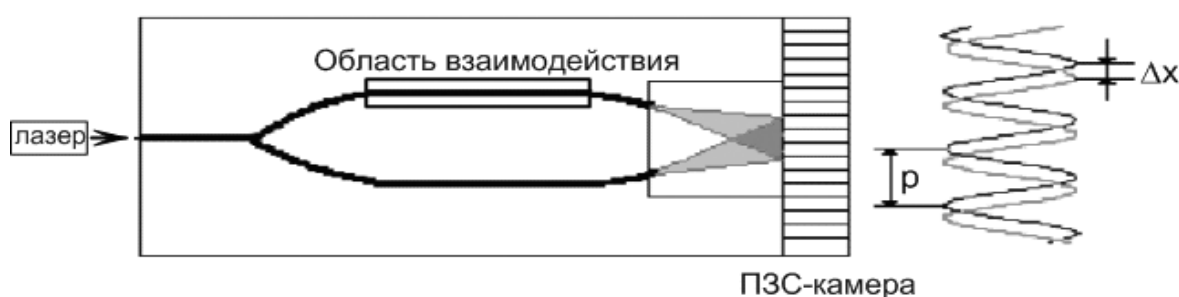


Рис. 1. Модифицированная схема датчика на основе волноводного интерферометра Юнга с выходным планарным волноводом

Целью работы является создание и исследование интегрально-оптического интерферометра Юнга в стекле К-8, полученного путем ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$.

В одном из выходных плеч интерферометра формируется область взаимодействия исследуемого вещества (раствора или газа) со специально подготовленной поверхностью волновода. Изменение показателя преломления покровной среды в этом плече интерферометра приводит к изменению разности фаз между интерферирующими волнами, что приводит к смещению полос интерференционной картины, имеющей некоторый период p . Путем Фурье-анализа интерференционной картины определяют этот сдвиг фазы, и по нему находят величину изменения показателя преломления покровной среды. Сдвиг полос интерференционной картины на некоторую величину Δx будет зафиксирован с помощью фотоприемной ПЗС-матрицы, пристыкованной к торцу интегрально-оптической схемы. Оптическая часть конструкции является интегральной, со всеми вытекающими из этого достоинствами, очень важными для обработки интерференционной картины, в первую очередь большей устойчивостью к воздействию различных паразитных вибраций и т.д.

Для разработки фотошаблона схемы использовали параметры одномодовых волноводов, полученных путем обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в стекле К-8. Приращение показателя преломления волновода относительно стеклянной подложки равно

0.0072, рабочая длина волны 0.63 мкм. Показатель преломления покровного слоя в активной области сенсора - 1.33-1.37, в остальной области (защитный слой тефлона) – 1.3. Основные задачи расчета оптимальной топологии схемы сводились к расчету энергетических потерь во входном разветвителе (от этого параметра зависит требуемая чувствительность электронной фотоприемной системы) и построению интерференционной картины взаимодействия направленных волн.

Для достижения наибольшей чувствительности сенсора область взаимодействия должна быть максимальных геометрических размеров, которые ограничиваются лишь технологическими факторами. В соответствии с расчетами, для изготовления волноводной схемы проект фотошаблон был построен со следующими параметрами: общая длина всей схемы - 40 мм; угол разветвления волноводов Y-разветвителя - $0,8^\circ$; угол наклона выходных канальных волноводов - $0,1^\circ$; длина планарного волновода 5 мм; ширина планарного волновода - 75 мкм. Ширина щелей в маске для проведения ионного обмена - 2 мкм. Для расчета параметров сенсора использовался метод распространяющегося пучка.

Фотошаблон для изготовления волноводного интерферометра был получен методом электронно-лучевой литографии. Волноводная схема была сформирована путем ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ в оптическом стекле К-8, погруженном в расплав соли KNO_3 . Температура расплава соли – 380°C , время диффузии было экспериментально подобрано для формирования одномодовых каналов. Оно составило 80 минут.

Исследование изготовленного интерферометра проводилось на основе специального стенда для измерения характеристик элементов интегральной оптики. Были измерены эффективные размеры поля моды одномодовых каналов, которые составили при длине волны оптического излучения 0,63 мкм 4×6 мкм вдоль вертикальной и горизонтальной оси, соответственно. Доля мощности в покровной среде, взятая от мощности, переносимой всей волноводной модой, составила 0,012%. Представляется целесообразным повысить эту величину в области взаимодействия и в противоположном плече интерферометра за счет нанесения дополнительного высокопреломляющего тонкого слоя диэлектрического материала. Это приведет к увеличению чувствительности датчика.

На рис. 2 показана интерференционная картина с торца выходного планарного волновода. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-208.

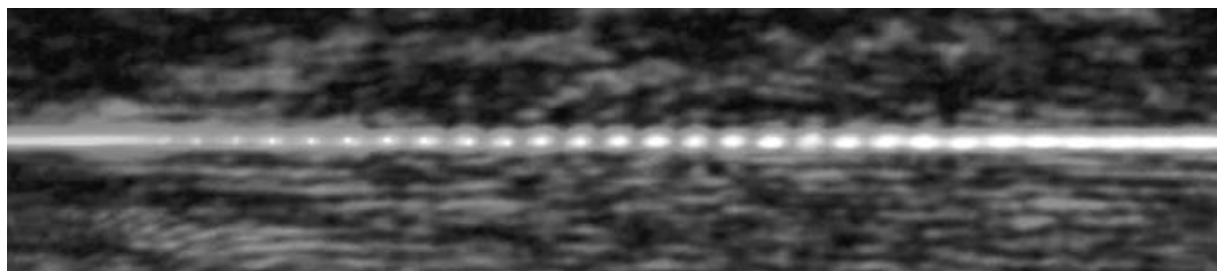


Рис. 2. Интерференционная картина на выходе планарного волновода

Таким образом, проведена разработка оптической схемы волноводного микрооптического сенсора на основе интерферометра Юнга, доведенная до стадии практического изготовления физической основы сенсора. Сенсоры на основе волноводных интерферометров Юнга обладают определенными преимуществами по сравнению с оптическими сенсорами на основе интерферометров Маха-Цендера, так как обладают более высокой чувствительностью и по сдвигу полос позволяют регистрировать направление изменения показателя преломления (в большую или меньшую сторону).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Helmers H., Greco P., Rustad R., Kherrat R., Bouvier G., Benech P. Performance of a compact, hybrid optical evanescent-wave sensor for chemical and biological applications// Applied Optics. 1996. – № 4. – P. 676–680.

© М. М. Векишин, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко, А. Д. Кузьменко, 2015

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ

Василий Александрович Чербаев

АО «Папилон», 456320, Россия, Челябинская обл., г. Миасс, пр. Макеева, 48, инженер-конструктор, e-mail: cherbaev@papillon.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Представлены результаты разработки проекционного объектива с телецентрическим ходом главных лучей в пространстве предметов и в пространстве изображений для проекции на наклонные поверхности.

Ключевые слова: телецентрический ход главных лучей в пространствах предметов и изображений, наклонная плоскость, проекционный объектив.

DEDICATED PROJECTION LENS

Vasiliy A. Cherbaev

Papillon AO, 456320, Russia, Chelyabinskaya Oblast, Miass, 48 Pr. Makeyeva, Designing Engineer, e-mail: cherbaev@papillon.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Professor at the nanosystems and optical devices department, tel. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Double (object-space and image-space) telecentric lens for projecting onto angled surfaces.

Key words: double telecentric lens, angled surface, projection lens.

Обеспечение минимизации конструктивного объема оптико-электронного прибора в ряде случаев достигается при условии, что предметная плоскость и (или) плоскость изображений должна размещаться таким образом, чтобы указанные плоскости образовывали с оптической осью проекционного объектива углы, отличные от прямого. Однако при наклонном размещении предметной плоскости и плоскости изображений относительно оптической оси объектива величина линейного увеличения будет различной для различных точек предмета, что приведет к искажению изображения и изменению оптического разрешения по полю объекта [1]. Если в качестве приёмника используется многоэлементный приёмник, например КМОП матрица, то при помощи заранее вычисленных коэффициентов для различных точек предмета можно цифровыми методами восстановить исходные пропорции объекта, но устранить снижение качества изображения не представляется возможным. С другой стороны, если проецируется физический объект, например сетка, то можно рассчитать и изготовить её такой формы, при которой компенсируются искажения, вносимые оп-

тической системой для наклонного объекта. Изготовление и контроль такой сетки является технологически более сложным по сравнению с типовыми шкалами и сетками, но, главный недостаток - расчёт справедлив только для определённого положения и наклона проецируемого объекта, и при изменении любого из указанных параметров потребуется расчёт и изготовление новой сетки, либо компенсация искажений будет неполной.

Проблемы, подобные описанным, встречаются при разработке оптико-электронных приборов регистрации трехмерного папиллярного узора пальцев, предназначенных для систем идентификации, контроля и безопасности.

Задачей данной работы является разработка проекционного объектива, обладающего специфическими свойствами:

- оптическая ось объектива должна составлять угол, отличный от прямого, с плоскостью предмета и с плоскостью изображений;
- линейное увеличение объектива не должно зависеть от положения предметной плоскости;
- ход главных лучей должен быть телецентрическим как в пространстве предметов, так и в пространстве изображений.

Такая совокупность специфических свойств может быть достигнута только в специализированном проекционном объективе. В основу создания его принципиальной схемы положено уникальное свойство телескопической системы: линейное увеличение афокальной системы не зависит от положения предмета. Реализация в афокальной системе телецентрической перспективы в пространстве предметов и в пространстве изображений позволяет обеспечить отсутствие геометрических искажений формы объекта в изображении наклонных объектов. Принципиальная оптическая схема специализированного проекционного объектива (афокального, дважды телецентрического, с наклонными плоскостями предмета и изображения) в тонких компонентах представлена на рис. 1.

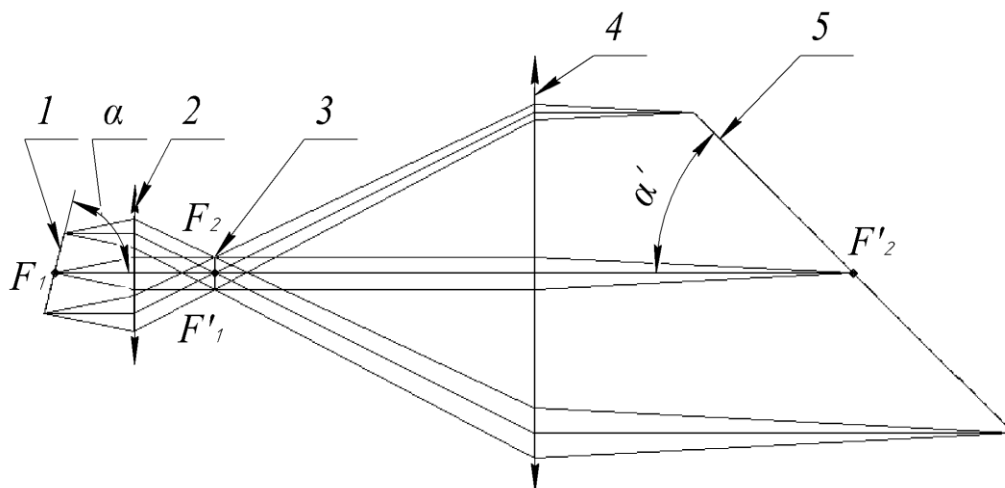


Рис. 1. Оптическая схема специализированного проекционного объектива:

- 1 – проецируемый шаблон; 2, 4 – первый и второй компоненты объектива; 3 – апертурная диафрагма; 5 – плоскость изображения; α – угол наклона плоскости предметов к оптической оси системы; α' – угол наклона плоскости изображения к оптической оси системы;
 F_1, F_2 – передние фокусы компонентов; F'_1, F'_2 – задние фокусы компонентов

Объектив состоит из двух компонентов 2 и 4. Телецентричность хода главных лучей в пространстве предметов и в пространстве изображений обеспечивается совмещением заднего фокуса первого компонента F'_1 с передним фокусом второго F_2 , и расположением в точке совмещенных фокусов центра апертурной диафрагмы 3. Эквивалентное фокусное расстояние такого проекционного объектива равно «бесконечности», т.е. он является афокальным, но работает «с конечного расстояния на конечное». Линейное увеличение афокальной системы определяется как отношение оптической силы первого компонента к оптической силе второго и, следовательно, одинаково для любого положения предмета. Угол наклона плоскости изображения 5 связан с углом наклона предмета (шаблона) 1 через угловое увеличение афокального объектива и также не зависит от положения предмета:

$$\beta = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} ; \quad \gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где β – линейное увеличение, крат;

φ_1 – оптическая сила первого компонента, дптр;

φ_2 – оптическая сила второго компонента, дптр;

γ – угловое увеличение, крат;

α – угол между шаблоном и оптической осью системы, градус;

α' – угол между плоскостью изображения и оптической осью системы, градус.

Техническая реализация афокального, дважды телецентрического объектива с наклонными плоскостями предмета и изображения осуществлена для конкретных технических характеристик, предполагающих проецирование шаблона заданного размера и формы на наклонную поверхность. Технические характеристики объектива представлены в табл.

Таблица

Технические характеристики специализированного проекционного объектива

Технические характеристики	Значение
Линейное увеличение, крат	-3,619
Угловое увеличение, крат	-0,276
Фокусное расстояние, мм	∞
Положение входного зрачка, мм	∞
Положение выходного зрачка, мм	∞
Числовая апертура в пространстве предметов	0,091
Числовая апертура в пространстве изображений	0,025
Задний фокальный отрезок $S'_{F'}$, мм	49,9
Расстояние от шаблона до плоскости проекции по оси системы, мм	131,4
Угол наклона плоскости проекции к оптической оси, град	45
Размер изображения на плоскости проекции, мм	25,4x38,1
Размер проецируемого шаблона, мм	7x7,7
Количество проецируемых периодов, шт	до 40
Рабочий спектральный диапазон, нм	525±10

Исходную компоновку объектива была решено осуществить по пропорциональной схеме [2], принимая во внимание следующие положительные свойства последней:

- строгое устранение нечётных аберраций – комы, дисторсии, хроматизма увеличения при значении линейного увеличения, равного -1 крат, и приближённое - при значениях линейного увеличения, отличного от указанного;
- удвоение относительного отверстия при значении линейного увеличения, равного -1 крат, или иное изменение относительного отверстия - при значениях линейного увеличения, отличного от указанного;
- возможность варьирования комы за счёт изменения величины пропорциональности без существенного изменения дисторсии и астигматизма системы;
- возможность отказа от коррекции нечётных аберраций в половинках (компонентах) симметричной или пропорциональной системы.

Согласно методу М. М. Русинова, наиболее простой базовой системой отдельного компонента может служить система вида Б(ок)+Б(ак) (по классификации [2]). Дополняя её коррекционным элементом для исправления кривизны поля и сохраняя телецентрический ход главных лучей, получаем формулу прототипа исходной системы:

$$2[K(кк)+Б(ак)Б(ак)] \text{ или } 2[K(таII)+Б(ак)Б(ак)],$$

где Б – базовый или силовой элемент;

К – коррекционный элемент;

а – аплантическая поверхность;

к – поверхность концентричная зрачку;

о – плоская поверхность;

таII – телеастигматическая линза второго рода.

В процессе оптимизации половинки объектива было выявлено, что соблюдение оптического дизайна по схеме К(кк)+Б(ак)Б(ак) при требуемом фокусном расстоянии не обеспечивает строгой телецентричности хода лучей в пространстве изображений в силу возникновения аберраций в зрачках. Для уменьшения последних было принято решение разделить оптическую силу одной из силовых линз на две. В результате силовые линзы были оптимизированы на минимум астигматизма, а радиусы коррекционного элемента остались строго концентричными центру апертурной диафрагмы. Полученная оптическая система первого компонента проекционного объектива представлена на рис. 2.

Второй компонент объектива был получен путём масштабирования первого. Из полученных компонентов была составлена исходная схема объектива и проведена ее итоговая оптимизация. Оптимизация системы проводилась с целью уменьшения среднеквадратических размеров пятен рассеяния в изображении точек по полю.

Качество изображения, формируемое разработанной оптической системой (рис. 3), можно оценить по данным, представленным на рис. 4–6. Кривизна поля изображения составляет около 0,6 мм, величина дисторсии – менее 1% для края поля зрения. Для пространственной частоты 1 период / мм, соответствующей

щей 40 периодам на всём изображении шаблона, значение коэффициента передачи контраста составляет не менее 0,95 для всех точек изображения.

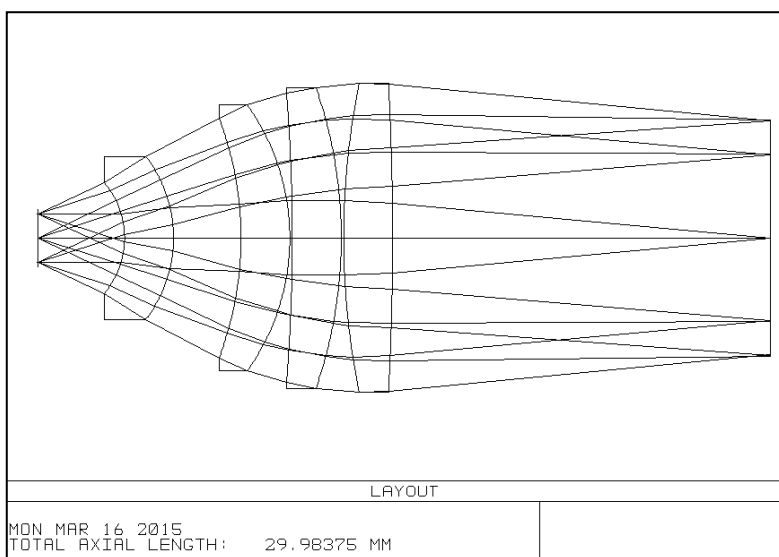


Рис. 2. Оптическая схема первого компонента проекционного объектива

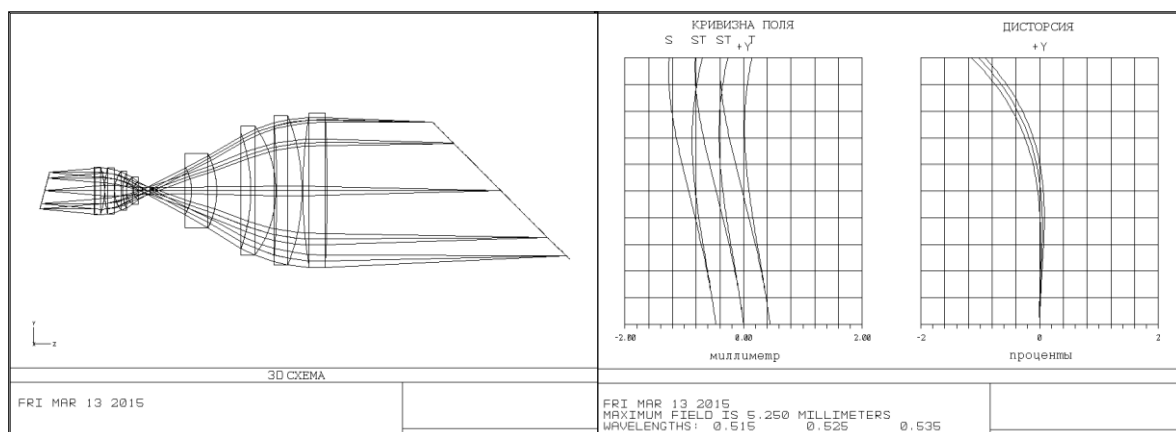


Рис. 3. Схема специализированного проекционного объектива с ходом лучей

Рис. 4. Графики кривизны поля и дисторсии

Наибольший среднеквадратический диаметр пятен рассеяния - 60 мкм - имеет место для верхней точки изображения (рис. 3), для остальных точек поля указанный диаметр не превышает 40 мкм.

По сравнению с известными афокальными объективами для регистрации кожного узора с телецентрическим ходом лучей, например [3], в разработанном объективе линейное увеличение по абсолютной величине превышает 1 крат; наклон главного луча для крайней точки предмета относительно оптической оси в зоне апертурной диафрагмы составляет примерно 25 градусов (против 13 градусов в [3]), что, при одинаковом поле зрения, приводит к двукратному уменьшению габаритных размеров разработанного объектива.

В заключении отмечается, что применение афокальных, дважды телецентрических систем оправдано, если необходимо получить изображение с наклонной поверхности или спроецировать изображение на наклонную поверх-

ность и при этом обеспечить постоянство оптического разрешения по всему полю изображения. Применение таких систем позволяет при зафиксированном положении измерительного прибора проводить измерения при значительном изменении положения предмета, при этом перефокусировка не приведёт к изменению масштаба изображения. Поэтому при послойном фотографировании какого-либо рельефного объекта можно осуществлять перефокусировку перемещением только объектива.

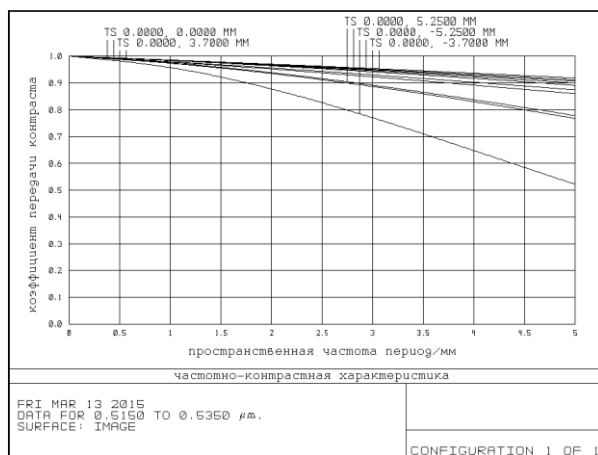


Рис. 5. Частотно-контрастная характеристика объектива

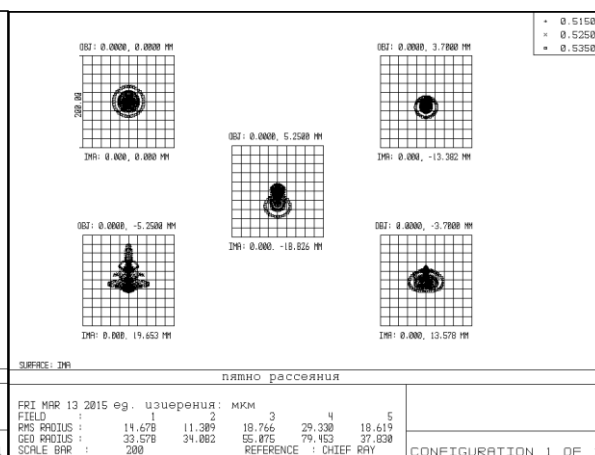


Рис. 6. Размер пятен рассеяния для различных точек поля

Вместе с тем, применение афокальных, дважды телецентрических проекционных объективов позволяет упростить другие модули приборов, а именно:

- в программном – исключить компенсацию искажений изображения;
- в электронном – отказаться от дорогостоящих узлов, формирующих проецируемый шаблон;
- в механическом – упрощает юстировку системы.

Разработка специализированного проекционного объектива – афокального, дважды телецентрического, с наклонными плоскостями предмета и изображения – выполнена для оптико-электронного прибора, предназначенного для получения трёхмерного изображения папиллярного узора пальца. Разработка прибора ведётся предприятием АО «Папилон», г. Миас. В настоящее время разработана техническая документация и осуществляется техническая подготовка для изготовления объектива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов [Текст] / В. Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1966. – 564 с.
2. Русинов М. М. Техническая оптика: учебное пособие. 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 488 с.
3. Пат. 2261475 Российская Федерация МПК G06K 9/00, A61D 5/117; Оптическое устройство для сканирования кожного рисунка. [Текст] / Н. Г. Дроздов; заявитель и патентообладатель Н. Г. Дроздов; заявл. 18.09.2003; опубл. 27.09.2005. – Бюл. №27. – 19 с. : ил.

© В. А. Чербаев, Т. Н. Хацевич, 2015

ПАНОРАМНЫЕ СИСТЕМЫ КРУГОВОГО ОБЗОРА

Денис Николаевич Шевченко

Университет ИТМО, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, студент-магистрант, тел. (906)229-74-80, e-mail: shevchenkodenis11@gmail.com

Ольга Васильевна Багдасарова

Университет ИТМО, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики, тел. (911)812-26-46, e-mail: balexol@yandex.ru

Александр Аванесович Багдасаров

ОАО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», 199053, Россия, г. Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., 5, корпус 2, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (951)672-33-66, e-mail: balexol@yandex.ru

В статье рассмотрены различные конструкции панорамных систем кругового обзора, разработанные за последние 50 лет. Выявлены возможности разработки подобных систем с улучшенными параметрами и применения их в новых областях.

Ключевые слова: панорама, панорамные системы кругового обзора, круговой обзор, оптические системы.

PANORAMIC 360-DEGREE IMAGING APPARATUS

Denis N. Shevchenko

ITMO University, 197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr., 49, master, tel. (906)229-74-80, e-mail: shevchenkodenis11@gmail.com

Olga V. Bagdasarova

ITMO University, 197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr., 49, Candidate of Engineering Science, Associate Professor at the Department of Applied and Computer Optics, tel. (911)812-26-46, e-mail: balexol@yandex.ru

Alexander A. Bagdasarov

Public Limited Company «State Optical Institute named after S. I. Vavilov», Russia, Saint-Petersburg, Kadetskaja line, 5, building 2, Candidate of Engineering Science, Senior Scientist, tel. (951)672-33-66, e-mail: balexol@yandex.ru

The article considers various designs panoramic systems developed over the last 50 years. Revealed the possibility of developing such systems with improved parameters and their application in new areas.

Key words: panorama, panoramic 360-degree imaging apparatus, 360-degree, optical system.

Как известно, фото и видеооптические системы воспроизведения панорамной картины строятся по следующим принципам:

- Системы с составным угловым полем:

а) многоканальные фотоустройства, в которых широкое угловое поле достигается методом склейки («сшивания») из нескольких фотографий (физически или при компьютерной обработке), сделанных последовательно так, чтобы границы каждого следующего кадра накладывались на предыдущий. Таким образом получают панорамы статичных сцен. На рис. 1, предоставлена одна из многих панорамная фотокамера «Горизонт D-L3», совместного производства России и итальянской компании Silvestri. Камера «сшивает» панорамы при помощи поставляемого в комплекте программного обеспечения Silvestri. Полученные одновременно три изображения после обработки объединяются в один снимок с углом обзора по вертикали 45° , а по горизонтали 120° .



Рис. 1. Цифровая фотокамера «Горизонт D-L3»

б) многоканальные системы видеонаблюдения, обеспечивающие круговой обзор в масштабе реального времени. Система видеонаблюдения, представленная на рис. 2, может обеспечивать воспроизведение как скомпонованной единой панорамной картины, так и посекторной в зависимости от потребностей пользователя.

Такие системы получили широкое применение в комплексах обеспечения безопасности как в стационарном, так и в мобильном вариантах при проведении массовых мероприятий, на транспорте, в промышленности, в быту. при мониторинге акваторий и пожароопасных пространств, для осуществления безопасности полётов при установке системы совместно, с РЛС кругового обзора и т.д.

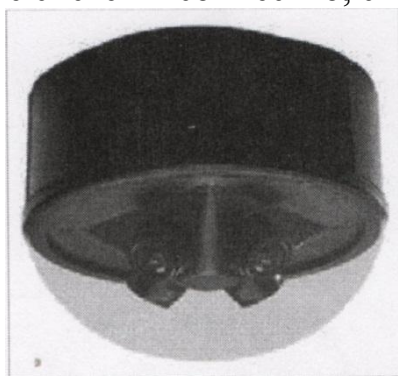


Рис. 2. Многообъективная система видеонаблюдения Arecont Vision AV8365 – 8 Megapixel 360 Degree Panoramic H.264 IP Camera

Следует отметить устойчивую тенденцию комплектования современных автомобилей бизнес-класса, автомобилей-внедорожников (а в последнее время и автомобилей эконом-класса) транснациональных компаний Toyota, Nissan, Ford и др. системами видеонаблюдения и видеорегистрации по периметру автомобиля тремя-пятью видеокамерами. Камеры просматривают невидимые участки дороги для избежания потенциально опасных ситуаций на резких подъёмах, спусках, крутых поворотах, при заднем ходе, для контроля «слепых» зон при маневрировании и парковке, для охраны периметра и регистрации дорожной ситуации. Картина видеорегистрации при этом воспроизводится на центральном дисплее на приборной панели автомобиля и регулируется многофункциональным переключателем на рулевом колесе.

- Системы с механическим сканированием:

а) фотоаппараты с вращающимися в горизонтальной плоскости (вдоль длинной стороны кадра) объективом вокруг оси, перпендикулярной оптической оси аппарата и проходящей через «узловую» точку оптической системы – точку, вращение объектива вокруг которой не приводит к изменению положения изображения рассматриваемого объекта на светочувствительной поверхности.

б) фото и видеосистемы с вращающимся корпусом. В отличие от аппаратов с поворотным объективом угол сканирования здесь может достигать 360 градусов (и более). Скорость вращения от 5 до 120 угловых градусов в секунду.

-Системы с панорамной оптикой, обеспечивающей панорамирование в пределах 360° и, как правило, представляющие собой зеркально-линзовые композиции. Это может быть, например, любая фото или видеокамера дополненная зеркальной насадкой и линзовым адаптером для согласования с оптикой самой камеры. Пример такой системы представлен на рис. 3 и на рис. 4.

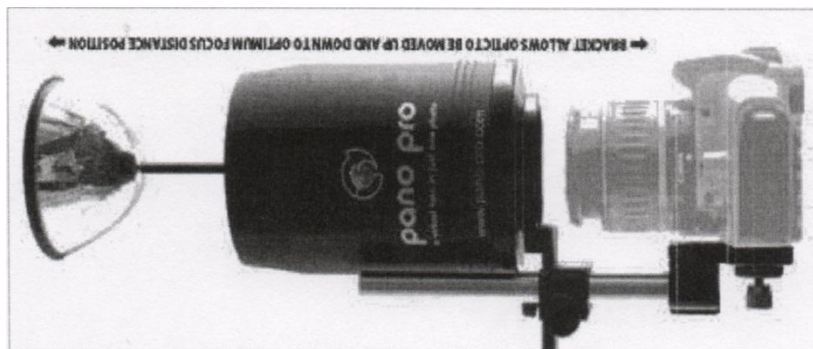


Рис. 3. Насадка кругового обзора для компоновки цифровых фотокамер

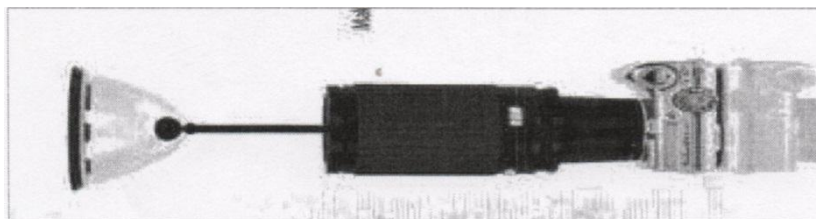


Рис. 4. Насадка кругового обзора для компоновки цифровых фотокамер

Данная американская разработка способная обеспечить круговой обзор и фотосъемку объектов в вертикальном направлении в пространстве предметов в пределах $52,5^\circ$ выше горизонта и $62,5^\circ$ ниже горизонта, была создана в XXI столетии.

Зеркальная поверхность насадки выполнена в виде асферики высокого порядка. Насадка имеет 12 модификаций для компоновки различных моделей цифровых камер.

В подобных системах при угловом поле в вертикальном направлении в пространстве предметов, охватывающем одновременно области, как ниже так и выше горизонта, оптическое изображение не свободно от дисторсионных искажений, как правило, достигающих значительных величин. В целом же аппаратно-программный комплекс системы обеспечивает декодирование панорамной картины в качественный прямоугольный снимок.

Если же рассматривать в подобной по составу композиции только угловое поле ниже линии горизонта (достигающее 80°), то дисторсия может не превышать 1%. Некоторые линзовые оптические элементы в таких системах могут содержать асферические поверхности высокого порядка. Подобные системы целесообразно размещать под потолком для наблюдения нижележащего пространства с использованием ССD-матриц со средней разрешающей способностью (640-480 элементов)

Напомним, что круговой обзор, предусматривающий обзор пространства предметов по азимуту в 360° , может быть сформирован в двух форматах: цилиндрическом и сферическом. В зависимости от этого разрабатывается свой инструментарий для получения изображения, его обработки, декодирования.

В свете рассматриваемой темы круговой обзор будет связан с цилиндрическим форматом, где обзор по углу места осуществляется в пределах от нескольких градусов до нескольких десятков градусов относительно линии горизонта. Изображение получается в виде кольца, ширина которого зависит от конструкции объектива и углового поля в пространстве предметов по вертикали.

Кольцевое изображение декодируется в прямоугольный формат.

В настоящее время в ГОИ разработан вариант объектива кругового обзора с полями по вертикали до $79,5^\circ$. Относительное отверстие 1:3,5. Фокусное расстояние 1,35мм. Спектральный диапазон 495 -656 нм. Проекция на матрицу 1/1,8". Качество изображения по разрешающей способности достаточно для работы с 8-мегапиксельными матрицами.

Декодировка кольцевого формата в прямоугольный образ позволит получать высококачественные неискаженные изображения.

Целью дальнейшей работы является исследование форм однозеркальных головных насадок для панорамных систем кругового обзора и выявления таких решений, которые обеспечивали бы в совокупности с линзовой составляющей в единой композиции приемлемое качество изображения с минимальными дисторсионными искажениями в пределах поля, близкого к полусфере.

© Д. Н. Шевченко, О. В. Багдасарова, А. А. Багдасаров, 2015

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИЦЕЛЬНЫХ СЕТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ И НОЧНЫХ ПРИЦЕЛОВ

Алексей Анатольевич Топорков

АО «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник конструкторского отдела, тел. (383)236-77-52, e-mail: toporkovAA@ponpz.ru

Иван Сергеевич Бутримов

Сибирский филиал Федерального казенного учреждения «Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России, старший научный сотрудник, 630055, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 3, тел. (383)332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

В статье рассматриваются различные типы сеток оптических и ночных прицелов, пути повышения точности стрельбы из стрелкового оружия за счет применения оптимальных прицельных сеток.

Ключевые слова: оптический прицел, сетка прицела, стрелковое оружие.

IMPROVING AIMED GRIDS OF ADVANCED OPTICAL AND NIGHT SIGHTS

Alexei A. Toporkov

JSC «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Russia, Novosibirsk, D. Kovalchuk st., 179\2, head of design Department, tel. (383)236-77-52, e-mail: toporkovAA@ponpz.ru

Ivan S. Butrimov

Siberian branch of Federal government institution scientific and production association special equipment and telecoms of the Ministry of the internal affairs of the Russian Federation, 630055, Russia, Novosibirsk, Kutateladze, 3, senior fellow, tel. (383)332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

This paper discusses various types of telescopic sight and night scope reticles, ways to increase small arms shooting accuracy by means of using optimum reticle.

Key words: telescopic sight, reticle, small arms.

При выборе оптического прицела для стрелкового оружия особое внимание обращается на вид поля зрения, форму и размер прицельной сетки. Идеальной прицельной сетки не существует. Каждый стрелок предъявляет к прицелу свои индивидуальные требования. На выбор прицельной сетки влияют ряд объективных и субъективных факторов, например:

- ситуационная обстановка в которой планируется использовать оружие с прицелом на охоте, на соревнованиях, в бою;
- дальность эффективной стрельбы оружия, оснащаемого прицелом;
- уровень подготовки стрелка и его предпочтения;
- предложения рынка, реклама, звучность названия сетки, мода...

Рассмотрим строение сетки оптического прицела. В общем случае она состоит из: прицельных знаков, вспомогательных линий и дополнительных изображений.

Прицельный знак – основной элемент прицельной сетки. Он имеет характерную точку, которая при прицеливании совмещается с целью, например: центр перекрестия, вершина угольника, конец вертикального штриха, центр окружности. Характерные типы прицельного знака представлены на рис. 1.

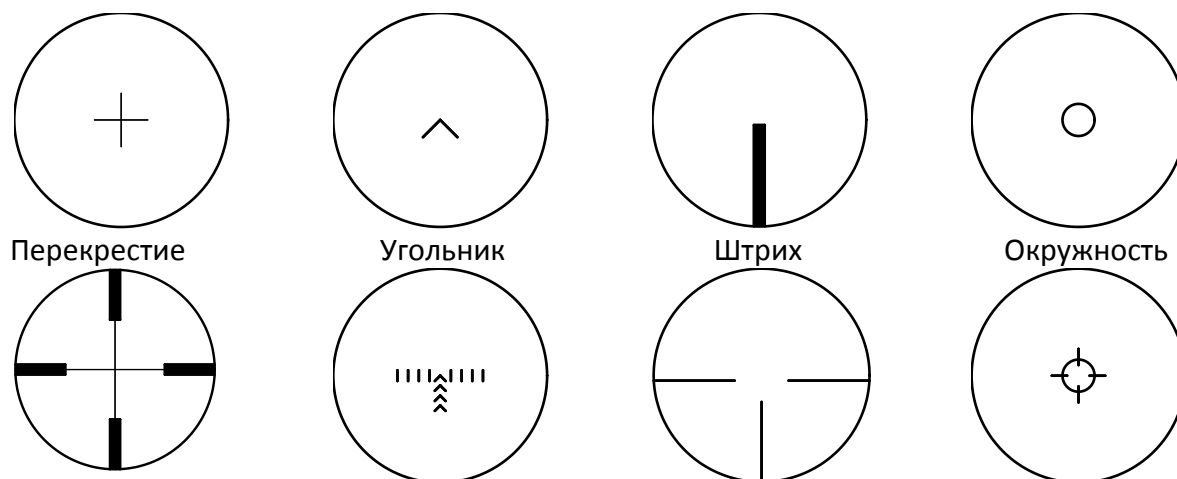


Рис. 1. Типы прицельного знака

Наведение прицельного знака на цель обозначает наведение на цель его характерной точки. Процесс прицеливания заключается в совмещении изображения прицельного знака с точкой прицеливания. Точка прицеливания может не совпадать с целью. Определение верного положения точки прицеливания это основная задача решаемая стрелком при подготовке к выстрелу.

Важно положение прицельного знака в поле зрения прицела. В центре поля зрения, классических оптических систем находится зона наилучшего качества изображения, следовательно, размещение прицельного знака в данной области наиболее предпочтительно.

Часть современных прицелов, в которых ввод углов прицеливания осуществляется путем разворота всего прицела, либо его объектива, в полной мере удовлетворяют данному требованию. Классические прицелы, в которых ввод углов прицеливания осуществляется перемещением сетки, либо прицелы с неподвижной сеткой, в которых ввод углов прицеливания обеспечивается нанесением на одной сетке нескольких прицельных знаков, используют не только центральную часть поля зрения, но и его периферию. Неподвижная сетка перемещается только в процессе согласования прицела с оружием. Такая сетка обеспечивает прицельную стрельбу во всем диапазоне углов прицеливания и боковых поправок за счет нанесения большого количества прицельных знаков, которые затеяют поле зрения прицела, мешают наблюдению цели, позволяют прицелиться неверно выбранной точкой. В то же время она позволяет выбрать угол прицеливания, не отрывая глаз от окуляра, дает возможность кор-

ректировать угол прицеливания по результату стрельбы, не изменяя прикладку. Данные преимущества сетки ведут к увеличению темпа стрельбы, что, в ряде случаев, имеет определяющее значение.

Необходимо отметить, что прицельные знаки на сетке располагаются в соответствии с определенной закономерностью, например в соответствии с баллистикой конкретного оружия и боеприпаса. В них вертикальный угол (угол прицеливания) пропорционален дальности до цели, такие сетки принято называть баллистическими. Внешний вид баллистической сетки представлен на рис. 2.

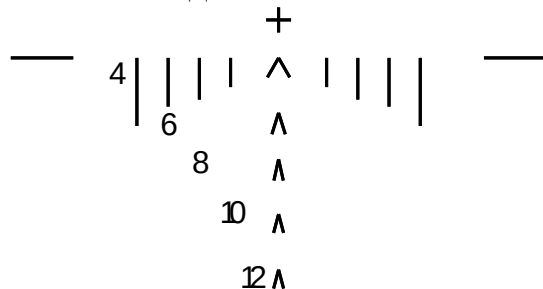


Рис. 2. Внешний вид баллистической сетки

Баллистические сетки используют в прицелах, разработанных для оснащения винтовок изготовленных в большом количестве, применяемых только со стандартным боеприпасом, баллистика которого хорошо изучена. Боковые поправки, для компенсации влияния бокового ветра или движения цели, в баллистических сетках вполне возможно градуировать в единицах скорости, например, метрах в секунду или километрах в час. Работа с баллистическими сетками достаточно проста, интуитивно понятна, почти не требует напряжения памяти.

Сетки, на которых прицельные знаки размещены в поле зрения с постоянным угловым шагом, принято называть по величине шага, например: сетка в тысячных дистанции, миллирадианная сетка (Mil Dot) или сетка в угловых минутах (МОА). Они универсальны, позволяют использовать прицел последовательно на нескольких различных образцах оружия, позволяют применять на одном образце различные типы боеприпасов. Использование таких сеток предполагает высокий уровень подготовки стрелка, знание им законов внешней баллистики, хорошую память. Для облегчения определения углов прицеливания целесообразно использовать таблицы стрельб или применять баллистический калькулятор. Внешний вид сеток Mil Dot и МОА представлен на рис. 3.

Вспомогательные линии, вертикальные и горизонтальные, позволяют ориентировать систему прицел-оружие в пространстве по линии горизонта либо по местным предметам, имеющим выраженные вертикальные или горизонтальные линии. Стабильное и точное горизонтирование оружия значительно увеличивает результативность стрельбы.

Дополнительные изображения, располагаемые в поле зрения прицела, выполняют сервисные функции и в процессе прицеливания участвуют опосредованно. Во многих оптических прицелах нанесены дальномерные шкалы, они позволяют измерить дальность до цели, имеющей известный размер по высоте

или по ширине. Типичные дальномерные шкалы и их характерные особенности представлены в табл.

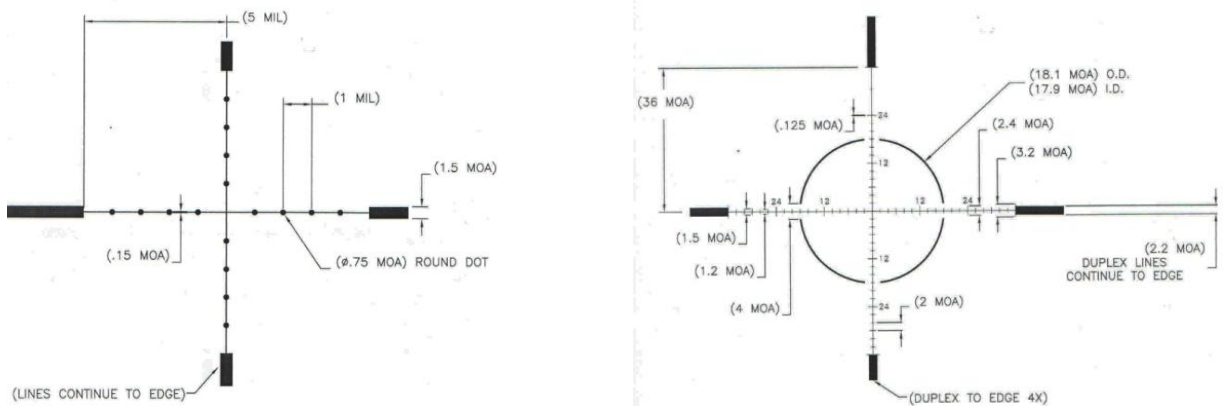


Рис. 3. Внешний вид сеток Mil Dot и MOA

Таблица

Типичные дальномерные шкалы и их характерные особенности

Внешний вид дальномерной сетки	Характерные особенности
— 100 — 200 — 400 — 800 — 0	Вертикальная шкала занимает мало места в поле зрения, не затеняет сетку, но не позволяет разбивать дистанцию на короткие отрезки, так как при увеличении диапазона измерения или уменьшении шага измерения линии на шкале начинают сливаться. Базовый размер – высота цели
	Наклонная шкала (улитка), самая распространенная, имеет один недостаток – занимая много места, затеняет сетку. Базовый размер – высота цели
— — 100 — — 200 — — 400 — — 800	Вертикальная симметричная шкала. Преимущество такой шкалы в том, что если ее шаг по вертикали соответствует приращению угла прицеливания, то она может исполнять роль баллистической сетки. Базовый размер – ширина цели

Фактически эти шкалы являются оптическим дальномером с базой на цели. В некоторых прицелах в поле зрения выведены числовые значения вертикального угла прицеливания, введенного маховичком. Известны прицелы, у которых в поле зрения находится изображение жидкостного уровня. Прицелы, выполненные с применением электроники, например прицел-дальмеры, прицелы с электронно-оптическим преобразователем или тепловизионные прицелы, еще сильнее нагружены дополнительной информацией. Они могут индифициро-

вать измеренную дальность до цели, уровень заряда батареи, параметры экрана (яркость, контраст), и еще множество других параметров необходимых при работе. Как правило, все сервисные изображения после их использования гаснут и не отвлекают стрелка во время прицеливания.

Большое значение имеют угловые размеры элементов прицельных сеток. Наиболее очевиден выбор размера дальномерных шкал. Измерительные интервалы шкал пропорциональны базовому размеру цели и дальности до неё. Их легко вычислить, как арктангенс отношения размера цели к дальности до нее. Для перевода полученной величины в угловые минуты, ее нужно умножить на 60. Например, цель с базовым размером 1,5 метра (олень) на дальности 100 метров имеет угловой размер 51 угловая минута, на дальности 200 метров эта же цель имеет размер 25,5 минуты, на 300 метров – 17, а на 500 метров – 10. На основании таких расчетов строятся дальномерные шкалы.

Выбор размера прицельного знака не так очевиден как выбор размера дальномерной шкалы. Именно по этой причине размер прицельного знака и толщина образующих его линий служат поводом для самых горячих дискуссий. На размер прицельного знака в первую очередь влияет угловой размер ожидаемой цели. Если прицельный знак будет много больше цели, есть вероятность того, что цель просто потеряется под прицельным знаком. И наоборот если цель слишком велика по сравнению с прицельным знаком, то прицельный знак может теряться на ее фоне. При определении размеров прицельного знака, и сетки в целом, немало важно учитывать оптическую силу (увеличение) прицела, размер его поля зрения. При большом увеличении, например $25\times$ поле зрения прицела будет иметь угловой размер около одного градуса. Соответственно олень на дальности 200 метров перекроет всю центральную часть поля. Прицельная марка на таком фоне не имеет хорошего контраста. Для обеспечения быстрого прицеливания прицельную марку нужно сделать крупнее, например 15 угловых минут, однако прицельная марка такого размера полностью закроет оленя расположенного на дальности 500 м. Чем шире диапазон дальностей, на которых ведется стрельба, тем глубже противоречие в размерах прицельного знака. Выход из данной ситуации в использовании сеток с тонкими линиями, которые накладываясь на изображение, не закрывают его. Минимальная толщина линий образующих прицельный знак рассчитывается. Вспомним принцип работы оптического прицела. Объектив формирует изображение цели в фокальной плоскости, в ней расположена сетка. Далее совмещенное изображение цели и сетки при помощи окуляра в виде пучка параллельных лучей попадает в глаз стрелка. Хрусталик глаза строит совмещенное изображение на сетчатке. Идеальный глаз человека в лабораторных условиях разрешает контрастную линию размером одна угловая минута. В реальных условиях разрешающая способность глаза равна трем угловым минутам. Как правило, трём угловым минутам равна ширина линий образующих рисунок сетки прицела. Умножив тангенс угловой величины на фокус окуляра можно определить линейный размер элемента на сетке. Если сетка прицела находится между объективом оборачивающей системы, то при вычислениях необходимо использовать фокус

эквивалентной оптической системы состоящей из оборачивающей системы и окуляра. В любом случае, полученная величина будет весьма небольшая – единицы микрон. Технологически, сетки с толщиной штриха от 3 мкм получают методом лазерной гравировки, от 5 мкм методом фотолитографии, от 8 мкм методом травления по восковой маске. Для стрелка, как правило, метод изготовления сетки не важен.

В современных прицелах применяются сотни различных прицельных сеток. Например, в каталоге фирмы U.S. OPTICS представлено 76 типов сеток. Они объединены в 9 групп, по кратности прицелов в которых установлены. Рисунок сеток усложняется с увеличением кратности прицелов. Весьма лаконичны сетки коллиматорных прицелов: точка, крест, окружность. В поле зрения прицелов с увеличением $4^{\times}$ или $6^{\times}$ появляются вертикальные шкалы с минимальной ценой деления 2 – 2,5 угловых минуты. В прицелах с увеличением $10^{\times}$ – $25^{\times}$ наиболее широкий выбор сеток, в которых присутствуют, практически, все рассмотренные элементы в самых различных сочетаниях. В прицелах данной группы имеет широкое распространение универсальная сетка Mil-Dot. Прицелы с увеличением $40^{\times}$, $42^{\times}$ имеют крайне узкое поле зрения. Их сетки напоминают сетки прецизионных геодезических приборов – тонкие штрихи, линейные шкалы, минимум цифр и букв.

Сетки прицелов с переменным увеличением должны удовлетворять ряду противоречивых требований. При малом увеличении прицела они должны быть просты и лаконичны, что необходимо при стрельбе по близким целям. При стрельбе на дальние дистанции, когда используется максимальное увеличение, эти сетки должны обеспечивать ведение стрельбы с учетом вертикальных и горизонтальных поправок. В патенте на полезную модель №129271 показана оригинальная сетка спроектированная специально для прицелов с переменным увеличением. Внешний вид сетки типа «Елочка» представлен на рис. 4.

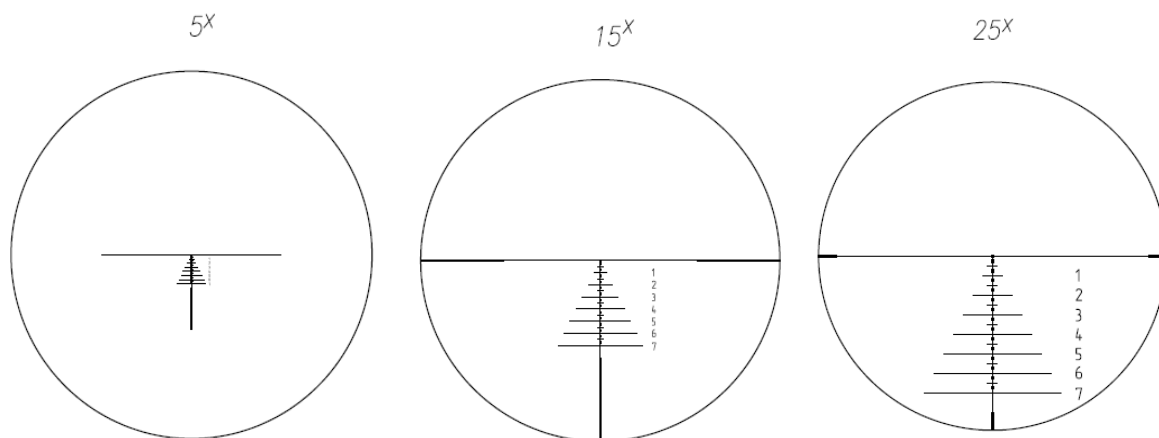


Рис. 4. Внешний вид сетки типа «Елочка» при различных значениях кратности

В её основе лежит классическая схема: тонкий горизонтальный штрих проходит через центр поля зрения, от центра поля зрения вниз идёт тонкий вертикальный штрих. На периферии штрихи значительно утолщены. Особенность

сетки в том, что вертикальный штрих имеет равномерную шкалу с шагом 0,25 мрад, при этом нечётные деления шкалы имеют вид точек, аналогично сетке Mil-Dot, а чётные выполнены в виде горизонтальных штрихов. Горизонтальные штрихи по мере удаления от центра удлиняются, прямо пропорционально вертикальному размеру от центра до данного штриха. Такая сетка, при малом увеличении прицела сливаясь в полупрозрачный треугольник, позволяет быстро прицеливаться, стрелять «навскидку». При большом увеличении сетка является полноценной шкалой вертикальных углов с шагом 0,25 мрад и позволяет учитывать боковые поправки на ветер и движение цели по горизонту с дискретностью 0,5 мрад. Сетка совместима с любым баллистическим калькулятором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. на полезн. модель № 129271 РФ. Сетка оптического прицела / *А.А. Топорков, Ю.А. Трясов*. 03.12.2012.
2. U.S. OPTICS Reticle Handbook // [Электронный ресурс] – URL: [http:// www.usoptics.com](http://www.usoptics.com). (дата обращения: 24.03.2015).

© *А. А. Топорков, И. С. Бутримов, 2015*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА СТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Дмитрий Александрович Белоусов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (961)228-82-68, e-mail: mersee_kz@mail.ru

Александр Григорьевич Поleshчук

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заведующий лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsc.su

Владимир Николаевич Хомутов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: v.n.homutov@gmail.com

Представлены результаты разработки и апробации устройства для оперативного измерения индикатрисы рассеяния лазерного излучения в диапазоне углов до ± 80 град. на отражение. Показана возможность измерения периодов и ориентации дифракционных структур, нанесенных на измеряемую поверхность.

Ключевые слова: дифракционная оптика, индикатриса рассеяния света, структурированная поверхность.

THE MEASUREMENT DEVICE OF THE LIGHT SCATTERING INDICATRIX BY STRUCTURED SURFACES

Dmitrij A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, software engineer, tel. (961)228-82-68, e-mail: mersee_kz@mail.ru

Alexander G. Poleshchuk

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, Doctor of Science, head of laboratory of the diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsc.su

Vladimir N. Khomutov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, junior research fellow, tel. (383)333-30-91, e-mail: v.n.homutov@gmail.com

The results of development and approbation of the devices for the fast measurement of the scattering pattern of the laser radiation in the angle range up to ± 80 degrees in reflection are presented. The possibility of the measurement of spacing and orientation of diffractive structures deposited on the surface being measured is shown.

Key words: diffraction optics, light scattering measurement, structured surface.

Свет, отражённый от поверхности, может быть описан индикатрисой рассеяния, измерив которую можно судить о структуре рельефа данной поверхности. Это свойство используется для определения формы покрытий различных материалов. К примеру, это свойство применяется в оптике, для контроля элементов с нанесённым периодическим микрорельефом.

Многие методы контроля структуры периодических поверхностей основываются непосредственно на сканирование микрорельефа и оценки его качественных параметров: ширина штрихов, глубина микрорельефа. К таким методам относятся: методы атомно-силовой микроскопии, методы конфокальной и лазерной профилометрии, микроскопия электронным пучком [1].

Ряд автоматизированных методов для измерения индикатрисы рассеяния света на оптических элементах, с периодическим микрорельефом работают в случае измерения проходящего света. Примеры реализации таких методов описаны в работах [2] и [3]. Однако предложенные методы не позволяют измерять индикатрису рассеяния света в отражённом от объекта свете в большом диапазоне углов. Автоматизация измерения индикатрисы рассеяния в отражённом свете позволит расширить область применения этого метода, и в частности позволит осуществлять контроль периодических структур, применяемых для отражения, падающего на них излучения.

Световой поток, отражаясь от поверхности, разлагается в угловой спектр. В частности если структура элемента периодическая, то световой поток разложится на ряд дифракционных порядков. Нулевой порядок с интенсивностью I_0 отразится вдоль оптической оси распространения падающего излучения, а боковые дифракционные порядки с интенсивностью I_k , распространяются под углами ϕ_k к оптической оси:

$$\sin(\phi_k) = \frac{k \cdot \lambda}{s}, \quad (1)$$

где k – номер дифракционного порядка, s – период штрихов решетки, λ – длина волны оптического излучения. Соответственно измеряя величину угла ϕ порядка дифракции k и зная длину волны падающего на микрорельеф излучения λ можно по формуле (1) получить период структурированной поверхности. Измерив интенсивности всех дифракционных порядков I_k можно рассчитать глубину и форму микрорельефа [4].

Сложность автоматизации данного процесса связана с тем, что использование стандартных рассеивающих экранов не позволяет направлять весь дифрагированный свет, расходящийся в широком телесном угле к регистрирующей видеокамере. В связи с этим, в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН был разработан объёмный рассеивающий экран параболоидной формы, который позволяет направлять в сторону видеокамеры свет, отражённый от поверхности объекта в телесном угле до 85° .

Разработан экспериментальный стенд для измерения индикатрисы отражённого рассеянного света, в котором источником излучения служит полупро-

водниковый лазер с длиной волны 635 нм. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Оптическое излучение лазера через отверстие в объёмном рассеивающем экране падает на исследуемый элемент, который устанавливается на X-Y координатном столике. Индикатриса рассеяния проецируется на внутреннюю поверхность объёмного экрана, рассеянный свет с которого фиксируется видеокамерой. Полученные данные обрабатываются управляющим компьютером, что позволяет получить индикатрису рассеяния света.

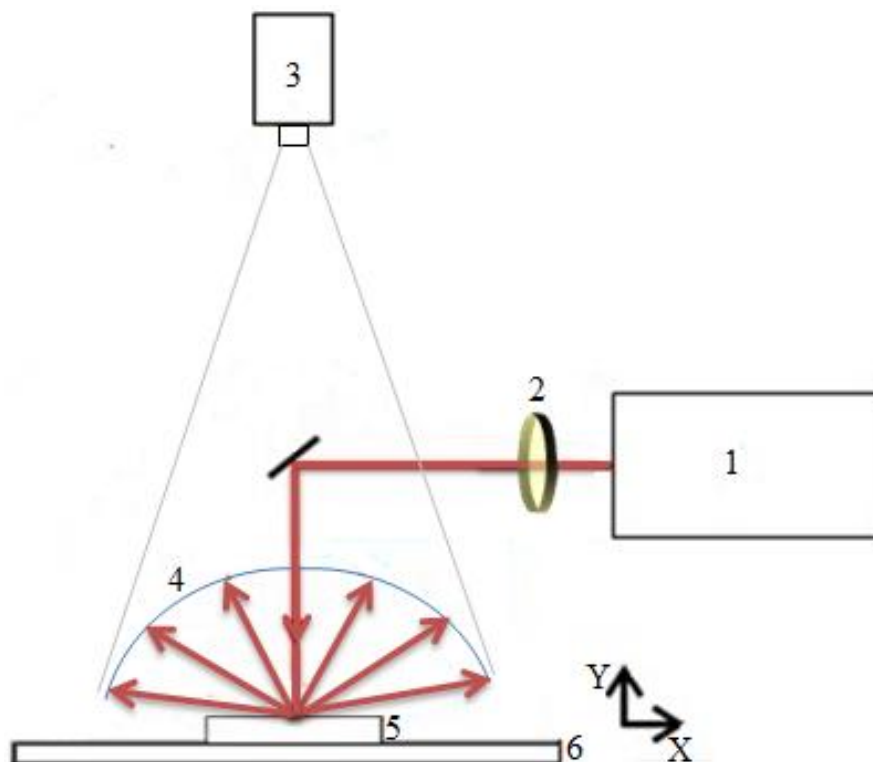


Рис. 1. Схема измерения индикатрисы рассеяния света:

1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – видеокамера; 4 – объёмный рассеивающий экран; 5 – исследуемый объект; 6 – X-Y координатный столик

На разработанном стенде был проведён эксперимент по измерению углового распределения дифракционных порядков в отражённом свете от различных периодических структур и последующее определения периода микрорельефа этих элементов по полученным данным.

В данном эксперименте определялось углового распределения трёх элементов с периодическими структурами, период которых был измерен на WLI (white light interferometer) и равнялся $s = 5$ мкм, 2,5 мкм и 1,5 мкм соответственно. Для калибровки устройства использовался дифракционный элемент с периодом $s = 10$ мкм, угловое распределение дифракционных порядков которого лежит в телесном угле $72,27^\circ$. Полученное в результате измерений угловое распределение дифракционных порядков представлено на рис. 2. Вычисленный по этим данным период микрорельефа исследуемых образцов составил $s = 4,998$ мкм, 2,499 мкм и 1,502 мкм соответственно, что согласуется с данными полученными на WLI.

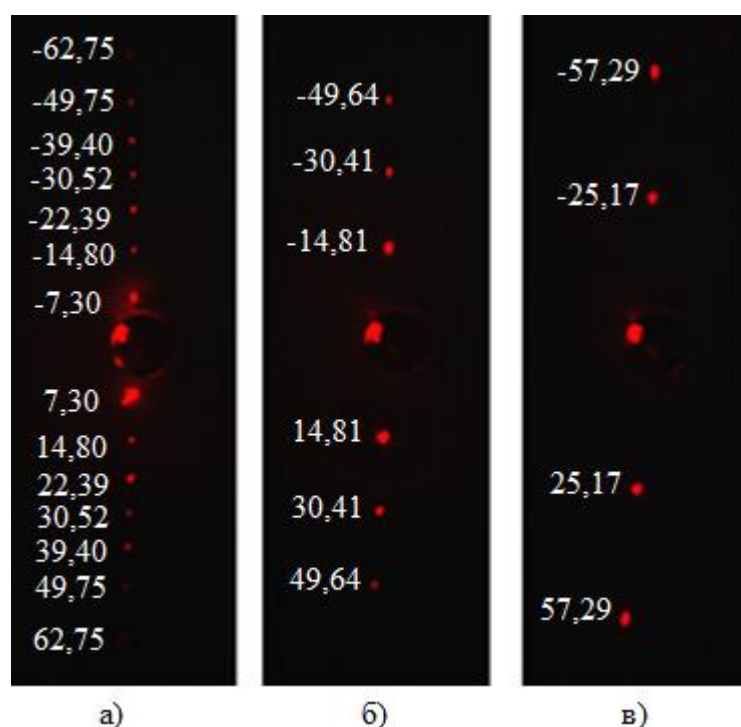


Рис. 2. Угловое распределение дифракционных порядков зафиксированное видеокамерой при исследовании элементов с периодической структурой:

а) – 5 мкм, б) – 2,5 мкм и в) – 1,5 мкм соответственно

Показано, что разработанное устройство позволяет проводить оперативное измерение индикатрисы рассеяния лазерного излучения в диапазоне углов до ± 80 град. на отражение. Экспериментально продемонстрирована возможность измерения периодов и ориентации дифракционных структур нанесенных на измеряемую поверхность.

Данная работ поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227 и междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. T. Gale, M. Rossi, H. Schütz, P. Ehberts, H. P. Herzig, D. Pronque. Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation // Appl. Opt. – 1993. – № 32. – P. 2526–2533.
2. Хомутов В. Н., Полещук А. Г., Черкашин В. В. Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции // «Компьютерная оптика». – 2011. – Т. 35. – С. 196–201.
3. Wenrui Cai, Ping Zhou, Chunyu Zhao, James H. Burge. Diffractive optics calibrator: measurement of etching variations for binary computer-generated holograms // Appl. Opt. – 2014. – № 53. – P. 2477–2486
4. M. Ekberg, F. Nikolajeff. Proximity-compensated blazed transmission grating manufacture with direct-writing, electron-beam lithography // Appl. Opt. – 1994. – № 33. – P. 103–107.

© Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, 2015

РАЗРАБОТКА СПЕКТРОФОТОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ

Надежда Федоровна Чайка

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)911-88-72, e-mail: chayka@triwe.net

Роман Сергеевич Дроздецкий

ОАО «Автомир», 630108, Россия, г. Новосибирск, пр. Энергетиков, 4а, оператор, тел. (923)108-67-80, e-mail: drozdetskiy.1992@mail.ru

Рассматривается разработка компактного спектрофотометра для точного подбора цвета и определения колориметрических характеристик объектов.

Ключевые слова: колориметрическая характеристика, цвет, спектрофотометр, вогнутая дифракционная решетка, схема Водсворта.

DEVELOPMENT OF SPECTROPHOTOMETER FOR MEASURING COLORIMETRIC CHARACTERISTIC OF SURFACES

Nadezhda F. Chayka

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Docent at Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (913)911-88-72, e-mail: chayka@triwe.net

Roman S. Drozdetski

AutWorld OAO, 630108, Russia, Novosibirsk, 4a Energetics St., Operator, tel. (923)108-67-80, e-mail: drozdetskiy.1992@mail.ru

Development of compact spectrophotometer for precision selection of colours and for measuring colorimetric characteristic of surfaces.

Key words: colorimetric characteristic, colour, spectrophotometer, concave diffraction grating, Wordsworth's scheme.

Как известно [1], цвет является одним из признаков света, а если точнее, то цвет – это свойство видимого излучения, определяемое по вызываемому у человеческого глаза ощущению. Хотя человеческий глаз является весьма совершенным чувствительным органом, но он, к сожалению, не может оперировать количественными параметрами.

Задача точного определения цвета возникает во многих случаях. Например, при подборе цветов лакокрасочных и других типов покрытий в автомобилестроении, в полиграфии и в других отраслях промышленности. В спорных ситуациях решение вопроса о соответствии цвета возможно только с помощью спектрофотометра, который позволяет измерить координаты цвета образца и выбранной краски или другого типа покрытия.

Поэтому данная работа посвящена выбору схемных решений и разработке компактного портативного спектрофотометрического прибора. Такой прибор должен решать проблему точного подбора цвета и определения колориметрических характеристик объектов, а также показывать численное отклонение по каждой цветовой координате для сравниваемых поверхностей.

Большое количество окружающих нас предметов защищены лакокрасочными покрытиями. Они стали настолько привычны, что зачастую на них обращают внимание только при нарушении поверхностного слоя, когда возникают очаги коррозии и ухудшается внешний вид изделия.

На долю лакокрасочных покрытий приходится более 85% защиты изделий в машиностроении. Также широко применяются они в полиграфической промышленности, мебельной, кожаненно-обувной и т.д. Лакокрасочные покрытия выполняют как защитную, так и декоративную функцию.

Причем технология нанесения покрытий касается объектов различных по форме и размерам, изготовленных из различных материалов. Соответственно состав материалов, применяемых для покрытий, и технологические процессы их нанесения чрезвычайно разнообразны. Свыше половины всех лакокрасочных покрытий приходится на долю машиностроения. Наибольший объем работ по производству покрытий имеет автомобильная промышленность.

В условиях автомастерских особое значение имеют габаритные размеры прибора, так как необходимо обеспечить точный подбор цвета реставрируемого элемента относительно соседнего неповрежденного участка поверхности. Компактность прибора позволяет колористу без особого труда произвести цветовые измерения на основе спектрального состава лакокрасочного покрытия непосредственно возле автомобиля.

Тела и среды, обладающие избирательным отражением или пропусканием, имеют при освещении белым светом какую-либо окраску и являются цветными. К оптическим характеристикам покрытий относятся цвет, прозрачность, блеск. Оптические свойства покрытий изменяются в процессе эксплуатации.

Если падающее излучение имеет сложный спектральный состав и сплошной спектр, а кривая распределения энергии соответствует распределению в солнечном излучении, то глаз получает впечатление белого света. Отражающие поверхности, не изменяющие спектральный состав падающего на них излучения и имеющие коэффициент отражения не менее 85 %, считаются белыми.

Большинство непигментированных покрытий оптически прозрачны для видимого света. Цветовые характеристики проявляются, главным образом, за счет пигментов или газонаполнения. Причем цвет покрытия определяется степенью избирательности поглощения и отражения падающего на них света.

Как известно, цвет оказывает на человека не только эстетическое, но и психологическое и физиологическое воздействие. Все существующие цвета можно получить в результате смешения трех линейно независимых цветов. Для проведения цветовых расчетов и определения колористических характеристик чаще всего применяется колориметрическая система RGB.

Обозначение RGB является аббревиатурой английских слов Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий и представляет собой аддитивную цветовую модель, описывающую способ синтеза цвета.

Нормальный светлоадаптированный человеческий глаз может различать более 10 млн. оттенков цветов. С коммерческой точки зрения различными считаются примерно полмиллиона цветов.

Обычно подбор цвета покрытия включает 3 этапа. Сначала предварительно выбираются несколько близких оттенков из различных цветковых каталогов, и затем визуально осуществляется выборка из 2-3-х оттенков.

На втором этапе проводится спектрофотометрическое сравнение испытуемого образца с выбранными цветами из каталогов. И, наконец, если точность подбора оказывается недостаточной, то на третьем этапе проводится

корректировка. Причем наличие количественных данных о спектральном различии с образцом позволяет многократно сократить время подбора цвета [2].

Поскольку видимому оптическому излучению соответствует область спектра 0,38 – 0,76 мкм, то и выбранный диапазон работы спектрофотометра составляет от 0,4 до 0,8 мкм. Оптическая схема прибора, как показано на рис. 1, построена по схеме Водсворта с коллиматорным вогнутым зеркалом [3].

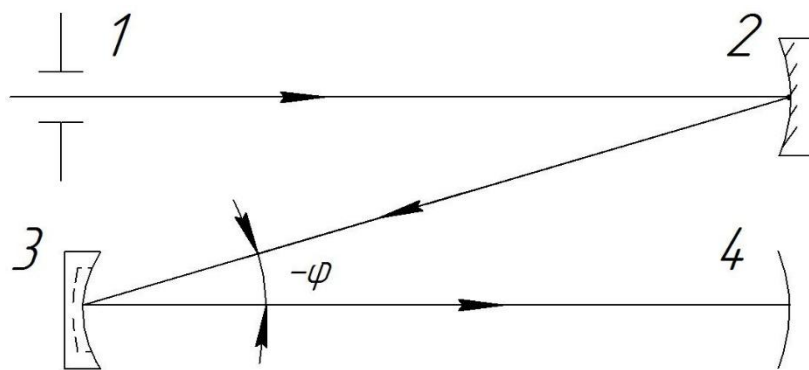


Рис. 1. Оптическая схема спектрофотометра:

1 – входная щель; 2 – сферическое зеркало; 3 – вогнутая дифракционная решетка;
4 – поверхность изображения

В качестве диспергирующей системы используется вогнутая отражательная сферическая дифракционная решетка. Решетка имеет радиус кривизны 250 мм и число штрихов – 1 000 штр/мм, что соответствует периоду 1 мкм. Использование вогнутой решетки позволяет минимизировать количество деталей в приборе и, соответственно, уменьшить его габаритные размеры и, в конечном итоге, стоимость.

Для повышения энергетической эффективности наиболее выгодно работать в низких порядках дифракции, поэтому решетка-эшелетт работает в 1-м дифракционном порядке. При этом размеры нарезанной части решетки составляют 50 x 50 мм². После разложения света на решетке дифрагированный пучок собирается на приемном устройстве. Теоретическая разрешающая способность

решетки составляет 50 000, что соответствует спектральному пределу разрешения $\delta\lambda = 0,01$ нм на длине волны 0,5 мкм.

Угол блеска профилированной дифракционной решетки по расчету составляет 19° , что позволяет получить на длине волны 0,55 мкм значение функции относительного распределения энергии внутри спектрального порядка $\Phi(u)$ больше 0,94. Причем на краях рабочего диапазона, т.е. для длин волн 0,4 мкм и 0,8 мкм функция имеет значения больше 0,6, что также соответствует области высокой концентрации энергии ($\Phi(u) > 0,4$).

Тогда, принимая коэффициент отражения зеркального покрытия решетки равным 0,9, и, учитывая, что у серийно выпускаемых решеток коэффициент, показывающий какая часть дифрагированного излучения направляется в рабочий порядок спектра, приблизительно равен 0,75, получаем величину коэффициента отражения решетки в пределах от 0,4 до 0,6. График зависимости коэффициента отражения решетки ρ от длины волны представлен на рис. 2.

Таким образом, данная разработка спектрофотометра может быть использована для колориметрических измерений. При этом инструментальная спектрофотометрия позволяет полностью исключить человеческий фактор, а также поддерживать высокую точность выбора цвета и стабильную воспроизводимость цвета красок и покрытий.

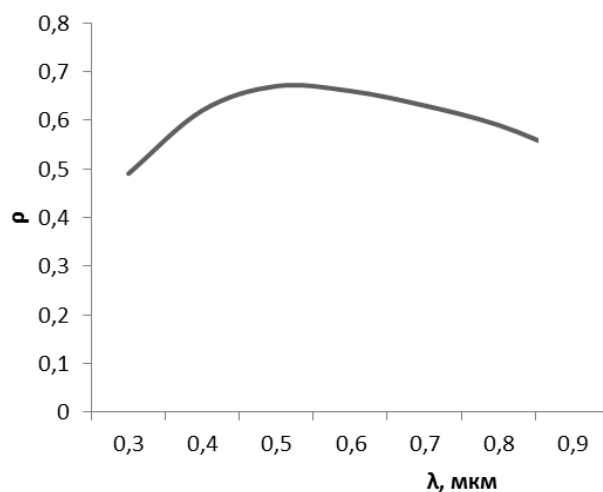


Рис. 2. Коэффициент отражения дифракционной решетки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вавилов С.И. Глаз и Солнце. [Текст] С.И.Вавилов. – М.: Наука, 1981. – 128 с.
2. Подбор цвета краски.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.palina-coatings.ru/>. от 01.12.04. – Загл. с экрана.
3. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

© Н. Ф. Чайка, Р. С. Дроздецкий, 2015

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОАПЕРТУРНОГО АПОДИЗАЦИОННОГО СВЕТОФИЛЬТРА ДЛЯ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Николай Юрьевич Никаноров

Акционерное общество «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 179/2, главный оптик, тел. (383)236-77-83, e-mail: distorsya@ngs.ru

Владимир Витальевич Коваленко

ГБОУ СПО НСО «Новосибирский приборостроительный техникум им. Б. С. Галушача», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дмитрия Донского, 23/2, корпус 45, заведующий комплексной лабораторией оптических и оптико-электронных приборов и систем, тел. (923)197-01-71, e-mail: optic.rem@mail.ru

Ирина Владимировна Парко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, УНЦ «Планетарий», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, и. о. директора, старший преподаватель кафедры наносистем и оптотехники, тел. (913)959-17-30, e-mail: planetarium@ssga.ru, iparko@yandex.ru

Никита Юрьевич Филлипенко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, магистрант кафедры оптических информационных технологий, тел. (983)323-80-84, e-mail: nikita1994@ngs.ru

Артём Александрович Денисенко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, магистрант кафедры оптических информационных технологий, тел. (983)132-02-87, e-mail: rocky.94.94@mail.ru

В статье приведено сравнение фотографий участка звездного неба, полученного с помощью телескопа ТАЛ-75 с применением аподизационного светофильтра и без него, а также сравнение полученных снимков с фотографией этого же участка звездного неба, полученной орбитальным телескопом «Хаббл».

Ключевые слова: аподизационный светофильтр телескоп ТАЛ-75, дифракционное изображение точки, апертура, разрешающая способность.

APPLICATION FULL-APERTURE APODIZING FILTER FOR PHOTO SPACE OBJECT

Nikolay Yu. Nikanorov

Joint-stock company «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Russia, Novosibirsk, D. Kovalchuk str., 179/2, Head optic, tel. (383)216-09-37, e-mail: distorsya@ngs.ru

Vladimir V. Kovalenko

«Novosibirsk instrument-making College named. B. S. Galushaka», 630049, Russia, Novosibirsk, St. Dmitry Donskoy, 23/2, Bldg. 45, head of the complex of the laboratory for «Optical and optoelectronic devices and systems», tel. (923)197-01-71, e-mail: optic.rem@mail.ru

Irina V. Parko

Siberian state University of geosystems and technology, UC «Planetarium, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., acting Director of the Ioit, senior prepodavatel, tel. (913)959-17-30, e-mail: planetarium@ssga.ru, iparko@yandex.ru

Nikita Yu. Philipenko

Novosibirsk state technical university, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks pr., Magistrate, departament of otical information technologies, tel. (983)323-80-84, e-mail: nikita1994@ngs.ru

Artem A. Denisenko

Novosibirsk state technical university, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karl Marks pr., Magistrate, departament of otical information technologies, tel. (983)132-02-87, e-mail: rocky.94.94@mail.ru

The article presents the comparison of the photos of part of the sky obtained with a telescope TAL-75 with the use of Apodization filter and without it, and the comparison of the images with a photo of the same part of the sky obtained orbital telescope «Hubble».

Key words: apodization filter telescope TAL-75, a diffraction image of a point, aperture, resolution.

Одним из набирающих популярность, в настоящее время, направлений при астрономических наблюдениях является поиск экзопланет. «Экзопланета» это планета, обращающаяся вокруг звезды за пределами Солнечной системы. Для обнаружения подобного объекта с использованием классического телескопа требуется большое угловое разрешение, обеспечиваемое огромной апертурой. Основной проблемой при поиске экзопланеты является ее малая светимость и очень малые расстояния от достаточно яркой звезды, вокруг которой она обращается. В фокальной плоскости объектива телескопа, изображение за счет явления дифракции преобразуется в кружок Эри, причем яркость первого и даже второго кольца может превосходить яркость свечения экзопланеты. Даже если угловая разрешающая способность объектива телескопа позволяет увидеть отдельно два приблизительно равно светящихся объекта (критерий Релея) [1], то рассмотреть слабо светящийся объект на фоне дифракционных колец практически не возможно.

Одним из способов преобразования изображения бесконечно удаленного объекта (звезды) является подавление интенсивности дифракционных колец (наиболее интенсивных по яркости первого второго и третьего), при этом не увеличивая диаметра центрального ядра. В статье [2] описывается методика расчета и технические параметры аподизационного фильтра отвечающего описанным выше требованиям, его практическая реализация и результаты камеральной проверки. В 2012 году были проведены натурные испытания данного фильтра при фотографировании уникального явления: прохождения Венеры по диску Солнца. [3]

20 декабря 2014 года были проведены практические сравнительные съемки звездного неба с использованием полноапертурного аподизационного свето-

фильтра. Съёмки проводились в Новосибирском Детско-Юношеском Астрофизическом центре Планетарий.

Съёмки выполнялись с 21:00 по 22:00 по новосибирскому времени при следующих погодных условиях:

Температура воздуха -17°C ; влажность 80%; облачность: ясно; видимость: 9 км; ветер: Ю-ЮВ 20 км/ч.

В качестве основного инструмента был использован телескоп ТАЛ-75 установленный на монтировке в левом куполе планетария.

В качестве фотоприемного устройства была использована матрица - QHY6, пиксель 6,5х6,25 микрон 2,23"/Pixel.

В качестве объекта для сравнительной съёмки было выбрано рассеянное звездное скопление NGC752 с экваториальными координатами - RA 01h 57m 59s, Dec $+37^{\circ} 34' 06''$, выбор был определен тем, что данный объект находился практически в зените, и городская засветка не влияла на результаты эксперимента. Время экспозиции составляло: для съёмки без применения аподизационного светофильтра - 2,5 сек; с применением аподизационного светофильтра - 3,7 сек (для компенсации уменьшения светопропускания аподизационным светофильтром).

Для определения эффективности применения аподизационного светофильтра снимки были обработаны с помощью программного обеспечения MaxIm DL. Были вычислены значения диаметра центрального ядра изображения звезды на полу высоте по интенсивности (FWHM). Результаты измерений приведены на рис. 2.

Из результатов обработки снимков видно, что при использовании аподизационного светофильтра происходит уменьшение диаметра центрального ядра изображения звезды на 10-15%. Кроме того, при построении гистограмм изображения участков звездного неба, применение аподизационного светофильтра увеличивает контраст картинки, за счет уменьшения интенсивности рассеянного излучения.

В результате проведения эксперимента была практически подтверждена эффективность применения аподизационных светофильтров для любительской астрофотографии, за счет уменьшения диаметра изображения звезды и уменьшения рассеянного света.

Обнаружить Экзопланету с применением любительских телескопов с апертурой 75- 100 мм не представляется возможным, но при расчете аподизационного светофильтра с учетом аберраций для телескопа ТАЛ-220 «Персей» (телескопа-рефрактора находящегося в ДЮЦ Планетарий) возможно будет наблюдать уже открытые Экзопланеты.

В заключении коллектив авторов выражает благодарность руководителям Детско-юношеского центра Планетарий Сергею Юрьевичу Масликову и Новосибирского Астрономического Общества Антону Геннадьевичу Савельеву за помощь в организации и активное участие в проведении съёмок.



a)

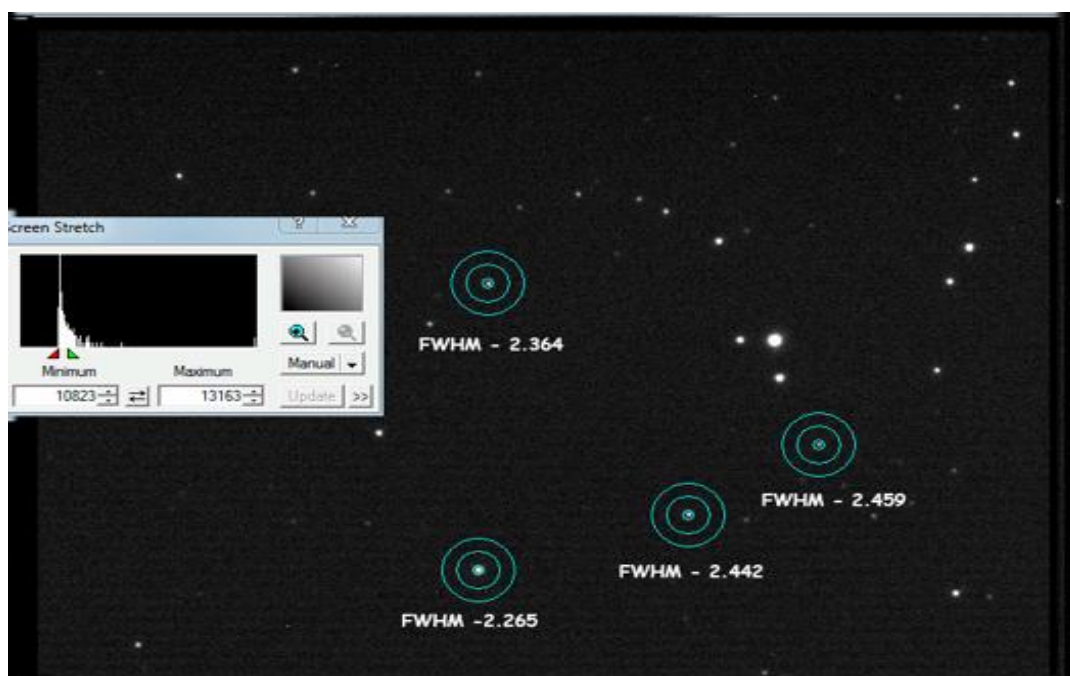


b)

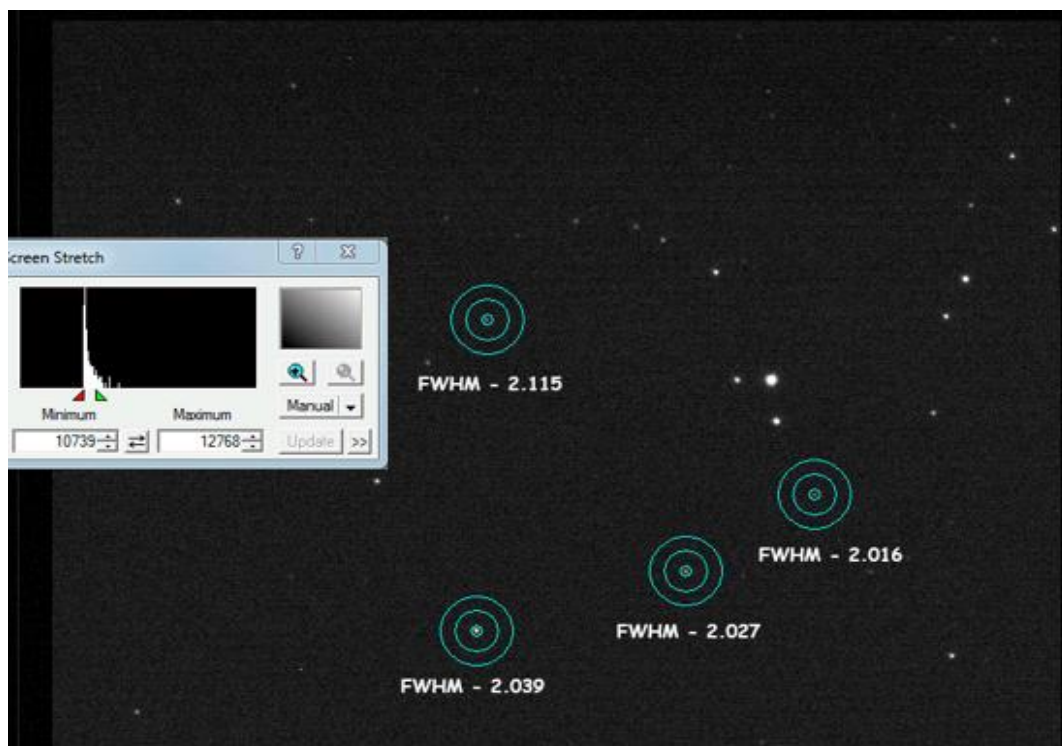


в)

- Рис. 1. Приведены фотографии участка неба:
- а) снимок сделан без применения аподизационного светофильтра;
 - б) снимок сделан с использованием аподизационного фильтра;
 - в) снимок сделан орбитальным телескопом «Хаббл»



а)



б)

Рис. 2. Приведены результаты обработки снимков сделанных:
 а) без применения аподизационного светофильтра;
 б) с применением аподизирующего светофильтра

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коронкевич В.П. Формирование изображения в оптических системах. – Новосибирск: НГТУ, 2005.
2. Полещук А. Г, Седухин А. Г., Никаноров Н. Ю. Апертурная аподизация на регулярных решетках с переменным пропусканием в нулевом порядке дифракции// Автометрия. 2013.
3. Никаноров Н. Ю. Результаты наблюдения прохождения Венеры через диск Солнца с помощью телескопа с аподизационным дифракционным фильтром // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013». Дифракционные и интерференционные системы и приборы: сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 58–62.

© Н. Ю. Никаноров, В. В. Коваленко, И. В. Парко,
 Н. Ю. Филлипенко, А. А. Денисенко, 2015

СЕРИЙНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Лев Вальтерович Парко

Акционерное общество «Швабе – Приборы», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179а, начальник отдела разработки специальной и гражданской техники, тел. (383)225-81-62, e-mail: parko63@inbox.ru

Михаил Сергеевич Комбаров

Акционерное общество «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник управления программ развития, (383)216-08-92, e-mail: npz36@ngs.ru

Ирина Владимировна Парко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, УНЦ «Планетарий», 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, и. о. директора, старший преподаватель кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (913)959-17-30, e-mail: planetarium@ssga.ru, iparko@yandex.ru

В статье рассмотрены основные оптические схемы серийно выпускаемых телескопов. Выявлены тенденции и представлена концепция развития телескопостроения на АО «Швабе – Приборы» и АО «Швабе – Оборона и Защита».

Ключевые слова: телескоп, рефрактор, рефлектор, технологичность, качество изображения, апохромат, хроматизм изображения.

SERIAL TELESCOPES

Lev V. Parko

Joint-stock company «Shvabe – Devices», 630049, Novosibirsk, st. D. Kovalchuk, 179a, Head of development division and special civil engineering, tel. (383)225-81-62, e-mail: parko63@inbox.ru

Mikhail S. Kombarov

Joint-stock company «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Novosibirsk, street D. Kovalchuk 179/2, Head of management development programmes, tel. (383)216-08-92, e-mail: npz36@ngs.ru

Irina V. Parko

Siberian state University of geosystems and technology, UC «Planetarium», 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., acting Director of the Ioit, senior prepodavatel, tel. (913)959-17-30, e-mail: planetarium@ssga.ru, iparko@yandex.ru

The article considers the basic optical scheme of the commercially available telescopes. Trends are identified and presented the concept of development of telescopes at JSC «Shvabe – Devices» and JSC «Shvabe – Defense and Protection».

Key words: telescope, refractor, reflector, technology, image quality, apochromat, chromatic aberrations of the image.

Астрономия – древнейшая из наук, которая не оставляет равнодушными миллионы людей по всему миру. Для многих она является интеллектуальным хобби, а для части астрономов-любителей она дает возможность напрямую участвовать в научных исследованиях.

Практически в любом городе нашей страны и за рубежом можно найти астрономический клуб, детский кружок и просто отдельных энтузиастов и любителей астрономии, которые изучают звездное небо, строят телескопы и даже обсерватории. Последние годы в России более активно ведется строительство и открытие новых планетариев и обсерваторий. Подобный интерес к астрономии и космонавтики наблюдался лишь в середине 60-х годов, после первого полета Ю.А. Гагарина.

Астрономы-любители, как и раньше, вносят большой вклад в изучение астрономических объектов. Более половины открытых новых комет и астероидов принадлежит именно им, они успешно участвуют в многочисленных программах по наблюдению за звездами, астероидной безопасности и т.д.

При этом для подавляющего большинства астрономов-любителей основным инструментом при наблюдениях и исследованиях вселенной являются серийно-выпускаемые телескопы. Телескоп – это символ науки, с того самого момента когда Галилео Галилей впервые направил свою трубку на Луну.

Сегодня любой желающий, купив телескоп в магазине, может запросто совершить все открытия великих ученых за последние 400 лет.

При всем разнообразии известных оптических схем и характеристик телескопов, конкуренции многочисленных производителей в мире, в настоящее время лишь некоторые из них производятся серийно, что обусловлено, прежде всего, технологичностью и себестоимостью.

По типу оптической схемы объектива телескопы делятся на: зеркальные (рефлекторы), линзовые (рефракторы) и зеркально-линзовые (катодиоптрические).

Самой распространенной схемой зеркальных телескопов является схема Ньютона (рис. 1). Телескопы этой схемы выпускают практически все производители в мире, т.к. это самый простой в изготовлении рефлектор. Он имеет всего лишь одну точную оптическую деталь – главное зеркало.

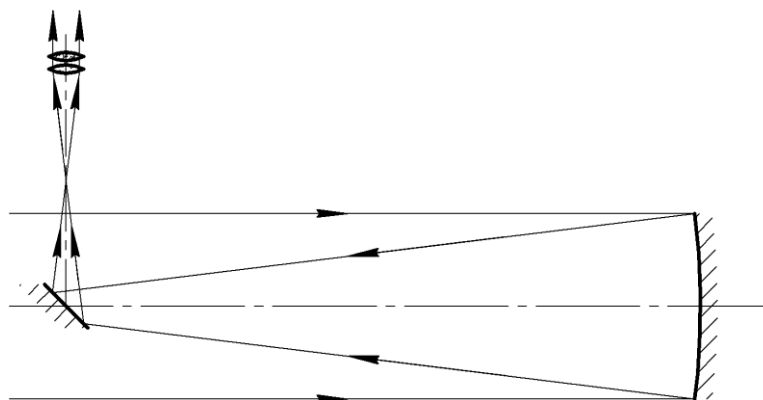


Рис. 1. Телескоп системы Ньютона

В 1979 году ПО НПЗ (в настоящее время АО «Швабе – Оборона и Защита»), с подачи известного в нашей стране популяризатора любительской астрономии Л. Л. Сикорука, выпустил первую партию телескопов системы Ньютона – «Алькор» с диаметром главного зеркала 65мм. Телескоп имел необыкновенный успех у покупателей, ни смотря на большую по тем временам цену. В модернизированной версии 2004 года, под маркой ТАЛ-65, он выпускается заводом до сих пор.

После успеха «Алькора» закономерно встал вопрос о выпуске более мощных телескопов этой системы, и в 1982 году последовал «Мицар», он же ТАЛ-1 с диаметром зеркала 110 мм, а в 1986 году – «Альтаир», он же ТАЛ-2 с диаметром зеркала 150 мм.

Все эти три модели телескопов системы Ньютона выпускались на ПО НПЗ более 30 лет и стали отечественной легендой. На них выросло целое поколение астрономов-любителей СССР. В 90-е годы эти телескопы помогли заводу «выжить» в труднейшей экономической ситуации, когда массово импортировались в Великобританию и другие страны.

В 1998 году телескоп ТАЛ-1 получил премию как самый массово-продаваемый телескоп в Великобританию.

С середины 90-х годов по многочисленным просьбам астрономов-любителей России, ЦКБ «Точприбор» (в настоящее время АО «Швабе – Приборы») разработал конструкцию линзового телескопа рефрактора-ахромата ТАЛ-100R с диаметром объектива 100 мм, а в 1998 году ПО НПЗ выпустил первую партию этого телескопа.

Рефракторы-ахроматы (рис. 2) являются самой массовой группой выпускаемых в мире телескопов и имеются в номенклатуре абсолютно всех производителей серийных астрономических приборов.

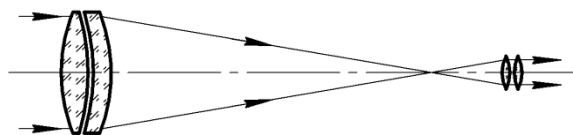


Рис. 2. Рефрактор-ахромат

Они имеют несколько преимуществ перед рефлекторами и катодиоптрическими телескопами т.к. просты в обслуживании, не имеют центрального экранирования, что обеспечивает высокую контрастность и разрешение изображения, особенно при наблюдении планет, и не требуют юстировки у пользователя.

Недостатком рефракторов-ахроматов является остаточный хроматизм, т.е. окрашивание изображений ярких объектов звездного неба, но и этот недостаток отсутствует у рефракторов-апохроматов, о чем будет сказано ниже.

В начале нулевых годов ТАЛ-100R был дополнен рефракторами-ахроматами ТАЛ-75 и ТАЛ-125R и таким образом эти телескопы образовали вторую линейку телескопов марки ТАЛ, которые выпускаются до сих пор.

Наиболее распространенными схемами катодиоптрических телескопов являются системы Шмидта-Кассегрена (рис. 3а) и Максутова-Кассегрена (рис. 3б). Их выпускают все самые известные производители в мире такие как Mead, Celestron, и самая динамично-развивающаяся китайская фирма Sky-Watcher.

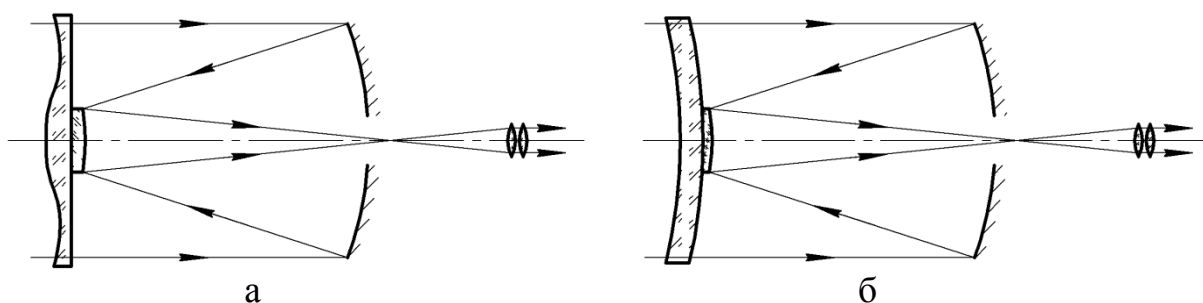


Рис. 3. Телескопы систем Шмидт – Кассегрен (а) и Максутов – Кассегрен (б)

Единственным достоинством катодиоптрических телескопов, по сравнению с рефракторами и рефлекторами, являются их массогабаритные характеристики, что позволяет выпускать телескопы с большими диаметрами объектива и большими фокусными расстояниями.

В этом классе телескопов ПО НПЗ пошел по своему пути, не используя классические схемы Шмидта-Кассегрена и Максутов - Кассегрена, а в 1999 году приступил к выпуску нового зеркально-линзового телескопа по схеме Ю.А. Клевцова – ТАЛ-200К [3] (рис. 4).

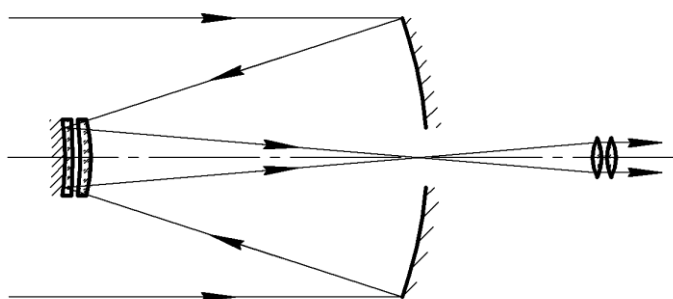


Рис. 4. Телескоп системы Клевцова

Это наиболее технологичный катодиоптрический телескоп, имеющий только сферические поверхности и всего одну габаритную точную оптическую деталь, по сравнению с вышеприведенными схемами катодиоптрических телескопов. В 2005 году был поставлен в серию ТАЛ-250К и вместе с ТАЛ-150К образована третья линейка телескопов марки ТАЛ.

Из-за новизны схемы первое время астрономы-любители отнеслись к этим телескопам настороженно, но в последствии, даже многие ведущие российские астрофотографы, занимающиеся съемкой объектов солнечной системы и дальнего космоса, по достоинству оценили эти инструменты.

В связи с бурным развитием любительской астрономии, внедрением цифровых и информационных технологий и повышения материального уровня потребителей, с середины нулевых годов стала прослеживаться стойкая тенденция замены линзовых телескопов рефракторов-ахроматов на более дорогие рефракторы-апохроматы.

Оптические схемы этих телескопов абсолютно одинаковые, но у рефракторов-апохроматов в качестве материала линз объектива используются стекла с особым ходом дисперсии, которые дороже обычных марок стекол в несколько раз. Это обстоятельство устраняет последний недостаток телескопа рефрактора-ахромата – остаточный хроматизм и для любительского телескопа с диаметром объектива до 200 мм становится идеальным инструментом.

Для создания нового рефрактора-апохромата ЦКБ «Точприбор» разработало новую оптическую схему из обычных марок стекол [4] (рис. 5).

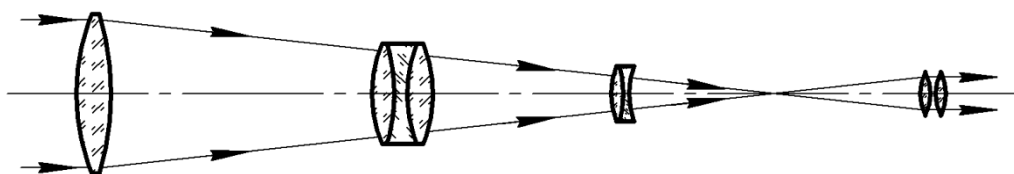


Рис. 5. Система рефрактора-апохромата

В 2007 году ПО НПЗ выпустил первый телескоп рефрактор-апохромат ТАЛ-125АРО.

В этом же году на «Астрофесте» в Москве этот телескоп произвел настоящий фурор, т.к. до этого считалось, что рефрактор-апохромат, оптическая схема которого содержит стекла с обычным ходом дисперсии, сделать невозможно. Кроме того стоимость телескопа ТАЛ-125АРО была в два раза дешевле полуапохроматов производства КНР. Телескоп получил собственное имя «Аполлар», что означает: «Апохромат для любителей астрономии России». В 2010 году ТАЛ-125АРО стал обладателем региональной премии «Сто лучших товаров России».

В этом же году ЦКБ «Точприбор» разработало конструкцию, а в следующем году ПО НПЗ запустил в серию телескоп ТАЛ-150 АРО лучший по качеству изображения и использования в астрофотографии.

На одном из астрономических форумов «СибАстро» это был единственный телескоп, который при наблюдениях Луны на большом кратере Платон, даже при посредственных атмосферных условиях, смог показать три маленьких кратера, в реальности имеющих размеры 800-1000 м!

На этом же форуме, ведущий астрофотограф России И. Чекалин, практикующийся ранее на зеркальных телескопах, с помощью ТАЛ-150 АРО сделал уникальный снимок Плеяд в созвездии Тельца.

В настоящее время ведущими фирмами, серийно выпускающих любительские телескопы, прослеживаются следующие тенденции:

- растет номенклатура рефракторов-апохроматов с различной ценовой категорией;

- увеличивается спектральный диапазон работы телескопов, в связи с широким внедрением цифровых технологий и матричных приемников излучения, что требует более качественной коррекции рефракторов и катодиоптрических систем;

- совершенствуется и компьютеризируется системы автоматического наведения и слежения наблюдаемых объектов;

- растет интерес к специализированным инструментам, таким как, солнечные, биноклярные, обзорные телескопы.

Эти тенденции могут стать перспективными для предприятий-производителей с точки зрения разработки и выпуска новой продукции.

В последние годы положение на российском рынке телескопов кардинально изменилось. Монополия с начала 80-х годов прошлого века по производству телескопов ПО НПЗ, сменившая многолетнюю монополию Загорского приборостроительного завода, завершилась безвозвратно. Рыночные механизмы привели к появлению в России телескопов ведущих мировых брендов, выпускаемых по большей части в Китае. Зарубежные фирмы-производители планомерно вытеснили российскую продукцию, за счет лучшего отношения цены и качества. Разрыв по этому показателю ежегодно увеличивается, как это ни прискорбно порой осознавать. Хотя сейчас в связи с падением курса рубля, у отечественных производителей появился временный шанс отвоевать часть отечественного рынка телескопов.

АО «Швабе – Приборы» и АО «Швабе – Оборона и Защита» совместно разрабатывают новую концепцию развития телескопостроения. Прежде всего, она предусматривает разработку и производство линейки катодиоптрического телескопа с диаметром объектива 200, 250 и 300 мм и линейки телескопов рефракторов-апохроматов с диаметром объектива 100, 150 и 200 мм, с применением стекол производства ЛЗОС («Лыткаринский завод оптического стекла»), который также входит в холдинг «Швабе».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теребиж, В.Ю. Современные оптические телескопы / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.-80 с.
2. Михельсон, Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976.- 512 с.
3. Пат. 2125285 Российская Федерация, МПК⁶G02В 17/08, G02В 23/02. катодиоптрический телескоп / Клевцов Ю.А.; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН.-№96105080/28; заявл. 19.03.1996; опубл. 20.01.1999, Бюл. №8. – С. 6.
4. Пат. 2331094 Российская Федерация, МПК G02В 9/28, G02В 11/06. Апохроматический объектив / заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное предприятие «Новосибирский приборостроительный завод» (ФГУП «ПО «НПЗ»). - №2006121862/28; заявл. 27.12.2007; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. – С. 8.

© Л. В. Парко, М. С. Комбаров, И. В. Парко, 2015

АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ ПАНОРАМ С ПОМОЩЬЮ ВСЕНАПРАВЛЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Василий Петрович Лазаренко

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, аспирант, тел. (981)887-03-62, e-mail: saiberbest@gmail.com

Валерий Викторович Коротаев

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, доктор технических наук, заведующий кафедрой, e-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

Сергей Николаевич Ярышев

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, кандидат технических наук, доцент, e-mail: ysn63@mail.ru

Всенаправленные оптико-электронные системы находят применение в тех сферах, где критичен большой угол обзора. Однако изображение, даваемое всенаправленными оптико-электронными системами, имеет большую дисторсию, что затрудняет его визуальное восприятие человеком. Для решения этой проблемы предложен алгоритм синтеза панорамных изображений из исходных изображений, полученных всенаправленными оптическими системами. Представлены экспериментальные результаты работы алгоритма.

Ключевые слова: всенаправленные камеры, объективы типа «рыбий глаз», катадиоптрические камеры, преобразование изображений, панорамы.

ALGORITHM OF THE CREATION OF PANORAMAS WITH THE AID OF THE OMNIDIRECTIONAL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

Vasily P. Lazarenko

ITMO Universiti, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., post graduate, tel. (981)887-03-62, e-mail: saiberbest@gmail.com

Valery V. Korotaev

ITMO Universiti, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., doctor of technical Sciences, head of Department, e-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

Sergey N. Yaryshev

ITMO Universiti, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., candidate of technical Sciences, associate Professor, e-mail: ysn63@mail.ru

The omnidirectional cameras are used in areas where large field-of-view is important. But the distortion of omnidirectional cameras is great, which makes omnidirectional image unreadable. One way to view omnidirectional images in a readable form is the generation of panoramic images from omnidirectional images. The experimental results of the algorithm presented.

Key words: omnidirectional cameras, fisheye lens, catadioptric lens, image processing, panoramas.

Введение

Всенаправленные оптико-электронные системы находят применение в тех сферах, где критичен большой угол обзора. Однако всенаправленные оптико-электронные системы имеют большую дисторсию, что затрудняет их использование в наблюдательных телевизионных системах [1–3].

Большинство современных оптических систем могут приближенно быть описаны перспективной геометрической моделью (Рис. 1а), при этом дисторсией будет считаться отклонение от этой модели. Проекционная функция таких объективов может быть выражена следующим образом:

$$\tan \theta = \frac{r}{-f'}, \quad (1)$$

где r – высота изображения; f' – фокусное расстояние; θ – угол падения луча.

Из выражения (1) легко заметить, что при угле падения луча равном 90° мы получим бесконечный радиус изображения (так как радиус изображения пропорционален тангенсу угла падения луча). Из этого следует, что сверхширокоугольные объективы типа «рыбий глаз» с углом обзора не менее 180° не могут быть описаны с помощью отклонения от этой модели. Русиновым в работе [4] была предложена проекционная функция для сверхширокоугольных объективов типа «рыбий глаз», в которой радиус изображения пропорционален углу падений луча (рис. 1б):

$$\theta = \frac{r}{f'}.$$

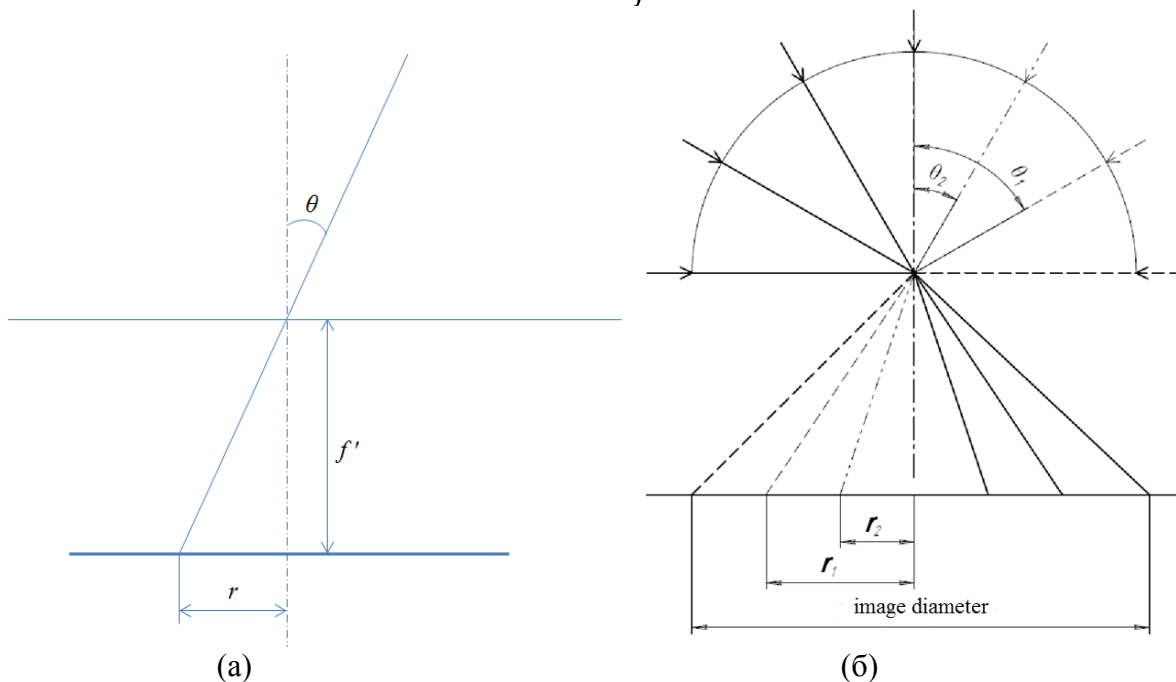


Рис. 1. (а) – перспективная геометрическая модель объектива; (б) – геометрическая модель сверхширокоугольного объектива типа «рыбий глаз»

В предыдущих работах [5,6] мы, как и некоторые другие авторы [7,8], использовали для алгоритма данную функцию, однако стало очевидно, что на практике функция передачи меняется в зависимости от конкретной модели объектива и, в общем случае, заранее неизвестна.

Чтобы решить эту проблему был разработан алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными камерами, в изображения с исправленной дисторсией соответствующие классической перспективной модели с использованием процедуры калибровки [9]. Однако, в некоторых случаях, удобным визуальным представлением всего поля зрения всенаправленной ОЭС является панорамное изображение, несмотря на то, что в нем не устраняется дисторсия. Поэтому в этой работе мы расширили алгоритм, для того, чтобы создавать цилиндрическое панорамное изображение.

Целью данной работы является разработка алгоритма создания цилиндрических панорамных изображений из исходных изображений, полученных камерами с всенаправленными объективами. Конечной целью являлась разработка модуля для ПО «Оптико-электронная система наблюдения «Тайфун», реализующего отображение панорамного изображения на основе всенаправленной камеры. Поэтому алгоритму предъявлялись дополнительные требования:

- алгоритм должен быть универсальным, то есть работать как с всенаправленными камерами с объективом типа «рыбий глаз», так и с катадиоптрическими оптическими системами;
- процесс калибровки должен быть доступен для неквалифицированных пользователей системы и не должен требовать применения специальных технических средств.

Алгоритм может найти применение в системах видеонаблюдения, в которых могут быть использованы различные модели, как камер, так и объективов к ним, при этом алгоритм универсален, для работы потребуется предварительно провести несложную процедуру калибровки. Кроме того, алгоритм может найти применение в различных сферах робототехники, где важен широкий угол обзора, но при этом есть необходимость устранения дисторсии, свойственной всенаправленным камерам.

Калибровка всенаправленных оптических систем

Поиск функции передачи объектива, связывающей трехмерные координаты точки в пространстве предметов с координатами ее изображения в плоскости приемника, является ключевым моментом для алгоритма преобразования изображений. Решается задача поиска функции передачи с помощью калибровки всенаправленной оптической системы.

Подробно процедура калибровки рассмотрена в нашей предыдущей работе [9]. Результатом калибровки ОЭС являются функции, задающих прямую (2) и обратную (3) связь трехмерных координат точки в пространстве предметов и координат ее изображения в системе координат фотоприемника.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = world2cam \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right), \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = cam2world \left(\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \right). \quad (3)$$

Алгоритм создания панорамных изображений

Алгоритм состоит из трех базовых частей. Первый этап – формирование облака трехмерных точек в пространстве предметов, соответствующих полю зрения цилиндрической панорамы.

Второй этап – нахождение координат изображений этих точек в плоскости фотоприемника. При этом используется передаточная функция всенаправленной оптико-электронной системы, найденная с помощью процедуры калибровки всенаправленных камер.

Третий этап – поэлементное (попиксельное) формирование выходного панорамного изображения из исходного всенаправленного изображения с использованием координат, полученных на втором этапе.

Первый этап: формирование облака точек, характеризующих поле зрения цилиндрической панорамы

Представьте прямоугольный лист $ABCC'B'A'$, сделанный из прозрачного материала, свернутый в цилиндрическую поверхность M и помещенный вокруг всенаправленной ОЭС в пределах её поля зрения (рис. 2). Луч, исходящий из центральной точки оптической системы к точке объекта P , пересекает эту цилиндрическую поверхность M в точке p . Пусть выходное панорамное изображение будет иметь разрешение H_{res} точек по горизонтали и V_{res} точек по вертикали. Тогда цилиндрическая поверхность M будет представлена массивом трехмерных точек (рис. 3):

$$M = \begin{bmatrix} p_{0,0} & \cdots & p_{H_{res}-1,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{0,V_{res}-1} & \cdots & p_{H_{res}-1,V_{res}-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$p_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

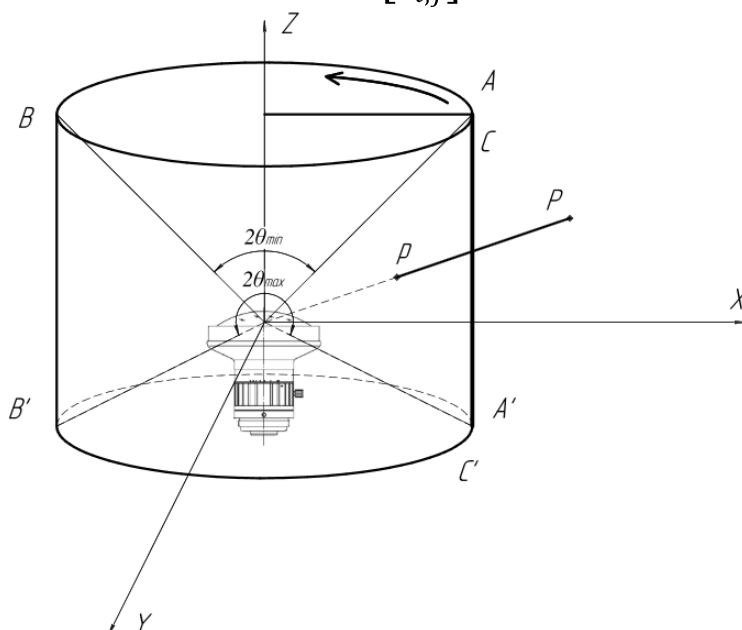


Рис. 2. Цилиндрическая проекционная поверхность панорамы $ABCC'B'A'$, помещенная вокруг всенаправленной ОЭС

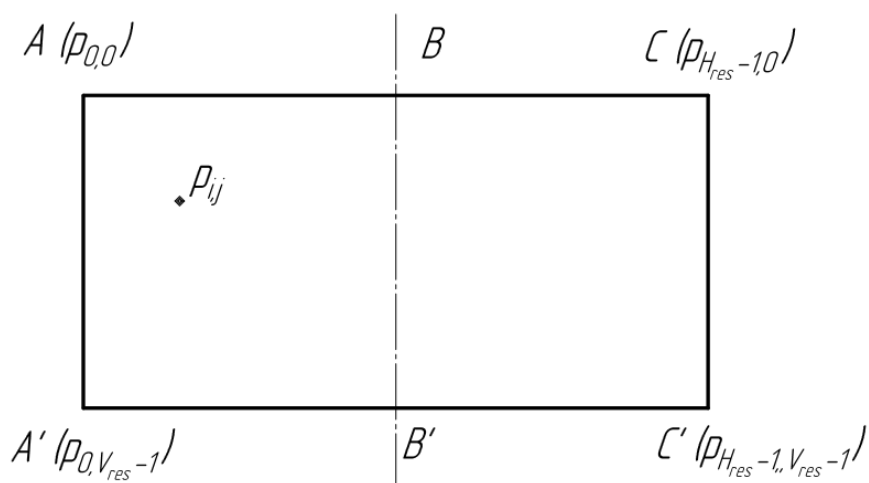


Рис. 3. Развернутая на плоскость проекционная поверхность панорамы M . При этом отрезок AA' соответствует первой колонке выходного панорамного изображения, а CC' – последней

Для того чтобы сформировать облако точек, нам необходимо задать начальные параметры. Исходя из того, что максимальное разрешение выходной панорамы достижимо на внешней окружности всенаправленного изображения (рис. 4), то имеет смысл задавать горизонтальное разрешение H_{res} не более чем:

$$H_{res} \leq 2\pi R_i, \quad (6)$$

где R_i – радиус всенаправленного изображения в пикселах.

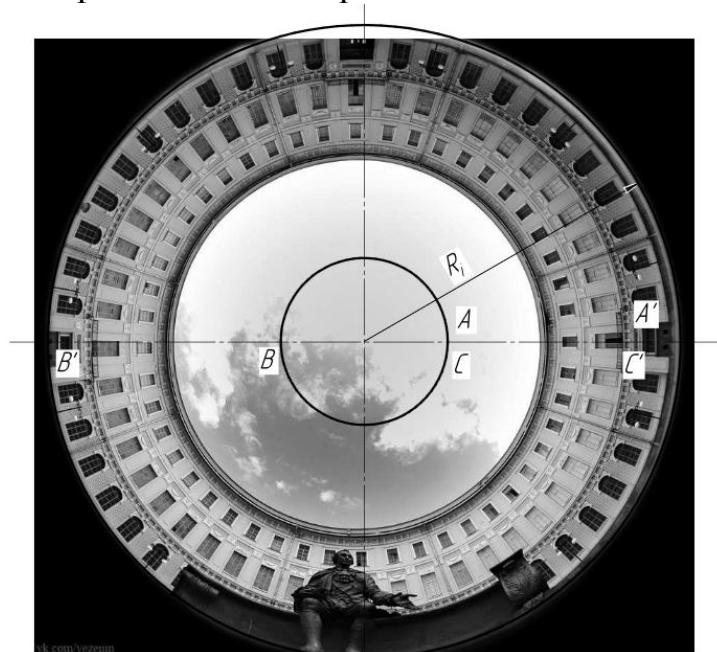


Рис. 4. Входное изображение, полученное с помощью камеры с объективом «рыбий глаз» (монумент графу Шувалову, установленный в круглом внутреннем дворе Санкт-Петербургской Академии Художеств)

Углы θ_{min} and θ_{max} определяются желаемым полем зрения выходной панорамы, однако они должны лежать в пределах поля зрения оптической системы. При этом угол θ_{min} не должен слишком малым, так как разрешение линии панорамы прямо пропорционально углу наблюдения.

Пусть радиус цилиндрической поверхности M равен 1, центр координат O совпадает со зрачком камеры, а ось Z совпадает с оптической осью камеры (рис. 5). Тогда высота цилиндра h_M составит:

$$h_M = AA' = (ctg(\theta_{min}) - ctg(\theta_{max})). \quad (7)$$

Найдем вертикальное разрешение V_{res} выходного панорамного изображения:

$$V_{res} = h_M \cdot \frac{H_{res}}{2\pi}. \quad (8)$$

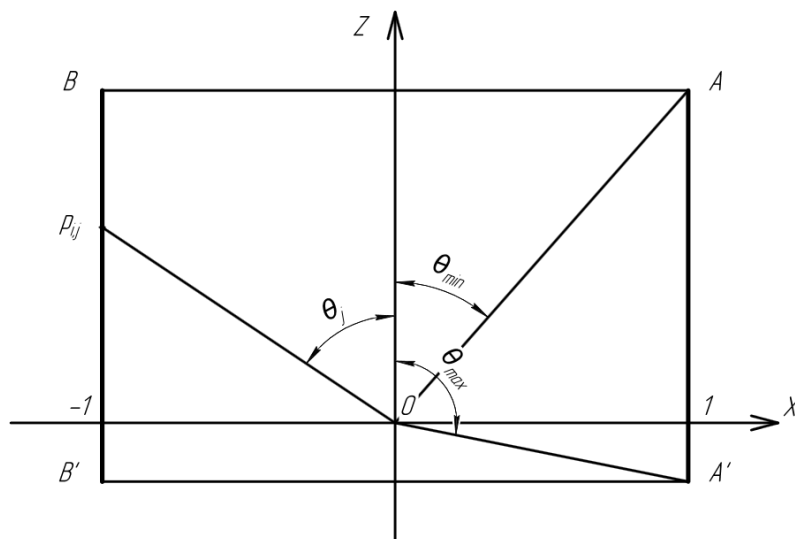


Рис. 5. Сечение цилиндрической поверхности M плоскостью ZOX .

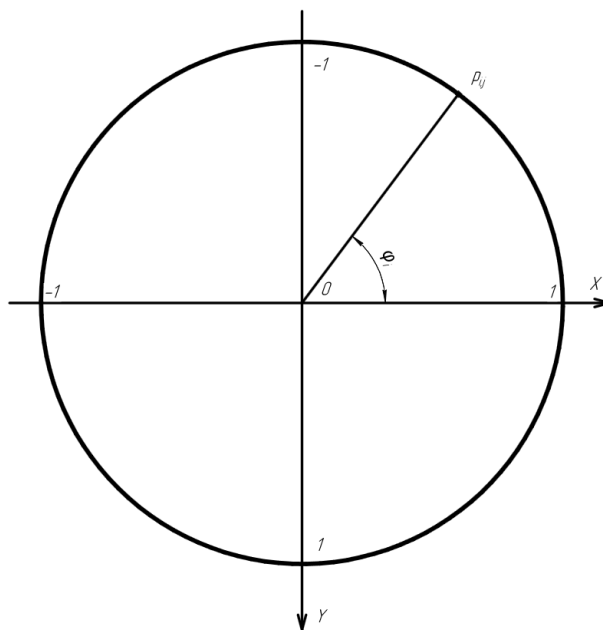


Рис. 6. Сечение цилиндрической поверхности M плоскостью XOY

Произведем расчет трехмерных координат точек $p_{i,j}$ цилиндрической поверхности M . Рассмотрев сечения XOY и ZOY (рис. 5 и 6), легко заметить, что координаты x и y зависят только от i , а координата z только от j :

$$p_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_j \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$x_i = \cos(\varphi_i) = \cos\left(2\pi \cdot \frac{i}{H_{res}}\right), \quad (11)$$

$$y_i = -\sin(\varphi_i) = -\sin\left(2\pi \cdot \frac{i}{H_{res}}\right), \quad (12)$$

$$z_j = ctg(\theta_{min}) - \frac{j}{V_{res}} \cdot h_M. \quad (13)$$

Второй этап: поиск координат изображений точек

Чтобы получить соответствие между пространственными координатами точки $p_{i,j}$, полученными в выражениях (11-13), и пиксельными координатами p' ее изображения в системе координат фотоприемника, применим функцию прямой связи координат (2), с параметрами, рассчитанными в результате калибровки:

$$p'_{i,j} = \begin{bmatrix} u'_{i,j} \\ v'_{i,j} \end{bmatrix} = world2cam(p_{i,j}) = world2cam\left(\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_j \end{bmatrix}\right).$$

Таким образом, мы получим массив M' , содержащий пиксельные координаты изображений точек для рассчитанного поля зрения:

$$M' = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_{0,0} \\ v'_{0,0} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res}-1,0} \\ v'_{H_{res}-1,0} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \begin{bmatrix} u'_{0,V_{res}-1} \\ v'_{0,V_{res}-1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res}-1,V_{res}-1} \\ v'_{H_{res}-1,V_{res}-1} \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

Третий этап: формирование исправленного изображения

Теперь нам осталось только сформировать результирующее изображение попиксельно из исходного всенаправленного изображения:

$$I' = \begin{bmatrix} L(u'_{0,0}, v'_{0,0}) & \dots & L(u'_{H_{res}-1,0}, v'_{H_{res}-1,0}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L(u'_{0,V_{res}-1}, v'_{0,V_{res}-1}) & \dots & L(u'_{H_{res}-1,V_{res}-1}, v'_{H_{res}-1,V_{res}-1}) \end{bmatrix},$$

где L – величина сигнала в данном пикселе фотоприемника (или исходного всенаправленного изображения) с координатами $u'_{i,j}, v'_{i,j}$.

При этом, повысить качество результирующего изображения возможно с помощью применения алгоритмов интерполяции, так как мы имеем дело с дробными значениями координат.

Экспериментальные результаты

Была произведена калибровка всенаправленной камеры с помощью инструментария «OScamCalib». Для этого было сделано 9 снимков тест-объекта в виде шахматной доски на калибруемую камеру. Нами была использована 2-х

мегапиксельная IP-камера с установленным на нее сверхширокоугольным объективом типа «рыбий глаз» (Fujinon FE185C046HA-1).

Калибровка была произведена со следующими результатами:

- координаты центра кругового изображения (пиксел): $x_c' = 580,718$, $y_c' = 770,693$;
- среднеквадратическая ошибка перепроецирования (пиксел): 0,794;
- аффинные коэффициенты: $c = 0,999779217318396$, $d = 0,0000913037$, $e = -0,00037467188$;
- коэффициенты полинома: $a_0 = -338,2953325845469$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0,00000010675995669$, $a_3 = -0,00000000007556347$, $a_4 = 0,00000000000015930$.

Как видно из результатов, среднеквадратическая ошибка перепроецирования (другими словами это точность функции прямой связи координат *world2cam*) оказалась менее одного пиксела, в чем можно убедиться на рис. 7(б). Подобной точности достаточно как для задач наблюдения, так и для большинства измерительных задач.

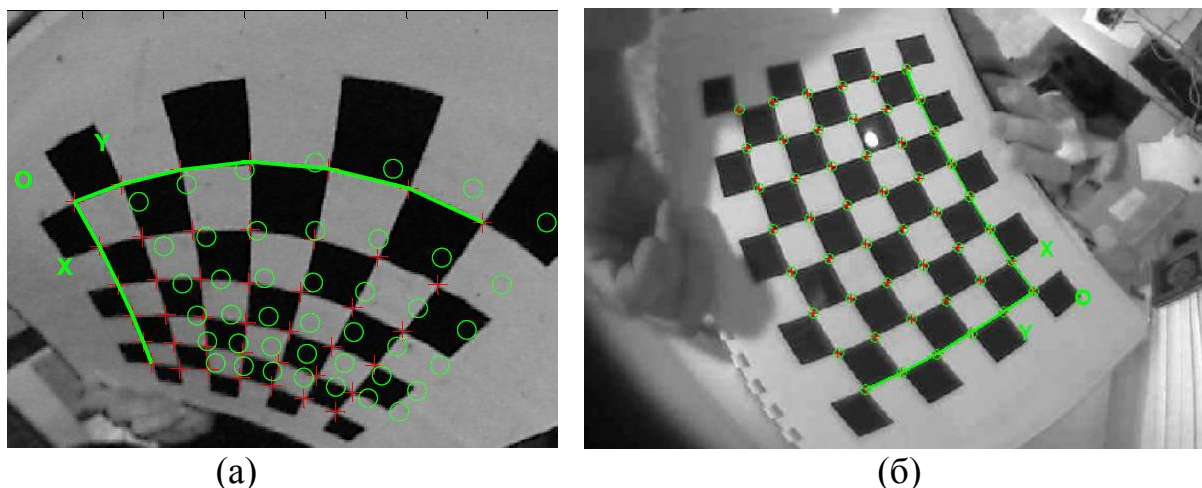


Рис. 7. Результаты калибровки с помощью инструментария «OCamCalib»

Красные кресты – найденные калибровочные точки тест-объекта, зеленые кружки – результат проецирования рассчитанных в процессе калибровки трехмерных координат калибровочных точек обратно на изображение. (а) - пример неверного определения калибровочных параметров. (б) – результат экспериментальной калибровки – положение калибровочных точек и перепроецированных точек совпадает, что подтверждает верное определение калибровочных параметров.

Далее параметры, найденные в результате калибровки, были использованы в алгоритме создания цилиндрических панорам. На рис. 8 приведен пример выходного изображения:

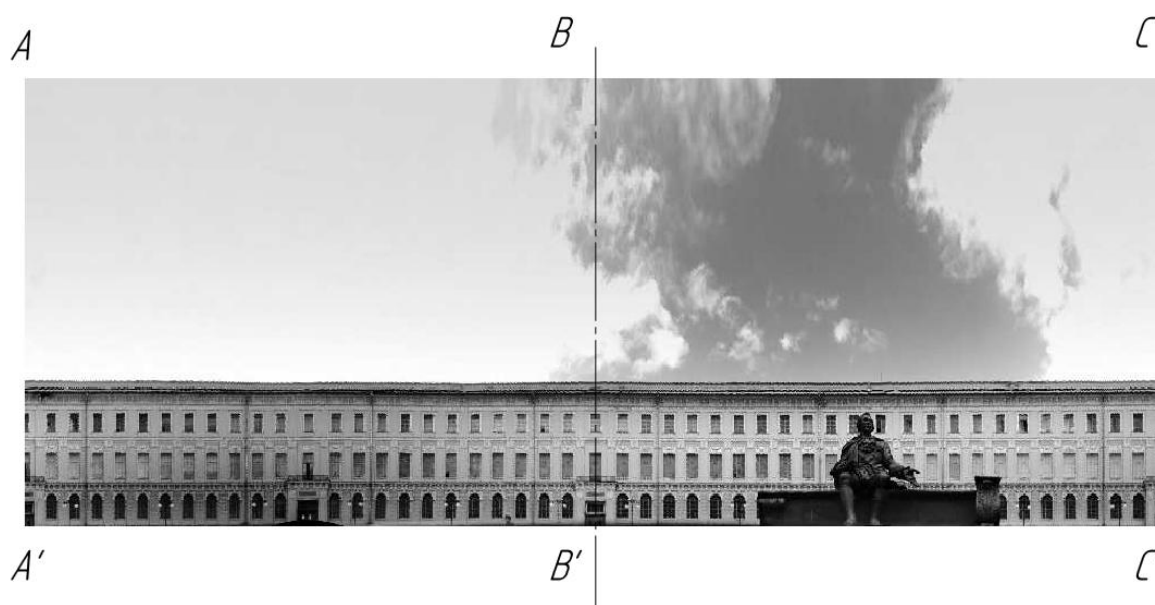


Рис. 8. Пример выходного изображения, полученного с помощью алгоритма создания цилиндрических панорам

Таким образом, разработанный алгоритм, позволяет создавать панорамные изображения с помощью всенаправленных камер.

Заключение

Разработан алгоритм преобразования изображений, полученных всенаправленными камерами, в цилиндрические панорамные изображения. Алгоритм подходит для работы с всенаправленными камерами, как с катадиоптрическими оптическими системами, так и с объективами типа «рыбий глаз».

Алгоритм был успешно применен в программном модуле для ПО «Оптико-электронная система наблюдения «Тайфун» [10], реализующем на основе всенаправленной камеры функцию отображения цилиндрического панорамного видеоизображения.

Алгоритм может найти применение в системах видеонаблюдения, в которых могут быть использованы различные модели, как камер, так и объективов к ним, при этом алгоритм универсален, для работы потребуется предварительно провести несложную процедуру калибровки.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S. The universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems // Proc. SPIE. 2009. № 7133. P. 908.
2. Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. Precision angular and linear measurements using universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems // Key Eng. Mater. 2010. № 437. P. 160–164.
3. Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. High precision multiray optoelectronic modules for distributed measuring systems // Proc. SPIE. 2010. Vol. 75441E, № 7544.
4. Русинов М. Техническая оптика: Учебное пособие. 1979.

5. Lazarenko V., Yarishev S., Djamiykov T. The Algorithm for Transforming a Hemispherical Field-of-View Image // Доклады XI национална конференция с международно участие Електроника 2012. Sofia, 2012. P. 35–38.
6. Лазаренко В.П., Ярышев С.Н. Алгоритм трансформации изображений с полусферическим полем зрения // XLI научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, 31 января - 3 февраля 2012 года Актуальные теоретические и практические вопросы современного оптико-электронного приборостроения. Сборник трудов молодых ученых / ed. проф. В.В. Коротаев. СПб: НИУ ИТМО, 2012. P. 103–105.
7. Schwalbe E. Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems // Camera. 2005. Vol. XXXVI. P. Part 5/W8.
8. Цудиков М.Б. Приведение изображения из камеры типа “рыбий глаз” к стандартному телевизионному // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Vol. 5, № 1.
9. Лазаренко В.П. et al. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Vol. 15, № 1. P. 82–90.
10. Голушко М.Н., Ярышев С.Н. Оптико-электронная система наблюдения “Тайфун” // Вопросы радиоэлектроники», серия “Техника телевидения.” 2014. Vol. 1. P. 38–42.

© В. П. Лазаренко, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев, 2015

ЗАКРУЧЕННЫЕ ПУЧКИ: ОТ РЕНТГЕНА ДО РАДИОДИАПАЗОНА

Борис Александрович Князев

Институт ядерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, профессор кафедры общей физики, тел. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Владимир Сергеевич Павельев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой наноинженерии; Учреждение Российской академии наук «Институт систем обработки изображений» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151, главный научный сотрудник, тел. (846)267-48-43, (846)332-56-20, e-mail: nipo@ssau.ru

Валерий Георгиевич Сербо

Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, тел. (383)329-75-55, e-mail: serbo@math.nsc.ru

Юлия Юрьевна Чопорова

Институт ядерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, младший научный сотрудник; Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, ассистент кафедры общей физики, тел. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: Yu.Yu.Choporova@inp.nsk.su

Борис Олегович Володкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, инженер кафедры наноинженерии, заместитель директора НОЦ нанотехнологий, тел. (846)267-48-43, e-mail: boris-volodkin@yandex.ru

Представлен обзор исследований и применений пучков с орбитальным угловым моментом (оптических вихрей или закрученных пучков). Приведены результаты первых экспериментов по формированию закрученных пучков в терагерцовом спектральном диапазоне с помощью лазера на свободных электронах.

Ключевые слова: пучки с орбитальным угловым моментом, закрученные пучки, лазер на свободных электронах, терагерцовый диапазон.

VORTEX BEAMS: FROM X-RAYS TO RADIOWAVES

Boris A. Knyazev

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentyeva Prospekt, 11, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Principal Scientist; Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Professor of General Physics Department, tel. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Vladimir S. Pavelyev

Samara State Aerospace University, 443086, Russia, Samara, 34, Moskovskoye shosse, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Principal Scientist, Head of Nanoengineering; Image Processing Systems Institute of the RAS, 443001, Russia, Samara, 151 Molodogvardeyskaya St., Principal Scientist, tel. (846)267-48-43, (846)332-56-20, e-mail: nano@ssau.ru

Valery G. Serbo

Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Professor of Theoretical Physics Chair, tel. (383)329-75-55, e-mail: serbo@math.nsc.ru

Yulia Yu. Choporova

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, 11 Lavrentyeva Prospekt, Junior Scientist; Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Assistant Professor of General Physics Department, tel. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: Yu.Yu.Choporova@inp.nsk.su

Boris O. Volodkin

Samara State Aerospace University, 443086, Russia, Samara, 34 Moskovskoye shosse, engineer of Nanoengineering Department, vice-director of REC «Nanotechnology», tel. (846)267-48-43, e-mail: boris-volodkin@yandex.ru

A review on studies and applications of the beams with orbital angular momentum (vortex or twisted beams) is presented. First experimental results on the formation of vortex beams in the terahertz spectral range using a free electron laser is described.

Key words: beams with angular orbital momentum, vortex beams, free electron laser, terahertz range.

Тот факт, что оптическое излучение может нести спиновый угловой момент (СУМ), известен давно. Пучки с линейной и круговой поляризацией могут быть описаны в терминах СУМ. Упоминание об этом можно найти еще в статье Пойнтинга 1909 года [1]. Первый эксперимент, показавший, что циркулярно поляризованные пучки света (пучки с СУМ) могут передавать момент количества движения механической системе, был выполнен в 1936 году [2]. В этом эксперименте поляризованный по кругу световой пучок проходил через подвешенную за ось четвертьволновую пластинку, зеркально отражался и проходил через пластинку еще раз, но со сменившимся направлением поляризации, в результате чего пластинке передавался механический момент вращения. Кроме спинового момента излучение может также нести орбитальный угловой момент (ОУМ). В «долазерную» эру получить и исследовать пучки с орбитальным моментом было достаточно сложно, и широкий интерес к пучкам с ОУМ мог возникнуть только после появления лазеров. Всплеск интереса к пучкам с орбитальным угловым моментом возник после публикации [3] вышедшей в 1992 году, которая в современной литературе считается пионерской и широко цитируется. В этой публикации был предложен способ получения пучков с высокими значениями ОУМ путем трансформации Лаггер-Гауссовских лазерных мод, предложена схема эксперимента по измерению этого момента путем передачи его механической системе, а также обсуждались некоторые возможные применения пучков

с ОУМ, которые часто называются пучками закрученных фотонов. Вообще говоря, о «закрученных пучках» упоминалось и ранее. В качестве примера укажем на работы Б. Я. Зельдовича с соавторами (см., например [4]) и Баженова с соавторами [5], но статья Аллена, действительно, вызвала широкий интерес и инициировала дальнейшие исследования.

Вскоре после выхода статьи [3] появились многочисленные публикации о методах генерации пучков «закрученных фотонов» в оптическом диапазоне [6-19], в том числе в планарном ондуляторе на лазере на свободных электронах [20]. Недавно заявлено о генерации в спиральном ондуляторе излучения с ОУМ с энергией фотонов 99 эВ [21]. Интерес к закрученным фотонам и электронам растет. Это связано с появлением новых эффектов в хорошо изученных фундаментальных атомных процессах. Например, в процессе фотовозбуждения атома закрученными фотонами возникают новые правила отбора, могут возбуждаться новые атомные уровни и изменяться поляризация излученных в послесвечении фотонов [22]. Для процессов фотоэффекта и радиационной рекомбинации с начальными закрученными частицами изменяется угловое распределение конечных частиц [23, 24]. Вопросы, связанные с пучками не света, а частиц с орбитальным угловым моментом выходят за рамки данного проекта, и обзор этих работ мы опускаем. Появляются предложения по использованию закрученных фотонов в различных приложениях. Многочисленные примеры такого рода детально обсуждаются в недавно опубликованной книге [25].

Пучки с ОУМ несколько лет назад получены и в радиодиапазоне [26, 27]. В частности, в работе [22] закрученные пучки радиоизлучения использовались для исследования ионосферы, а в работе [28] (с приложением эффектного видеофильма, доступного по ссылке (<http://iopscience.iop.org/1367-2630/14/3/033001>), авторы продемонстрировали использование дополнительной степени свободы в виде ОУМ для увеличения плотности каналов связи (впрочем, эффективность этого способа оспаривалась в работах, цитировать которые мы здесь не будем). В работах [29, 30] выполнен теоретический анализ распространения пучков с ОУМ через турбулентную атмосферу, в том числе с целью исследовать коммуникационные возможности оптических пучков с ОУМ.

Реализация возможности использования передачи ОУМ пучка молекулам и частицам продемонстрирована в работах [31, 32]. Много работ посвящено пучкам с орбитальным угловым моментом в оптических волокнах. В частности, в работе [33] приведены результаты исследования пучков с ОУМ, сформированных с помощью дифракционных оптических элементов, в ступенчатых волноводах. В [33] на результатах анализа экспериментальных данных показана возможность уплотнения каналов передачи информации в ступенчатых оптоволоконных с помощью формирования и селекции пучков с ОУМ методами дифракционной оптики.

Более детальный обзор этих работ не входит в наши задачи. Обширную информацию по световым пучкам с орбитальным угловым моментом можно найти в обзорах [34, 35]. Одним из направлений исследований в области пучков с ОУМ является исследование их взаимодействия с киральными средами, с том

числе с молекулами-энантиомерами. Анализ литературы показывает, что публикаций на эту тему не очень много. Почти исчерпывающий список содержит четыре теоретические и экспериментальные работы [36–39]. Во всех этих работах круговой дихроизм, связанный с орбитальным угловым моментом, для киральных молекул не был зарегистрирован. Заметим, что работа [40] описывает изменение орбитального углового момента после полного внутреннего отражения, что также интересно для практических приложений.

Отметим, что все упомянутые выше работы относятся к оптическому спектральному диапазону. Особый интерес для нас представляет терагерцовый диапазон, поскольку в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (Институт ядерной физики) запущен лазер на свободных электронах, являющийся сегодня самым мощным в мире источником излучения этого спектрального диапазона. Анализ литературы показывает, что имеется всего три работы по закрученным пучкам, выполненные с использованием излучения этого диапазона [41–43]. Эти работы посвящены демонстрации возможности формирования пучков с ОУМ. Все они выполнены с использованием широкополосных источников терагерцового излучения. В работе [41] была продемонстрирована генерация закрученного терагерцового пучка с помощью размещенной на плоскости структуры V-образных антенн с фазовым сдвигом от $-3\pi/4$ до π с интервалом $\pi/4$. Антенны представляли собой прорези в проводящей пластинке. Такая структура с восемью уровнями сдвига фазы является грубым аналогом спиральной фазовой пластинки первого порядка – самого простого устройства для получения пучков с ОУМ. Вследствие малой суммарной площади отверстий коэффициент пропускания структуры не может быть высоким, даже с учетом плазмонного резонанса. Широкополосное излучение (пикосекундный импульс) проходил через пластинку и фокусировался линзой на кристалл ZnTe, использовавшийся для визуализации терагерцового пучка в стандартной time-domain спектроскопии (TDS). Авторы перемещали антенную структуру вместе с линзой относительно кристалла и путем многочисленных измерений и извлечения из фурье-спектра частоты 0,75 ТГц получали, в конце концов, изображение интенсивности пучка. Анализ корреляционных коэффициентов показал, что основной модой ОУМ является +1 с очень малой примесью мод -1, -2, -3 и +3. В фокусе линзы авторы наблюдали скачок фазы в соответствии с эффектом Гюи. С помощью двух других антенных структур были получены моды $l = 2$ и $l = 3$.

В работе [42] авторы использовали другой метод генерации пучка с ОУМ. Сформировав в качестве исходного пучок с радиальным распределением электрического вектора способом, описанным в [44], и пропустив его через четвертьволновую пластинку и поляризатор под углом 45 градусов, они получили линейно поляризованное излучения с фазой, изменявшейся по азимуту на 2π . В результате они получили закрученный пучок в спектральном интервале от 0,75 до 2 ТГц с максимумом при 1,5 ТГц, где эффективность преобразования была 95%.

Наконец, в работе [43] пучок закрученных фотонов был получен с помощью классической спиральной фазовой пластинки из пластика (цурупика), в результате чего были получены моды плюс-минус 1 и 2 при частотах 2 или 4 ТГц, зарегистрированные с помощью терагерцовой камеры.

Этими тремя работами на сегодня и ограничиваются в мировой науке исследования пучков с ОУМ в терагерцовом диапазоне. Заметим, что мощность пучков, использованных в этих работах очень низка по сравнению с мощностью пучка нашего лазера на свободных электронах. Таким образом, поле для фундаментальных исследований с использованием пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в сравнении с такими же исследованиями с пучками линейной и круговой поляризации (СОМ) остается открытым. Особый интерес представляет использование достаточно интенсивных пучков монохроматического перестраиваемого по частоте излучения, что позволяет избавиться от ряда недостатков, присущих системам TDS, и выполнять эксперименты с регистрацией изображений в реальном времени.

Нами были выполнены эксперименты по формированию пучков с орбитальным угловым моментом на Новосибирском лазере на свободных электронах [45], монохроматическое излучение которого может плавно перестраиваться в диапазоне 90 – 240 мкм. Пучок формировался с помощью дифракционного оптического элемента, функционально представлявшего собой бинарную фазовую зонную пластинку Френеля со спиральными зонами. Расчёт бинарного микро рельефа производился с использованием метода, описанного в [46]. Для расчёта использовались следующие параметры оптического элемента: диаметр апертуры – 38 мм, рабочая длина волны – 141 мкм.

Расчётная высота микро рельефа радиально-симметричного ДОЭ определяется формулой [47] $h(r) = \lambda \Phi(r, \varphi) / 2\pi(n - 1)$, где n – показатель преломления материала подложки, $\Phi(r, \varphi)$ – фазовая функция ДОЭ, а φ – азимутальный угол. В данной работе были использованы подложки из кремния HRFZ-Si [48] с двухсторонней полировкой оптического качества диаметром 38 мм и толщиной 1 мм. Бинарный микро рельефа высотой 29,1 мкм на поверхности подложки формировался с помощью реактивно-ионного травления кремния (РИТ) [49], ранее использованного в [50, 51] для изготовления бинарных дифракционных линз и делителей пучка терагерцового диапазона.

Гауссов пучок лазера на свободных электронах падает на фазовую пластинку (рис. 1), после прохождения которой формируется закрученный пучок с заданным топологическим зарядом l . Распределение интенсивности пучка регистрируется матрицей микро болометров [52, 53] с рабочей площадью $16,36 \times 12,24$ мм². Распределение интенсивности пучка по радиусу хорошо описывается функцией Бесселя первого рода, порядок которой соответствует топологическому заряду пучка $(J_l(k_r r))^2$.

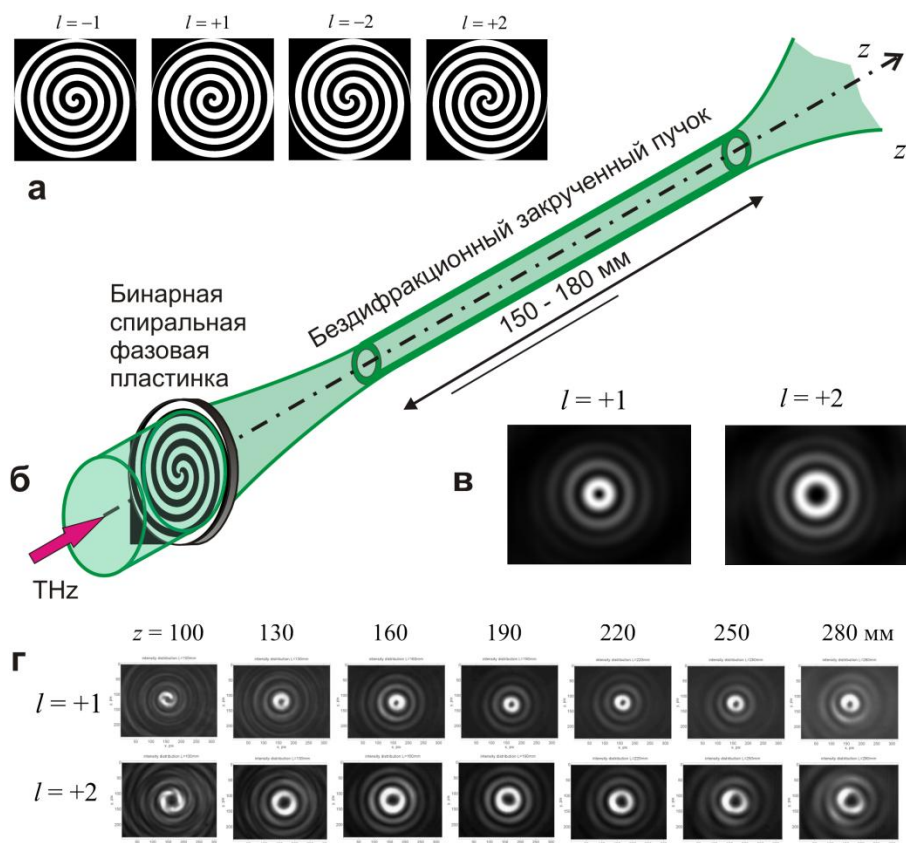


Рис. 1. Формирование закрученного пучка:

(а) бинарные фазовые зонные пластинки для формирования закрученных пучков с разными топологическими зарядами l ; (б) схема эксперимента, (в) распределение интенсивности в пучках с топологическими зарядами $l = \pm 1$ и $l = \pm 2$; (г) сечение пучка как функция расстояния

Экспериментально обнаружено, что распределение интенсивности в пучке сохраняется на расстоянии до 180 мм, после чего по причине ограниченности пучка по радиусу он начинает дифрагировать. Иными словами в определенных пределах пучок может считаться «бездифракционным». Подобные пучки можно использовать для мониторинга объектов сложной формы, для формирования ловушек для микрообъектов, а также для применения в лазерных радарах (лидарах) терагерцового диапазона. Распределение электрического поля по сечению пучка точно соответствует теоретическому значению $E(r, \varphi, z, t) = J_l(k_r r) \exp[i(l\varphi + k_z z - \omega t)]$. Это было экспериментально подтверждено, исследуя интерференцию закрученного пучка с плоской волной в интерферометре Маха-Цендера. Таким образом, описанные эксперименты позволили создать закрученные монохроматические пучки терагерцового диапазона, которые в ближайшее время будут использованы для решения прикладных задач.

Читателей, интересующихся взаимодействием закрученных фотонов с электронами и атомами, мы адресуем, например, к работам [54, 55].

БЛАГОДАРНОСТИ

Экспериментальные исследования поддержаны Минобрнауки РФ и грантом РФФИ 15-02-06444. Разработка и изготовление ДОО выполнены при поддержке Минобрнауки РФ, в том числе в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг., Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № 1879 и гранта РФФИ 13-02-97007. Оборудование для исследования характеристик ДОО изготовлено при поддержке гранта Российского научного фонда 14-50-00080. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский Центр синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП СЦСТИ)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poynting J. H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light // *Proc. Royal Society A*, 1909. – Т. 82. – С. 560–567.
2. Beth R. A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light // *Physical Review*. – 1936. – V. 50 – С. 115–127.
3. Allen L., Beijersbergen M. W., Spreeuw R. J. C., Woerdman J. P. Orbital angular-momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Physical Review A*. – 1992. – V. 45, № 11. – С. 8185–8189.
4. Baranova N. B., Zel'dovich B. Ya. Dislocations of the wave-front surface and zeros of the amplitude // *Soviet Physics JETP*. – 1981. – V. 53, № 5. – P. 925–929.
5. Баженов В. Ю., Васнецов М. В., Соскин М. С. Лазерные пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта // *Письма в ЖТФ*. – 1990. – Т. 52, № 8. – С. 1037–1039.
6. Алексеев А. Н., Алексеев К. Н., Бородавка А. С., Воляр А. В., Фридман Ю. А. Конверсия пучков Эрмита-Гаусса и Лагерра-Гаусса в астигматичной оптической системе: 1 эксперимент // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т. 24, № 17. – С. 68–73.
7. Воляр А. В., Шведов В. Г., Фадеева Т. А. Вращение волнового фронта оптического вихря в свободном пространстве // *Письма в ЖТФ*. – 1999. – Т. 25, № 5. – С. 87–94.
8. Kennedy S. A., Szabo M. J., Teslow H., Porterfield J. Z., Abraham E. R. I. Creation of Laguerre-Gaussian laser modes using diffractive optics // *Physical Review A*. – 2002. – Oct. – Т. 66, № 4.
9. Berry M. V., Jeffrey M. R., Mansuripur M. Orbital and spin angular momentum in conical diffraction // *J. Opt. A-Pure and Applied Optics*. – 2005. – Nov. – Т. 7, № 11. – С. 685–690.
10. Marrucci L., Manzo C., Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media // *Physical Review Letters*. – 2006. – Apr 28. – V. 96, № 16. – 163905.
11. Allen L., Padgett M. Equivalent geometric transformations for spin and orbital angular momentum of light // *J. Modern Optics*. – 2007. – Mar 10. – V. 54, № 4. – С. 487–491.
12. Wang X.-L., Chen J., Li Y., Ding J., Guo C.-S., Wang H.-T. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization // *Physical Review Letters*. – 2010. – Dec 13. – V. 105, № 25. – 253602, 4 pp.
13. Marrucci L., Karimi E., Slussarenko S., Piccirillo B., Santamato E., Nagali E., Sciarrino F. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications // *Journal of Optics* – 2011. – June. – V. 13, № 6. – 064001, 13 pp.

14. Mirhosseini M., Magana-Loaiza O. S., Chen C., Rodenburg B., Malik M., Boyd R. W. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum // *Optics Express*. – 2013. – Dec. 16. – T. 21, № 25. – C. 30196–30203.
15. Khonina S. N. Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // *Optical Engineering*. – 2013. – Sep. – V. 52, № 9. – 091711.
16. Yu H., Zhang H., Wang Y., Han S., Yang H., Xu X., Wang Z., Petrov V., Wang J. Optical orbital angular momentum conservation during the transfer process from plasmonic vortex lens to light // *Sci. Reports*. – 2013. – Nov. 12. – V. 3. – 3191.
17. Mokhun I., Arkhelyuk A. D., Galushko Y., Kharitonova Y., Viktorovskaya Y. Angular momentum of an incoherent Gaussian beam // *Applied Optics*. – 2014. – Apr. 1. – T. 53, № 10. – C. B38–B42.
18. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces // *Nature Materials*. – 2014. – Feb. – V. 13, № 2. – P. 139–150.
19. Хонина С. Н., Алмазов А. А. Формирование гауссовых пучков с помощью винтовых ДОО // *Компьютерная оптика*. – 2002. – № 24. – С. 102–109.
20. Hemsing E., Knyazik A., Dunning M., Xiang D., Marinelli A., Hast C., Rosenzweig J. B. Coherent optical vortices from relativistic electron beams // *Nature Physics*. – 2013. – Sep. – V. 9, № 9. – P. 549–553.
21. Bahrdt J., Holldack K., Kuske P., Mueller R., Scheer M., Schmid P. First Observation of Photons Carrying Orbital Angular Momentum in Undulator Radiation // *Physical Review Letters*. – 2013. – July 15. – V. 111, № 3. – 034801.
22. Scholz-Marggraf H. M., Fritzsche S., Serbo V. G., Afanasev A., Surzhykov A. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms // *Physical Review A*. – 2014. – V. 90. – 013425.
23. Matula O., Hayrapetyan A.G., Serbo V.G., Surzhykov A., Fritzsche S. Atomic ionization of hydrogen-like ions by twisted photons: angular distribution of emitted electrons // *J. Phys. B-Atomic Molecular and Optical Physics*. – 2013. – V. 46. – 05002.
24. Matula O., Hayrapetyan A.G., Serbo V.G., Surzhykov A., Fritzsche S. Radiative capture of twisted electrons by bare ions // *New Journal of Physics*. – 2014. – V. 16. – 053024.
25. Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum. Ed. by J. P. Torres and L. Torner. – Wiley-VCH Weinheim, Germany, 2011. – 243 p.
26. Leyser T. B., Norin L., McCarrick M., Pedersen T. R., Gustavsson B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum // *Physical Review Letters*. – 2009. – Feb 13. – V. 102, № 6. – 065004.
27. Thide B., Then H., Sjöholm J., Palmer K., Bergman J., Carozzi T. D., Istomin Y. N., Ibragimov N. H., Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain // *Physical Review Letters*. – 2007. – Aug 24. – V. 99, № 8. – 087701.
28. Tamburini F., Mari E., Sponselli A., Thide B., Bianchini A., Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test // *New Journal of Physics*. – 2012. – Mar. 1. – V. 14. – 033001.
29. Gbur G., Tyson R. K. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation // *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*. – 2008. – Jan. – V. 25, № 1. – P. 225–230.
30. Аксенов В. П., Погуца Ч. Е. Флуктуации орбитального углового момента лазерного пучка, несущего оптический вихрь, в турбулентной атмосфере // *Квантовая электроника*. – 2008. – Т. 38, № 4. – С. 343–348.
31. Babiker M., Bennett C. R., Andrews D. L., Romero L. C. D. Orbital angular momentum exchange in the interaction of twisted light with molecules // *Physical Review Letters*. – 2002. – Sep 30. – V. 89, № 14. – 043601.

32. Скиданов Р. В., Хонина С. Н., Морозов А. А. Оптическое вращение микрочастиц в гипергеометрических пучках, сформированных дифракционными оптическими элементами с многоуровневым микрорельефом // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, №. 10. – С. 3–8.
33. Карпеев С. В. Анализ и формирование многомодовых лазерных пучков методами дифракционной оптики. – М.: Радио и связь, 2005. – 120 с.
34. Yao A. M., Padgett M. J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – June. – V. 3, № 2. – P. 161–204.
35. Molina-Terriza G., Torres J. P., Torner L. Twisted photons // *Nature Physics*. – 2007. – May. – V. 3, № 5. – P. 305–310.
36. Andrews D. L., Romero L. C. D., Babiker M. On optical vortex interactions with chiral matter // *Optics Communications*. – 2004. – July 1. – V. 237, № 1–3. – P. 133–139.
37. Araoka F., Verbiest T., Clays K., Persoons A. Interactions of twisted light with chiral molecules: An experimental investigation // *Physical Review A*. – 2005. – May. – V. 71, № 5. – 055401.
38. Löffler W., Woerdman J. P. Cholesteric polymers and the orbital angular momentum of light // *Complex Light and Optical Forces VI*. – 2012. – V. 8274. – 827404.
39. Andrews D. L., Coles M. M. Measures of chirality and angular momentum in the electromagnetic field // *Optics Letters*. – 2012. – Aug. 1. – V. 37, № 15. – P. 3009–3011.
40. Löffler W., Hermosa N., Aiello A., Woerdman J. P. Total internal reflection of orbital angular momentum beams // *Journal of Optics*. – 2013. – Jan. – V. 15, № 1. – 014012.
41. He J., Wang X., Hu D., Ye J., Feng S., Kan Q., Zhang Y. Generation and evolution of the terahertz vortex beam // *Optics Express*. – 2013. – Aug. 26. – V. 21, № 17. – P. 20230–20239.
42. Imai R., Kanda N., Higuchi T., Konishi K., Kuwata-Gonokami M. Generation of broadband terahertz vortex beams // *Optics Letters*. – 2014. – July 1. – V. 39, № 13. – P. 3714–3717.
43. Miyamoto K., Suizu K., Akiba T., Omatsu T. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate // *Applied Physical Letters*. – 2014. – June 30. – V. 104, № 26. – 261104.
44. Imai R., Kanda N., Higuchi T., Zheng Z., Konishi K., Kuwata-Gonokami M. Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry // *Optics Express*. – 2012. – Sep. 24. – V. 20, № 20. – P. 21896–21904.
45. Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // *Measurement Science and Technology*. – 2010 – V. 21. – 054017. – 13 p.
46. Heckenberg, R. N., McDuff, R., Smith, C. P. & White, A. G. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms // *Optics Letters*. – 1992. – V. 17. – P. 221–223.
47. Дифракционная компьютерная оптика / Головашкин Д. Л., Досколович Л. Л., Казанский Н. Л., Котляр В. В., Павельев В. С., Скиданов Р. В., Сойфер В. А., Хонина С. Н.: под ред. В. А. Сойфера. – М., Физматлит, 2007.
48. Silicon [Electronical resource]. – <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>
49. Ayón A. A. Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher / A. A. Ayón, R. Braff, C. C. Lin, H. H. Sawin, M. A. Schmidt // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1999. – V. 146, Issue 1. – P. 339–349.
50. Агафонов А. Н., Володкин Б. О., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Павельев В. С., Тукмаков К. Н., Чопорова Ю. Ю. // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 763–769.
51. Агафонов А. Н., Володкин Б. О., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Павельев В. С., Сойфер В. А., Тукмаков К. Н., Цыганкова Е. В., Чопорова Ю. Ю. Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, №2. – С. 98–105.

52. Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // *Applied Physics Letters*. – 2008. – V. 92. – 131116.
53. Knyazev B. A., Cherkassky V. S., Choporova Yu. Yu., Gerasimov V. V., Vlasenko M. G., Dem'yanenko M. A., Esaev D. G. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – V. 32, Issue 10. – P. 1207–1222.
54. Jentschura U. D., Serbo V. G. Generation of High--Energy Photons with Large Orbital Angular Momentum by Compton Backscattering // *Physical Review Letters*. – 2011. – V.106. – 013001.
55. Scholz-Marggraf H. M., Fritzsche S., Serbo V. G., Afanasev A., Surzhykov A. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms // *Physical Review A*. – 2014. – V. 90. – P. 013425.

© Б. А. Князев, В. С. Павельев, В. Г. Сербо, Ю. Ю. Чопорова, Б. О. Володкин, 2015

ТРЕНАЖЁР ДЛЯ СТРЕЛЬБЫ ПРЯМОЙ НАВОДКОЙ ПО ДВИЖУЩИМСЯ ЦЕЛЯМ

Олег Кузьмич Ушаков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (903)931-08-52, e-mail: ushakovo@bk.ru

Павел Вадимович Петров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

В статье рассматривается постановка задачи по созданию учебного тренажёра для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям. Тренажёр необходим как элемент методического обеспечения спецкурсов по кафедре наносистем и опtotехники, а также кафедре спецuстройств и технологий.

Ключевые слова: тренажёр, стрельба прямой наводкой, движущаяся цель, схема стрельбы, функциональная схема тренажёра.

TRAINER FOR FIRING DIRECT AIMING ON MOVING-TARGETS

Oleg K. Ushakov

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plachotnogo St., candidate of engineerings sciences, associate professor of department of the nanosistem and optotekhniki, tel. (903)931-08-52, e-mail: ushakovo@bk.ru

Pavel V. Petrov

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plachotnogo St., candidate of engineerings sciences, associate professor of department of metrologii and technology of optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

The article discusses the formulation of the problem to create a training simulator for direct fire at moving targets. The simulator is required as an element of methodological support of specialized courses in the Department of nanosystems and optical engineering, as well as the Department of spetsustroystv and technologies.

Key words: fitness machine, direct fire, moving target, firing circuit, functional diagram simulator.

Данный проект тренажёра предлагается как элемент учебно-методического обеспечения спецкурсов по кафедре наносистем и опtotехники, а также – кафедре спецuстройств и технологий. Наиболее предпочтительный принцип действия тренажёра – имитационный, а вариант исполнения – компьютерная модель. При наличии соответствующей аппаратной части не исключается реальный вариант светосигнального тренажёра.

Прямой наводкой является такая, при которой траектория полёта снаряда не превышает высоту цели. Для наведения орудия на подвижную цель необхо-

димо в прицеле установить угол места цели ($\alpha_{ц}$) и угол упреждения ($\alpha_{у}$). На рис. 1 показана схема стрельбы. Необходимо заметить, что визирная ось прицела должна быть согласована с осью канала ствола орудия.

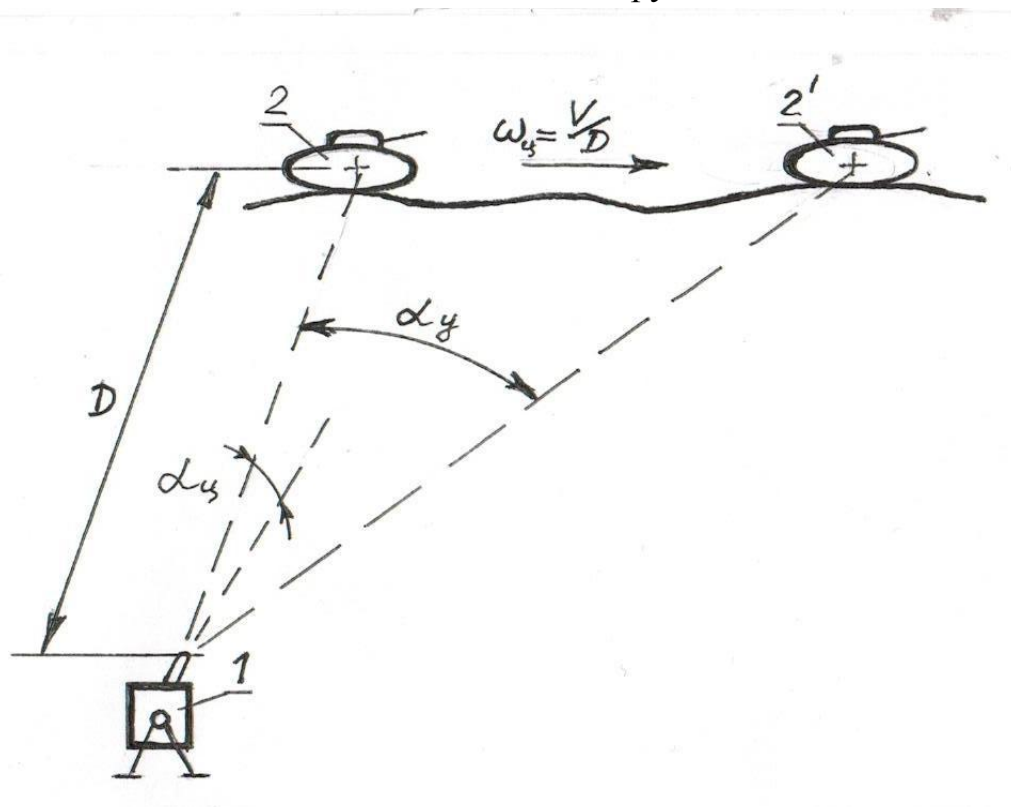


Рис. 1. Схема стрельбы по подвижной цели:

- 1 – прицел и орудие; 2 – цель; 2' – цель после перемещения за время t;
 $\alpha_{ц}$ – угол места цели; $\alpha_{у}$ – угол упреждения; D – дальность до цели;
V – линейная скорость цели; $W_{ц}$ – угловая скорость цели

Измерение дальности до цели обычно не представляет трудности. Её определяют с помощью лазерных дальномеров, стереодальномеров, радиолокацией, при помощи дальномерной шкалы прицела и т.д.

Угол места цели зависит от дальности до цели и от баллистики используемого при стрельбе снаряда.

Угол упреждения определяется либо наводчиком по шкале прицела в поле зрения (субъективно, с внесением дополнительных погрешностей), либо слежением (сопровождением) за целью при помощи поворота подвижной части орудия вместе с прицелом, т.е. выравниванием угловых скоростей поворота орудия и движения цели. Последнее приводит к значительному усложнению конструкции тренажёра.

Принцип действия тренажёра основан на определении угла упреждения движущейся цели по световому сигналу в поле зрения прицельного устройства. Время свечения сигнала в поле зрения соответствует полётному времени снаряда на определённую дальность.

Для создания тренажёра необходимо смоделировать условия стрельбы, конкретизировать вид и размеры цели, выбрать диапазон реальных угловых скоростей цели, разработать устройство определения угла упреждения.

Оптико-кинематическая схема тренажёра будет представлена отдельно.

Функциональная схема тренажёра приведена на рис. 2.

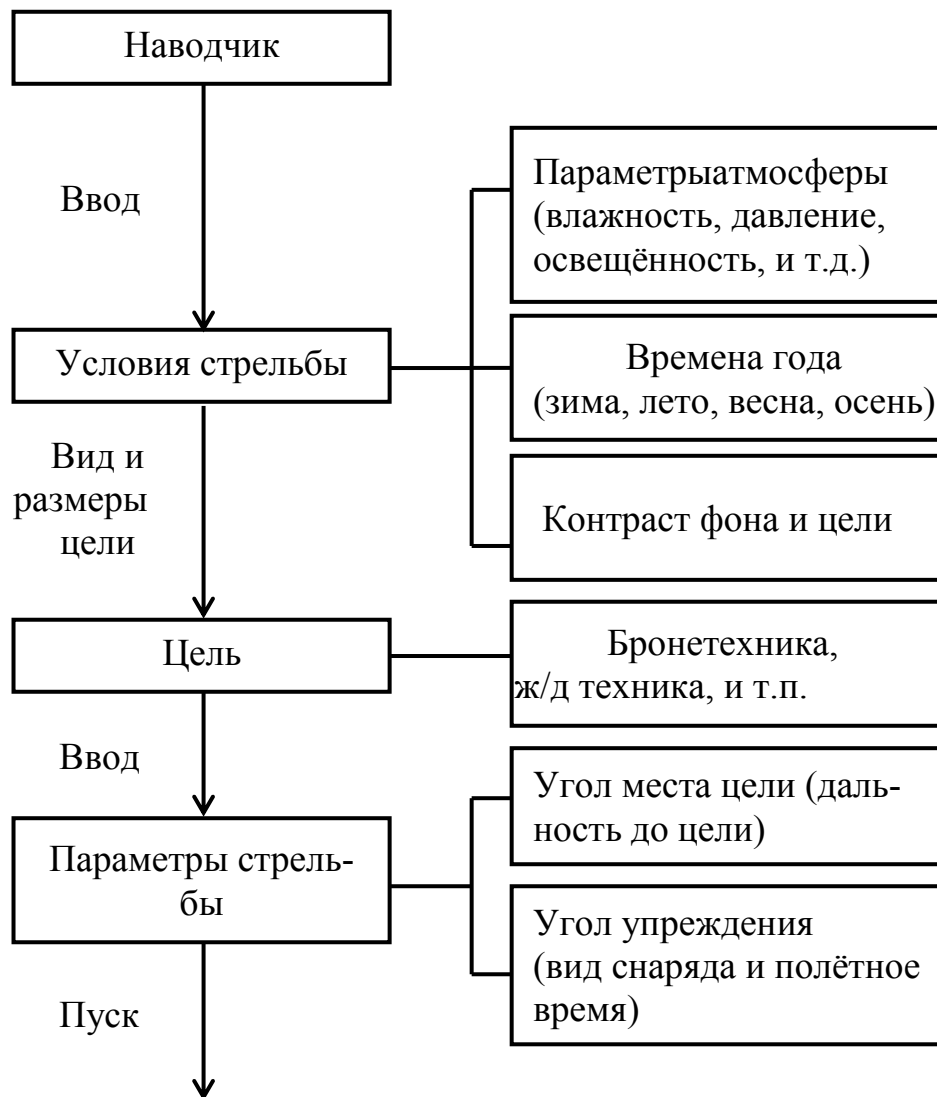


Рис. 2. Функциональная схема тренажёра для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям

© О. К. Ушаков, П. В. Петров, 2015

УСТРОЙСТВО И МЕТОД ЮСТИРОВКИ ЖИДКОЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ

Игорь Олегович Михайлов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: mio@sibmail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Предлагается схема устройства для юстировки и контроля оптических «моноблоков», включающих жидколинзовые элементы. Юстировка осуществляется поперечным смещением линз, их наклоном и регулировкой воздушного промежутка между компонентами.

Ключевые слова: жидкая линза, конструкция, оптическая система, юстировка.

THE DEVICE AND THE METHOD OF LIQUID LENS SYSTEMS ALIGNMENT

Igor O. Mikhailov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Science, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)344-29-29, e-mail: mio@sibmail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

The scheme of aligning and optical «monoblocks» control is suggested. The proposed scheme includes the liquid lens elements. The alignment is carried out by transverse displacement of lenses, by their tilt and by controlling the air gap between components.

Key words: liquid lens, construction, optical system, aligning.

Для ряда оптических систем сравнительно недавно было предложено регулировать фокусное расстояние и масштаб изображения с помощью управляемых жидких (жидкостных) линз (ЖЛ) [1–6], которые допускают быстрое (и в значительных пределах) изменение радиусов кривизны своих поверхностей за счет различных физических эффектов [7]. Одним из последних примеров может служить панкратический прицел для стрелкового оружия с технологией адаптивного увеличения «RAZAR» (Rapid Adaptive Zoom for Assault Rifles), основанной на использовании набора полимерных ЖЛ диаметром до 20 мм [8].

Конструирование подобных устройств требует новых подходов, а их сборка и юстировка – разработки новых оригинальных методов с применением специальных установок и приспособлений [9].

Поскольку перефокусировка оптических систем с ЖЛ осуществляется без линейного перемещения оптических компонентов, а размеры ЖЛ достаточно малы, то наиболее оптимальной для них выглядит сборка типа «моноблок» с элементами, ориентированными относительно друг друга с необходимой степенью точности и жестко соединенными между собой клеем без дополнительных оправ, что минимизирует массогабаритные характеристики всей сборочной единицы. Анализ типовых компоновок и особенностей юстировки линзовых оптических систем [10–12] позволил предложить принцип их конструирования на базе ЖЛ-модулей из материалов (жидкостей, стекла, пластика) с близкими по значениям температурными коэффициентами линейного расширения.

На рис. представлена принципиальная опτικο-кинематическая схема устройства для юстировки и контроля простейших двухкомпонентных оптических блоков [9], состоящих из предварительно собранного и отрегулированного ЖЛ-модуля и отдельной твердотельной линзы. Для получения качественного изображения при юстировке используется не только поперечное перемещение линз, но и их наклон с одновременной регулировкой воздушного промежутка между оптическими компонентами.

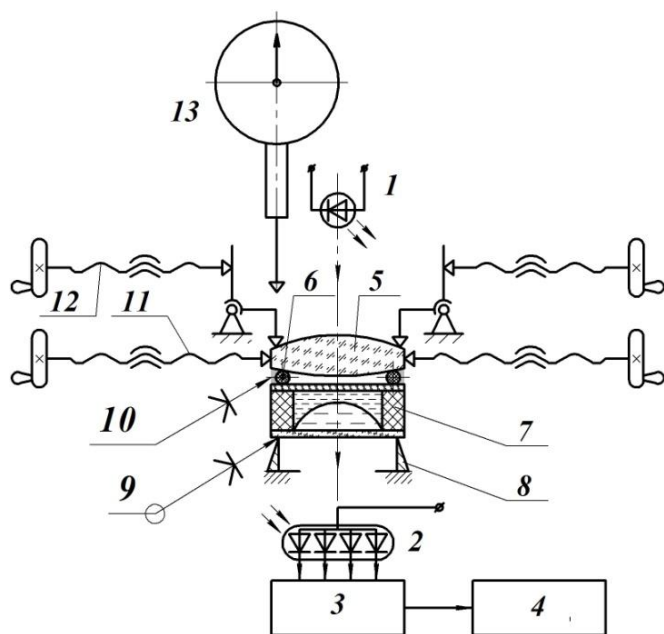


Рис. Принципиальная схема юстировочного устройства:

1 – светодиод; 2 – квадрантный фотоприемник; 3 – блок обработки сигналов; 4 – монитор; 5 – юстируемая твердотельная линза; 6 – эластичное кольцо; 7 – ЖЛ-модуль; 8 – опорная деталь; 9, 10 – клеевые соединения; 11 – винтовые механизмы; 12 – рычажно-винтовые механизмы; 13 – часовой индикатор

Качество юстировки контролируется при помощи опτικο-электронной системы 1–4. Лазерный источник излучения 1 формирует узкий параллельный световой пучок, проходящий через всю оптическую систему и настраиваемый так, чтобы в отсутствие оптических компонентов он попадал в центр квадрантного фотоприемника 2. Тогда после установки контролируемой сборочной единицы фотоприемник будет генерировать сигнал, пропорциональный величине поперечного смещения пучка в плоскости его светочувствительных элементов. Далее этот сигнал поступает в блок обработки 3, который формирует информацию

в удобном для оператора виде и выводит ее, например, на монитор компьютера 4. Базовым оптическим элементом является ЖЛ-модуль 7, который закрепляется на опорной детали 8 шеллаком или центрировочной смолой 9. Юстируемый оптический компонент (в частности, твердотельная линза) 5 устанавливается через эластичное (резиновое) кольцо 6 соответствующего сечения. Ее центри-

рование выполняется винтовыми механизмами 11, а наклон регулируется рычажно-винтовыми механизмами 12. Воздушный промежуток между юстируемой линзой 5 и ЖЛ-модулем 7 контролируется индикатором часового типа 13. Достигнутое положение деталей фиксируется клеем 10, заливаемым в зазор по контуру.

Если расстояние между компонентами 5 и 7 превышает допустимую толщину (диаметр сечения) кольца 6, то между ними может быть установлено вспомогательное жесткое пластиковое или стеклянное кольцо требуемого размера; сущность и последовательность регулировок от этого не изменятся.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pat. 1999018456 WO. Lens With Variable Focus / B. Berge, J. Peseux. Publication Date: 04.15.1999.
2. Pat. 7126903 US. Variable Focus Lens / B. J. Feenstra, S. Kuiper, S. Stallinga, B. H. W. Hendriks, R. M. Snoeren. Publication Date: 10.24.2006.
3. Pat. 7224534 US. Optical element, optical unit, and image-taking apparatus / T. Ootsuka, T. Kato, H. Miyano. Publication Date: 05.29.2007.
4. Pat. 2007/0247724 US. Liquid lens with curved contact surface / M. S. Jung. Publication Date: 10.25.2007.
5. Pat. 7298559 US. Variable focus lens and optical device using the same as well as method of manufacturing variable focus lens / Y. Kato, F. Mueda. Publication Date: 11.20.2007.
6. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 284 с.
7. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, В. С. Ефремов, И. О. Михайлов, Н. В. Оревкова, Б. В. Федоров, В. Б. Шлишевский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.
8. Szondy D. RAZAR riflescope brings push-button zoom to the battlefield. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gizmag.com/sandia-razar-adaptive-zoom-riflescope/34366/> (дата обращения: 19.02.2015).
9. Голицын А. В., Михайлов И. О., Шлишевский В. Б. Конструкция миниатюрного комбинированного объектива–моноблока с жидкими линзами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 76–80.
10. Маламед Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: Учебное пособие. – СПб.: ГИТМО (ТУ), 2002. – 292 с.
11. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.
12. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение, 1989. – 221 с.

© И. О. Михайлов, В. Б. Шлишевский, 2015

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОБМЕНА ДАННЫМИ НА ОТКРЫТЫХ РЕСУРСАХ

Владилен Игоревич Минин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, тел. (812)294-21-90, e-mail: mininvlad@gmail.com

Приведено краткое описание принципов построения и возможностей разработанной программной системы для безопасного обмена данными на открытых ресурсах (email, социальные сети, мессенджеры и т. д.).

Ключевые слова: безопасность данных, открытые ресурсы, программа.

SAFETY DATA ON PUBLIC RESOURCES

Vladilen I. Minin

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 194064, Russia, Petersburg, Polytechnic St. 29, tel. (812)294-21-90, e-mail: mininvlad@gmail.com

A brief description of the principles of design and the opportunity to develop a software system for the secure exchange of data on open resources (email, social networks, instant messengers, etc.).

Key words: data security, public resources program.

В настоящее время проблема обеспечения безопасности обмена данными на открытых ресурсах (email, социальные сети, мессенджеры и т.д.) достаточно актуальна [1]. В частности, в [1] отмечается, что «...Уникальные особенности смартфонов затрудняют их защиту: для обеспечения безопасности хранимой на них конфиденциальной информации нужны новые бизнес-модели, помогающие усилить надежность мобильных устройств». При этом защиту данных целесообразно осуществлять на базе открытых информационных систем [2].

Ниже приведено краткое описание принципов построения и возможностей разработанной программной системы для безопасного обмена данными на открытых ресурсах. Блок-схема организации программы представлена на рис. 1.

Программа работает на архитектуре «Клиент-сервер». Клиентами являются Web-приложение (программа для ПК (кроссплатформенное)) и мобильное приложение (кроссплатформенное). Для обоих клиентов работает единая база данных (рис. 2).

Для работы с программой необходимо, чтобы администратор системы выдал данные для входа. Далее выполняется авторизация (для ПК версии ввод пароля выполняется только через экранную клавиатуру, для защиты пароля).

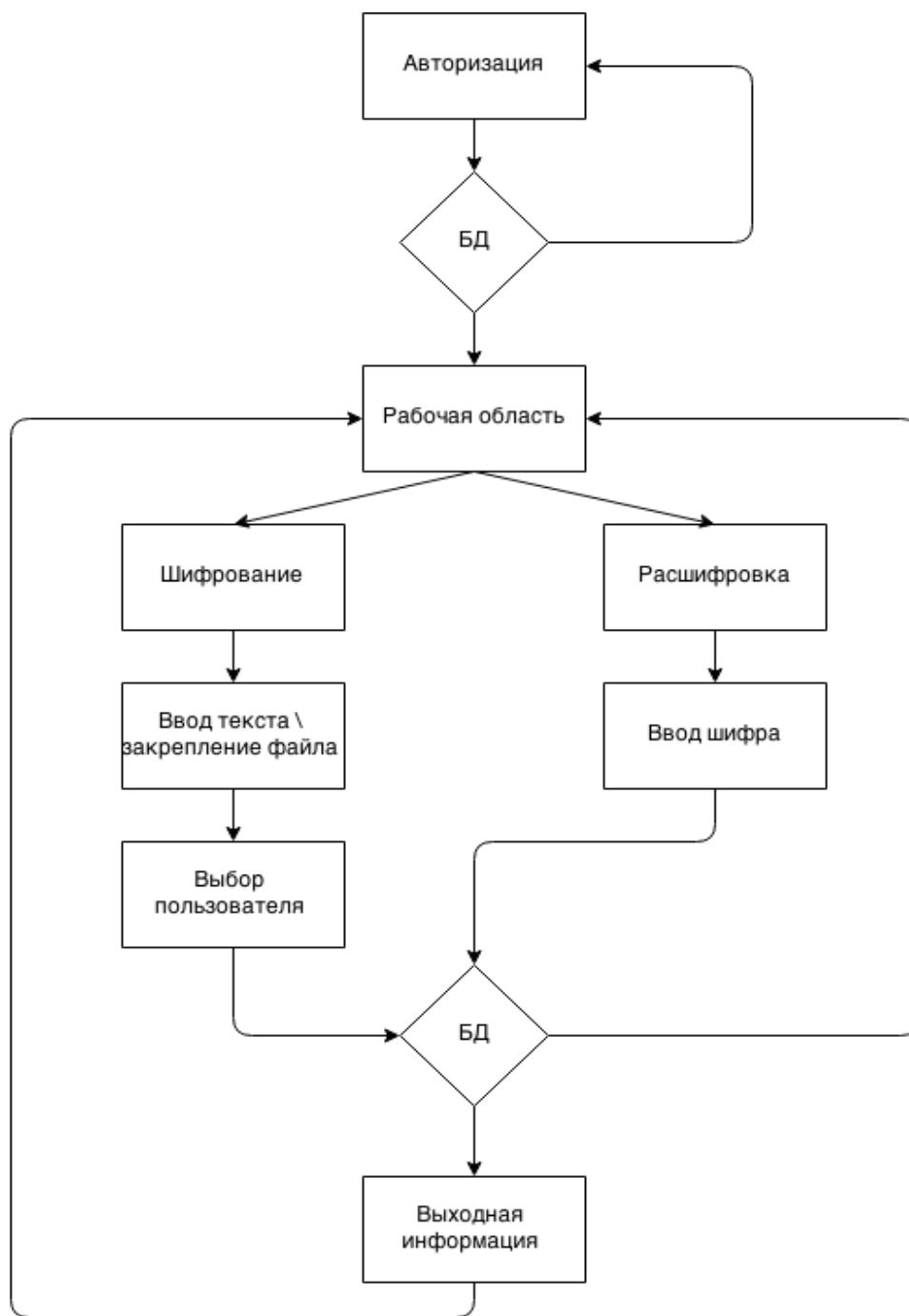


Рис. 1. Блок схема программы

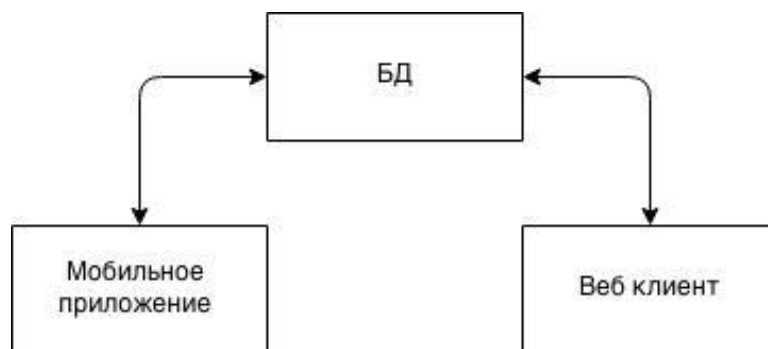


Рис. 2. Структура обмена данными

В программе имеются 4 основных функции:

- Зашифровать строку – вводится обычный текст, который преобразуется в шифр.
- Расшифровать строку – расшифровка полученных шифров, и вывод на экран изначального текста.
- Зашифровать файл – загружается файл на сервер любого типа и на выходе получается текстовый файл, который содержит в себе шифр.
- Расшифровать файл – вставляется текстовый файл, который содержит в себе шифр какого-либо файла и расшифровывает его. На выходе получается первоначальный вид файла.

Программа устроена так, что при шифровании какого-либо объекта, требуется указать пользователя, который сможет расшифровать данный файл. (только из тех пользователей, что уже зарегистрированы в системе). Кроме этого пользователя никто не сможет раскодировать шифр. Программа выбирает секретный ключ пользователя, который хранится в базе данных и генерируется при создании пользователя, и кодирует объект относительно него. Стандартный ключ длиной 256 бит.

В программе имеется возможность работы с личным кабинетом пользователя, где можно загрузить аватару, изменить имя и добавить информацию о себе.

Администраторы системы имеют доступ к панели управления, где дополнительно предусмотрены такие функции как:

- Журнал авторизации
- Управление пользователями
- Добавление пользователей
- Восстановление пароля
- Просмотр ключей
- Архив сообщений

Все тоже самое, кроме панели администратора, доступно и для мобильной версии программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yong Snider, Kevin Streff, Sonell Raman, Smartphone Security Challenges, IEEE Computer, December 2012, IEEE Computer Society.

2. Гусев М.О. Открытые информационные системы и защита информации // ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. N 9, 2005. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/iso/sep05/1/text.html>

© В. И. Минин, 2015

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОВЫШЕННЫМИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Наиль Фаикович Кашапов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, доктор технических наук, проректор по инновационной деятельности, тел. (843)233-78-71, e-mail: kashnail@gmail.com

Саид Насибуллович Шарифуллин

Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, 422980, Россия, Республика Татарстан, г. Чистополь, ул. Студенческая, 15, доктор технических наук, профессор кафедры механизации в агропромышленном комплексе, тел. (960)054-85-95, e-mail: Saidchist@mail.ru

Впервые предложена технология получения многофункциональных покрытий с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами с совмещением операций испарения материала, ионизации и возбуждения атомов, формирования направленного потока частиц и транспортировки их на поверхность, подогрева подложки, очистки и полировки ее поверхности. В качестве инструмента исполнения применяется высокочастотный индукционный разряд низкого давления в потоке газа.

Ключевые слова: оптические системы, многофункциональное покрытие, высокочастотный индукционный разряд, низкое давление.

MULTIFUNCTIONAL COATING OPTICAL SYSTEM WITH ENHANCED OPTICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

Nail F. Kashapov

Kazan (Volga region) Federal University, 420008, Russia, Tatarstan, Kazan, st. The Kremlin, 18, Main Building, Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for innovation, tel. (843)233-78-71, e-mail: kashnail@gmail.com

Said N. Sharifullin

Kazan (Volga Region) Federal University Branch in Chistopol, 422980, Russia, Tatarstan, Chistopol, st. Student, 15, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, professor of the department «Mechanization in the agricultural sector», tel. (960)054-85-95, e-mail: Saidchist@mail.ru

First proposed technology for production of multifunctional coatings with enhanced mechanical and performance properties to the combined operations of the evaporation material, ionization and excitation of atoms, forming a directional flow of particles and transporting them to the surface, heating the substrate, cleaning and polishing her surface. As an instrument of execution used high-frequency inductive discharge of low pressure in the gas stream.

Key words: optical systems, multifunctional coating, high-frequency inductive discharge, low pressure.

Есть области техники, где имеющиеся традиционные технологии обработки поверхностей и нанесения покрытий не позволяют получить поверхности выше 12 класса шероховатости и покрытия с повышенными физико-

механическими и эксплуатационными свойствами. К таким областям относится и оптико-механическая промышленность. В ней, хотя и используются некоторые высокие технологии, технологические операции получения многослойных покрытий оптических элементов прерывистые и не объединены в один цикл. Это приводит к изменению или потере тех или иных оптических свойств изделия. Вследствие этого решение задачи создания конкурентоспособной продукции на мировом рынке становится невозможной. Здесь необходимы нестандартные подходы и применение не обычных, а прорывных технологий. Такими технологиями могут быть только высокие технологии, которые позволяют получать качественные изделия, новые перспективные материалы, покрытия и поверхности с необычными свойствами. К ним можно отнести плазменные технологии газового разряда.

Широкий спектр энергетических, тепловых и газодинамических характеристик низкотемпературной плазмы газового разряда позволяет применить ее в различных технологиях [1 – 4]. При этом тепловую мощность плазменной струи можно изменять от десятков ватт до десятков мегаватт, температуру – от нескольких сот градусов до $50\,000^{\circ}\text{C}$, эффективный к.п.д. нагрева может достигать до 90%, скорость плазменной струи – до 1000 м/с, ресурс непрерывной работы – до 1000 часов. Плазмообразующим газом могут быть любые газы, как инертные, так и агрессивные.

В нашем случае при выборе вида плазмы для выполнения указанной задачи необходимо выполнить следующие требования:

1. Плазма должна быть газоразрядной;
2. Плазма должна быть чистой, т. е. без продуктов эрозии электродов;
3. Под температурным воздействием плазмы не должны изменяться основные физико-механические свойства самого материала детали;
4. Плазменная технология должна позволять нанесение тонких пленок на различные поверхности из различных металлических, неметаллических и диэлектрических материалов или их соединений;
5. Материал покрытий должен испаряться в разряде до парогазовой фазы;
6. В качестве исходного сырья для испарения могут быть различные плазмохимические реагенты;
7. Технология должна позволить совмещение операций испарения материала, ионизации и возбуждения атомов, формирования направленного потока частиц и транспортировки их на поверхность, подогрева подложки, очистки и полировки ее поверхности.
8. Транспортировка продуктов испарения или плазмохимической реакции на поверхность подложки должна производиться плазменной струей;
9. Воздействием плазмы свойства поверхностного слоя детали должны существенно измениться в сторону улучшения качества;
10. Для удаления продуктов обработки использовать плазменную струю.

Анализ свойств плазмы и возможностей ее применения показал, что указанным требованиям соответствует высокочастотный индукционный разряд (ВЧИ) низкого давления в потоке инертного газа (рис. 1). Проведенные исследования позволили определить режимы обработки и нанесения покрытий ВЧИ-плазмой низкого давления для решения поставленной задачи.

Эксперименты проводились по созданию прозрачных покрытий из твердого и износостойкого материала двуокиси кремния для оптической промышленности. Ранее было выяснено, что при получении алмазоподобных покрытий безвакуумным методом с помощью дугового плазмотрона 20 – 30% состава покрытия представлял карбид кремния, а 70 – 80% – двуокись кремния [5]. Отсюда следует, что те результаты, которые были получены для вышеуказанных покрытий, определяет, в первую очередь, двуокись кремния. Поэтому можно утверждать, для рассматриваемых покрытий присущи те же свойства по твердости и износостойкости, что и покрытиям, полученным безвакуумным методом с помощью дугового плазмотрона.

Полученные пленки SiO_2 были изучены на инфракрасном спектрометре UR-20 с приставкой для получения спектров отражения в области $700 - 3800 \text{ см}^{-1}$. В исследуемой части спектра наблюдались две полосы в области 1068 и 810 см^{-1} , принадлежащие молекуле SiO_2 . Полос, свидетельствующих о наличии в пленке молекул SiO , HO и H_2O , не оказалось. Чистота пленки является важным фактором, определяющим ее применение в различных областях, таких как микроэлектроника, оптика и т. д.

В экспериментах материалами подложек служили медь, сталь, платино-иридий, алюминий, стекла марок КВ и К8, сапфир, ситалл СТ50-1. Размер подложек был диаметром до 40 мм. Испаряемые материалы выбирались в виде стержня. Диаметр стержня менялся от 2 до 10 мм.

Были исследованы скорость роста пленки в зависимости от расхода плазмообразующего газа и изменение толщины пленки по поверхности подложки. Оказалось, что изменяя расход плазмообразующего газа можно наносить покрытия со скоростью 150 ангстрем в секунду. Это означает, что покрытие в 1 мкм можно нанести за 1 мин. Толщина полученных пленок доходила до 20 мкм. Для определения неравномерности пленок проводилось измерение в пяти местах поверхности подложек. Результаты показали, что максимальная неравномерность толщины полученных пленок составляет всего около 0,5%.

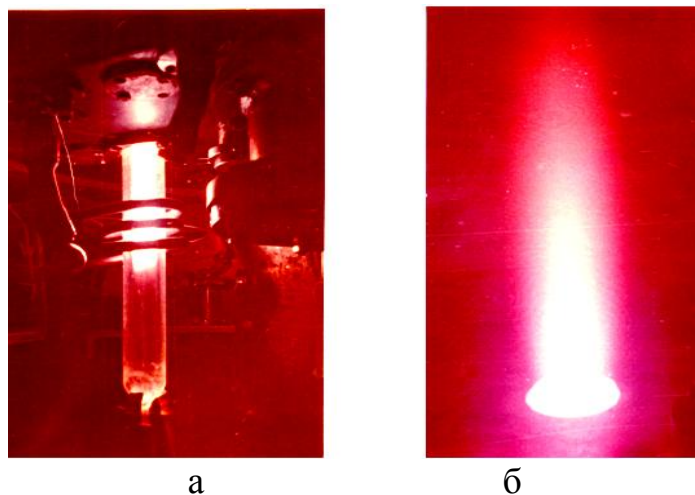


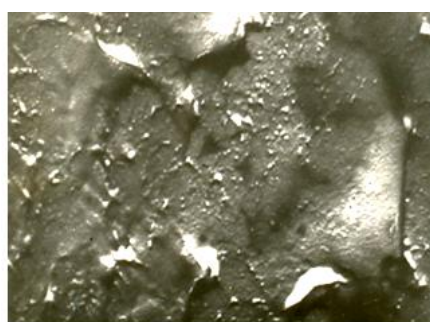
Рис. 1. Фотографии ВЧИ-разряда (а) и плазменной струи (б) при низких давлениях

Было проведено испытание пленок на механическую прочность. Испытание проводилось на приборе СМ-55. Оказалось, что все полученные пленки по механической прочности относятся к нулевой группе. По нормали НО 3611-61 к нулевой группе относятся покрытия, допускающие чистку в полевых условиях (особо прочные).

Пленки кварца, нанесенные на стеклянные подложки К8, были испытаны на лучевую прочность. Лучевая прочность пленок определялась на стенде испытаний с помощью лазера ГОС-300. Измерения показали, что порог разрушения пленки кварца геометрической толщиной 2 мкм составляет $3,4 \cdot 10^5$ мм². Это в несколько раз выше порога разрушения пленок, полученных другими способами вакуумных покрытий.

ВЧИ-плазмой низкого давления можно распылять любые материалы: металлические, неметаллические, диэлектрические и др. В ней можно проводить любые плазмохимические реакции с получением различных материалов и покрытий. При этом можно совмещать операции испарения материала, ионизации и возбуждения атомов, формирования направленного потока частиц и транспортировки их на поверхность, подогрева подложки, очистки и полировки ее поверхности. Покрытия можно наносить практически на любые поверхности, выдерживающие температуры 100 – 200°C. Микротвердость таких покрытий составляет не менее 20 ГПа, что выше в 1,5 – 2,0 раза твердости абразивных частиц. При статическом положении подложки разработанной конструкцией плазмотрона можно наносить покрытия на площадь диаметром до 70мм. За счет манипуляций движения подложки и изменением конструкции плазмотрона возможно реальное получение покрытий на любых площадях.

Была проведена обработка поверхностей оптических стекол из различных марок. Ниже приведем некоторые результаты исследований. На рис. 2 приведены фотографии микроструктур поверхностей стекла марки К8 до и после обработки потоком ВЧИ-плазмы низкого давления, полученных на электронном



а



б

Рис. 2. Фотографии микроструктур поверхности стекла марки К8 до (а) и после (б) обработки потоком ВЧИ-плазмы низкого давления (х20 000 в формате листа А4, ширина фотографии соответствует 4 мкм поверхности)

фотографий и результатов других исследований позволили сделать вывод о том, что в процессе обработки образцов высокочастотной индукционной плазмой

микроскопе УЭМВ-100А. Сопоставление фотоснимков показывает, что существовавшие микродефекты поверхности после обработки плазмой исчезают, и образуется совершенно новая, более сглаженная и однородная микроструктура поверхности. Анализ этих фо-

низкого давления происходит удаление дефектного слоя поверхности и ее дальнейшая полировка. Укажем, что шероховатость поверхности образцов до обработки плазмой соответствует 10 – 11-му классу. После обработки достигается 13–14-й класс шероховатости поверхности. Заметим, что таблица класса шероховатости по ГОСТу заканчивается 14-м классом. Это теоретически достигаемый класс шероховатости. Практически же, существующие способы обработки не позволяют достижения класса шероховатости выше 12-го.

Для того, чтобы убедиться в удалении дефектного слоя поверхности и уменьшении ее шероховатости воздействием плазмы, были проведены исследования по измерению коэффициента рассеяния света и лучевой прочности поверхностей оптических стекол до и после обработки их потоком ВЧИ-плазмы низкого давления. При пропускании светового луча через стекло, основные потери энергии зависят от загрязненности и шероховатости его поверхности. Поэтому эти количественные параметры будут конкретно характеризовать эффект воздействия плазмы на поверхность материала.

Измерения рассеяния света проводились на нестандартной лазерной установке измерения рассеяния ЛУИР, основанной на сравнении коэффициентов рассеяния образцов и эталонной пластины. Рассеяние определялось на длине волны 632,8 нм в «S»- поляризованном излучении лазера. Индекс «S» означает поляризацию, когда электрический вектор перпендикулярен к плоскости падения излучения. Результаты измерений коэффициента рассеяния для 14 стекол К8 показали, что ВЧИ- плазменная обработка при низких давлениях позволяет в 2 – 3 раза уменьшить коэффициент рассеяния стекол.

Лучевую прочность поверхностей образцов определяли на специальном стенде с помощью лазера ЛТИ-5. Измерения показали, что после ВЧИ-плазменной обработки лучевая прочность поверхностей стекол К8 повысилась в 1,5 – 2 раза. Уменьшение коэффициента рассеяния света оптических стекол в 2 – 3 раза после ВЧИ плазменной обработки их поверхностей, с одновременным повышением лучевой прочности в 1,5 – 2 раза, является убедительным доказательством удаления дефектного слоя поверхности и повышения ее класса шероховатости.

Анализ результатов по ВЧИ-плазменной обработке поверхностей деталей из различных материалов позволяет сделать вывод, что имеется новый тонкий инструмент модифицирования поверхностного слоя детали. Он позволяет одновременно очистить поверхность от всех видов загрязнений, удалить дефектный слой после ее механической обработки, получить однородную микроструктуру, повысить класс шероховатости на 2 – 3 единицы. При этом не имеет значения, из какого материала изготовлена деталь. Лишь бы материал детали выдерживал температуру порядка 100 – 200 °С, а эффект будет тот же.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашапов Н. Ф., Лучкин А. Г. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения упрочняющих покрытий на пластики // Известия вузов. Физика, 2014. – Т. 57. – № 3/3. – С. 165–168.

2. Dautov I.G. Study of dustelectron plasma discharge on condition parallel of the velocity vector of the gas flow and electric field /I.G. Dautov, G. U. Dautov, N.F. Kashapov, I.I. Fairushin //Journal of Physics: Conference Series. 2013. – V.479. – No.1. Article No. 012001. doi:10.1088/1742-6596/479/1/012001.
3. Anatoly Dounaev. Friction Surfaces Modification Using Tribo-Compounds /Anatoly Dounaev and Said Sharifullin //World Applied Sciences Journal. ISSN 1818-4952, 2014. – Vol. 31 (2). – P. 272 – 276.
4. S. Sharifullin. New approach to investigating plasma processes occurring in friction units of machines and mechanisms /S. Sharifullin, N. Rogozhkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2014. – V. 69. doi:10.1088/1757-899X/69/1/012039.
5. Соснин Н.А. Плазменные технологии /Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.
6. Budin J.P. On the dynamics of laser – induced damage in glasses /J.P. Budin, J.Rafby. //Appl. Phys. Letters, 1966. –V. 9. –No 8. –p. 291.

© *Н. Ф. Кашипов, С. Н. Шарифуллин, 2015*

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Диана Георгиевна Макарова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)343-91-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

В статье рассмотрена возможность оптимизации формообразования оптических поверхностей для субмиллиметрового диапазона спектра на основе критериев качества изготовления, допусков на изготовление и трудоемкости для некоторых материалов прозрачных в субмиллиметровом диапазоне спектра.

Ключевые слова: технология, формообразование, субмиллиметровый, допуски размеров, формы, расположения, шероховатости, трудоемкость.

ABOUT OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS FORMING OF OPTICAL SURFACES FOR THE SUBMILLIMETRIC RANGE OF THE SPECTRUM

Victor S. Efremov

The Siberian state university of geosystems and technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Science, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Diana G. Makarova

The Siberian state university of geosystems and technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., the post-graduate student faculty Nanosystem and optotechnics, tel. (383)343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

In paper possibility of optimization forming of optical surfaces for a subcross-section range of a spectrum surveyed on the basis of criteria of performance of the map, manufacturing tolerances and complexity for some materials transparent in a subcross-section range of a spectrum.

Key words: Technology, forming, submillimetric, admissions of the sizes, forms, arrangements, roughnesses, labour input.

В настоящее время для получения оптических поверхностей применяют следующие способы формообразования:

- точение, фрезерование, шлифовка или полировка;
- прессование или отливка из пластического или вязкого материала;
- пластическое изменение формы исходных поверхностей давлением или нагреванием заготовки в определенных пределах;

- нанесение на исходную поверхность слоя дополнительного слоя вещества, распределенного по поверхности в соответствии с определенным законом, путем напыления, наплавления или нанесением гальванического покрытия.

Свои преимущества и недостатки имеет каждый из этих методов. Выбор способа зависит от ряда факторов, в том числе - от требуемой точности изготавливаемой детали.

Наиболее перспективными из известных способов при массовом изготовлении деталей среднего уровня точности можно считать прессование и полимеризацию из пластических материалов. Основным недостатком этих методов являются ошибки, возникающие из-за усадки материала во время полимеризации или прессования, а также искажение поверхностей с течением времени (в процессе естественного старения).

На выбор технологии формообразования оптической поверхности детали в СМД спектра влияет несколько факторов:

- первый определяется серийность изготовления деталей;
- второй определяется областью «прозрачности» материала. В отличие от визуального спектра в СМД диапазоне пропускают излучение оптические материалы с разными физическими свойствами (металлы, кристаллы, стекла, пластики) технологии обработки, которых могут не совпадать;
- физические свойства материалов влияют на допуски изготовления поверхностей, которые могут лежать в широком диапазоне значений;
- длины волн, на которых рассчитываются допуски для изготовления и контроля оптических деталей отличаются на три порядка от визуального диапазона.

Как известно, точность изготовления детали определяется четырьмя типами допусков:

- допуском размера (радиуса сферической поверхности - N),
- допуском формы (отступлением формы поверхности от сферы - ΔN),
- допуском расположения (децентрировка - C и наклон сферической поверхности),
- допуском шероховатости (высота микронеровностей сферической поверхности – R_a или R_z).

Анализ влияния допусков на качество изображения показывает, что первые три допуска определяются параметрами качества изображения (например, размером абберрационного кружка, концентрацией энергии в пикселе ФПУ и т.д.), а четвертый – шероховатость, определяется из соображений обеспечения максимального пропускания излучения для конкретного оптического материала.

Существует несколько методов назначения допусков: подобию, прецедентов и расчетный. Наиболее рациональный, а для новых разработок единственно применимый – расчетный метод. Для расчета допусков проведем моделирование с помощью пакета прикладных программ (ППП) «Zemax».

Для моделирования выберем одиночную линзу в воздухе при падении на нее параллельного пучка лучей. Линзы из разных оптических материалов при одинаковых оптических параметрах должны иметь одинаковое значение крите-

рия качества изображения. В качестве критерия качества изображения выберем RMS - среднеквадратический размер пятна рассеяния. Это хороший критерий оценки качества систем не достигающих «дифракционного», т.е. более одной длины волны.

Выбор материала линзы обусловлен величиной показателя преломления материала для $\lambda=200\text{мкм}$ из интервала значений от 1,5 до 4. Полиэтилен ($n=1,5137$), кварц кр. ($n=2,1170$), кремний ($n=3,4165$). Разделение материалов по показателю преломления хорошо разделяет материалы по физическим свойствам на пластики, оптические кристаллы и металлы полупроводники. Физические свойства материалов определяют технологии формообразования оптических поверхностей. На рис.1 приведены оптическая схема исследуемой оптической детали и ее характеристика качества изображения RMS.

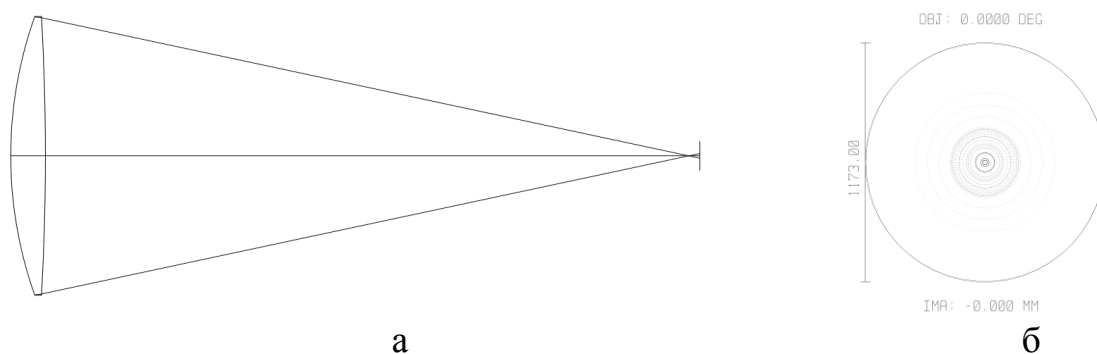


Рис. 1. Одиночная линза в воздухе: а – оптическая схема, б – RMS

Допуск шероховатости R_a определялся из соображений получения минимального отражения от шероховатой поверхности. В работе [2] были предложены соотношения связывающие коэффициент отражения от поверхности (R) с длиной волны излучения (λ).

$$R = R_0 - R_d, \quad R_d = R_0 \frac{4\pi R_q^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

В отечественной практике в место параметра шероховатости R_q используется параметр R_a (среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости), связь между которыми дана в работе [3].

$$R_a = R_q \sqrt{2/\pi} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) получим выражение для R от R_a и λ .

$$R = R_0 \left(1 - 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 \right), \quad R_a = \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}$$

Для рассматриваемого случая при $\lambda=200\text{мкм}$ $R_a = 12,5\text{мкм}$.
Результаты расчетов приведены в табл.

**Конструктивные параметры линз и допуски
на изготовление оптических поверхностей**

Конструктивные параметры линз			
Материал оптический	Полиэтилен	Кварц кр	Кремний
$n_{\lambda=200\text{мкм}}$	1,5137[1]	2,1170 [1]	3,4165 [1]
R_1	59,75	83,50	96,12
R_2	-355,73	320,53	153,74
S'_f	94,50	94,73	94,76
f'	99,99	99,98	99,99
Радиус диска Эри, мкм	1173	1204	1213
RMS, мкм	160	160	160
Допуски на изготовление оптических поверхностей линз			
Первая поверхн.	ΔR_1 , мкм	2564	2742
	$N_1 \lambda=200\text{мкм}$	0,8	0,6
	$N_1 \lambda=0,6328\text{мкм}$	248	190
	Δz_1 , мкм	8	21
	$\Delta N_1 \lambda=200\text{мкм}$	1,0	0,6
	$\Delta N_1 \lambda=0,6328\text{мкм}$	310	183
	C, мкм	6428	11021
Вторая поверхн.	ΔR_2 , мкм	100096	47156
	$N_2 \lambda=200\text{мкм}$	0,8	0,6
	$N_2 \lambda=0,6328\text{мкм}$	260	195
	Δz_2 , мкм	675	764
	$\Delta N_2 \lambda=200\text{мкм}$	0,9	0,5
	$\Delta N_2 \lambda=0,6328\text{мкм}$	296	177
	C, мкм	26769	31985
Ra, мкм	12,5		
н/ч	0,1	0,1	0,2
Ra (Rz 0,05), мкм	0,01		
н/ч	0,6	0,6	0,7
Техпроцесс формообразования поверхности	Литье	Алмазное фрезеров.	Точение

Для экономической обоснованности упрощение технологического процесса представлены данные времени на обработку детали в нормо-часах для разных шероховатостей поверхности Ra 12,5 и Ra 0,01 [4].

Поскольку значения допусков на изготовление довольно велики, то можно сделать вывод о возможности исключения из процесса формообразования оптической поверхности таких трудоемких операций как шлифование и полирование. Необходимое качество изображения достигается при шероховатости поверхности Ra 12,5.

На рис. 2 представлены графики допусков и норм времени для изготовления первой поверхности линзы с учетом материала и технологии формообразования.

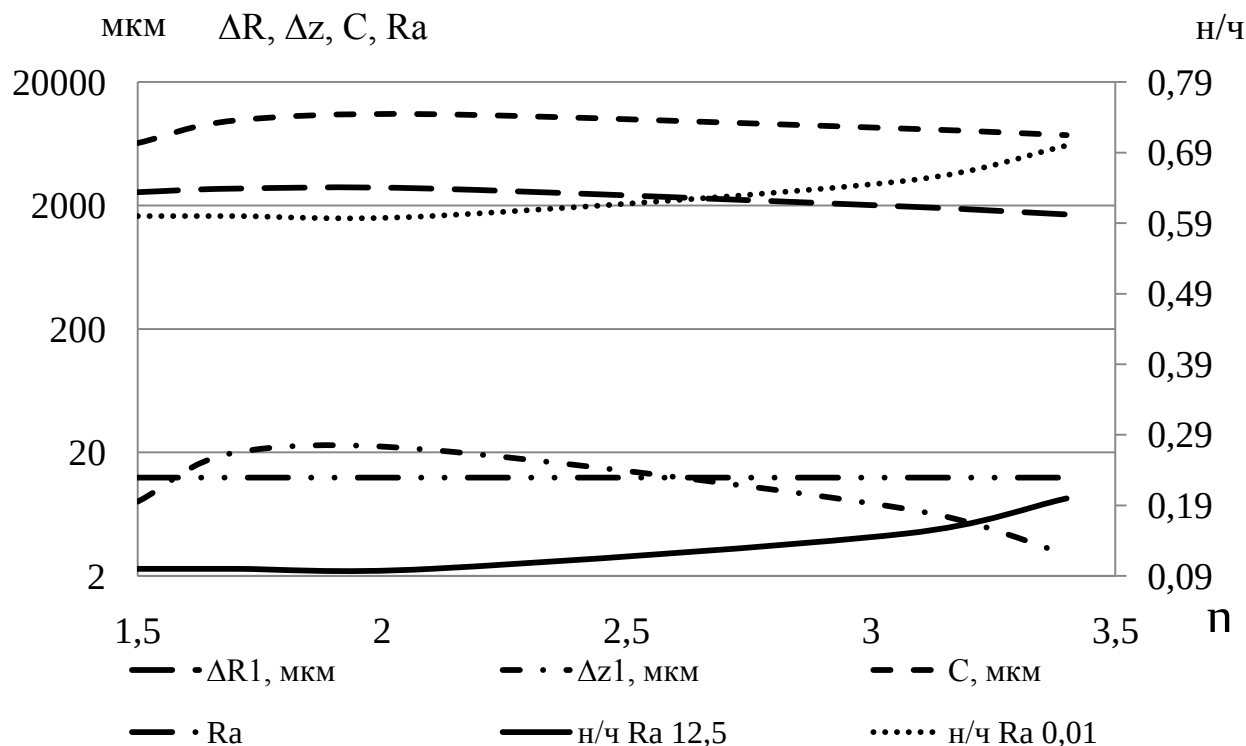


Рис. 2. Значения допусков и норм времени для изготовления первой поверхности линзы с учетом материала и технологии формообразования

Выводы:

- разработка оптической элементной базы для субмиллиметрового диапазона спектра требует оптимизации технологии формообразования преломляющих поверхностей с учетом свойств материалов и серийности производства;
- величины допусков позволяют использовать на первом этапе формообразования поверхностей операции точение, фрезерование и горячее прессование;
- оптимизация технологического процесса при изготовлении деталей СМД диапазона спектра снижает трудоемкость примерно в два-три раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов В. С., Макарова Д. Г. Применение дисперсионных формул материалов в субмиллиметровом диапазоне длин волн // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. (1) 17. – С. 122–132.
2. Bennett, H. E. Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence [Text] / H. E. Bennett, J. O. Porteus // JOSA. -1961.-VOL.51.-№2.-S. 123-129.
3. Овчинников С. С., Тымкул В. М., Кузнецов М. М. Оптический способ контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 282–285.
4. Соболев, С.Ф. Методические указания по разработке технологических процессов изготовления деталей механической обработкой [Текст] / С.Ф. Соболев, Ю.П. Кузьмин. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2007. – 118с.

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова 2015

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ЗЕРНА ПОРОХА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УВЕЛИЧЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Сергей Григорьевич Губин

Бердский политехнический колледж, 633010, Россия, Новосибирская обл. г. Бердск, ул. Островского, 97, преподаватель информационных технологий, тел. (383-41)5-15-60, e-mail: sergei_gubin61@mail.ru

Влияние геометрических размеров порохового зерна на рост давления и увеличение начальной скорости снаряда.

Ключевые слова: порох, размеры, начальная скорость, давление.

THE GEOMETRICAL SIZES OF GRAIN OF GUNPOWDER AND ITS INFLUENCE ON INCREASE IN INITIAL SPEED.

Sergey G. Gubin

Berdsky polytechnical college, 633010, Russia, Novosibirsk region, Berdsk, of street of Ostrovsky, 97, the teacher of information technology, bodies. (383-41)5-15-60, e-mail: sergei_gubin61@mail.ru

Influence of the geometrical sizes of powder grain on growth of pressure and increase in initial speed of a shell.

Key words: Gunpowder, the sizes, initial speed, pressure.

В ходе проведения внутрибаллистических расчетов и в ходе проведения практического эксперимента по диссертационному исследованию выяснилось. Использование стандартной навески пороха для выстрела ВОГ-25, не даёт нам возможности достичь необходимой начальной скорости. Для того, что бы увеличить начальную скорость выстрела нам необходимо увеличить навеску пороха или заменить его другой маркой с более высокой скоростью горения. Это нам позволяет сделать запас прочности заданный при расчетах основных конструктивных элементов.[1] При дальнейшей работе, технологи могут использовать другой материал более легкий и прочный, что позволит увеличить давление в цилиндрах и соответственно начальную скорость.

В целях рекомендации: для снаряжения вышибного заряда, при дальнейшей разработки данного выстрела мной проведены тестовые расчеты, с данной маркой пороха с изменением его геометрических размеров. Что позволит за счет уменьшения объем порохового зерна увеличить скорость его горения и непосредственно его полное сгорание непосредственно при раскрытии цилиндров.[2] Догорание пороха после раскрытия цилиндров дает не нужный рост давления, что может разрушить выстрел во время выхода его из ствола и поразить стреляющего. Рост давления в постоянном объеме прироста скорости не дает, а заставляет усложнять конструкцию и её вес. Что ведет к изменениям требований предъявляемых к выстрелу по весовым характеристикам.

Одной из задач исследования ставилось необходимость обезопасить стреляющего от элементов с повышенным давлением. Если же мы будем повышать навеску пороха, это приведет к значительному увеличению давления и автоматический исключает пункт безопасность стреляющего.

После проведения расчетов с различными навесками пороха и навесками пороха той же марки, но с измененной геометрией зерна, для увеличения начальной скорости. Расчёты полностью раскрываются в статье «Особенности расчета внутрибаллистических параметров в системах обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном замкнутом объёме».[3]

По результатам расчётов получены следующие результаты, приведенные в табл.

Таблица

Навески стандартного пороха и пороха данной марки
с измененной геометрической формой зерна

	МАРКА ПОРОХА					
	Штатный порох	Штатный порох	Штатный порох	Штатный порох с укороченной формой зерна $e=0,2\text{мм}$ $c=0,52\text{мм}$	Штатный порох форма зерна в 2 раза меньше	Штатный порох диаметр равен длине $e_1=0,14\text{мм}$
Навеска пороха (г)	0,8	0,9	1	0,8	0,6	0,6
Начальная скорость (м/с)	56	64	72	74	67	72
Максимальное давление	1000	1300	1800	1980	1708	2140
Догорание после раскрытия цилиндров	Догорает	Догорает	Догорает	Догорает	Сгорает в начале 3 стадии	Сгорает в начале 3 стадии

Нам необходимо подобрать другую марку пороха или другие размеры порохового зерна, которые позволили соблюсти пункт безопасность стреляющего и не нарушили требований, предъявляемых к данному выстрелу.

Отсюда следует, что имея данную прочность, мы можем увеличить навеску пороха, изменить геометрические размеры зерна пороха данной марки для увеличения начальной скорости или использовать другие марки порохов с более высокой скоростью горения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губин С.Г., Балаганский И.А. Экспериментальные исследования схемы бесшумной и беспламенной стрельбы с отсечкой пороховых газов в переменном замкнутом объёме. Боеприпасы и спецхимия, 2008, № 2 – С. 23-27.
2. Губин С. Г. Исследования внутрибаллистических параметров системы обратного метания // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф.

«Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 191–197.

3. Губин С.Г. Особенности расчета внутрибаллистических параметров в системах обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объеме // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 7. – С. 150–152.

© С. Г. Губин, 2015

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ С ДИСКРЕТНОЙ СМЕНОЙ УВЕЛИЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Ксения Дмитриевна Волкова

ООО «Оптическое Расчетное Бюро», 630132, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 200, инженер-конструктор, тел. (923)240-77-94; e-mail: volkova_kd@mail.ru

Евгений Витальевич Дружкин

ООО «ЛУГГАР», 630120, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 200, тел. (962)829-63-39, e-mail: 2496339@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оплотехники, тел. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Представлен обзор современных оптических прицелов с дискретной сменой увеличения. Приведены результаты разработки оптических прицелов ПО 1,5/6 и ПО 1/4, их сравнение с аналогами, рассмотрены особенности оптического проектирования юстировочных подвижек, дано обоснование методики юстировки, ориентированной на технологические возможности отечественных производителей.

Ключевые слова: переменные характеристики, оптические системы, прицел с дискретной сменой увеличения, качество изображения, юстировки, оптическое проектирование.

SPECIALTY OPTICAL DESIGN OF DISCRETE DEVICES ACCORDING TO TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF DOMESTIC PRODUCERS

Ksenia D. Volkova

Optical Design Office Co Ltd, 630074, Russia, Novosibirsk, Red avenue street 200, design engineer, tel. (923)240-77-94, e-mail: volkova_kd@mail.ru

Evgeniy V. Druzhkin

LUGGAR Co Ltd. 630074, Russia, Novosibirsk, Red avenue 200, General manager, tel. (962)829-63-39, e-mail: 2496339@gmail.com

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Professor at the nanosystems and optical devices department, tel. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The review of modern scopes with a discrete change of magnification is proposed. It is given the results of development of optical sights PO 1,5 / 6 and PO 1/4, comparing them with analogues. It is dealt with the features of the optical design of the alignment movements. It is provided for a rationale for the methodology alignment, which focused on the technological capabilities of domestic producers.

Key words: variable characteristics, optical systems, discrete sight, image quality, alignment of optical devices, optical design.

Реализация переменных характеристик в оптических и оптико-электронных приборах обуславливает их технические, потребительские, эксплуатационные и конкурентные преимущества [1]. Типичным примером приборов с переменными характеристиками являются оптические прицелы с переменным увеличением. Смена увеличения в оптической системе прицела может осуществляться двумя способами: дискретным и панкратическим [2]. Панкратическая смена увеличения позволяет осуществлять поиск объектов при наименьшем увеличении и широком поле зрения, затем повышать пространственное разрешение путем постепенного повышения увеличения и, соответственно, уменьшения поля зрения. Если же особенности эксплуатации прибора требуют быстрой смены увеличения, то преимущество по этому критерию принадлежит изделиям с дискретной сменой увеличения, интерес к которым возрос у потребителей и, соответственно, у разработчиков новых оптических прицелов в последние 10-15 лет. Оптические прицелы с дискретной сменой увеличения имеют меньшую стоимость и, чаще всего, меньшие габаритные размеры. В конструктивном исполнении прицелов с дискретной сменой увеличения разработчики отдают предпочтение способу ввода / вывода оптических элементов из хода лучей путем применения вращательного движения, в отличие от точного поступательного перемещения компонентов, реализуемого в панкратических оптических прицелах.

На сегодняшний день авторам известно ограниченное число выпускаемых моделей оптических прицелов с дискретной сменой увеличения: Specter DR Dual Role 1-4x Combat Sight [3 – 5]; Specter DR Dual Role 1.5-6x Combat Sight [6]; Specter DR 1-3-9 Weapon Sight [7] производства фирмы Elkan; 1:4x32 QR-TS 35mm PITBULL COMPACT SCOPE [8] фирмы Valdada; прицел сменного увеличения ПСУ [9 – 11] предприятия «Швабе – Оборона и Защита».

Прицел с дискретной сменой увеличения, появление которого на рынке в начале 21 века инициировало интерес многих предприятий-производителей к разработке и выпуску изделий подобного типа - Specter DR Dual Role 1-4x Combat Sight - обеспечивает дискретную смену увеличения 1 и 4 крат, угловое поле, соответственно, 24 и 6 градуса, удаление выходного зрачка 70 мм, диаметр входного зрачка 32 мм, имеет длину 184 мм, массу 640 г. В приборе реализована внешняя выверка на оружии. Оптическая схема (рис. 1) построена по принципу призмленного монокуляра, в котором объектив имеет два дискретных значения фокусного расстояния. Смена фокусного расстояния объектива 1-4 (и соответственно – смена увеличения прибора) осуществляется путем ввода-вывода из хода лучей двух компонентов в объективе: конструктивно обеспечен поворот оправы с закрепленными в ней линзовыми компонентами 2 и 3 вокруг оси, проходящей через точку О.

Для обеспечения увода визирной оси прицела, построенного по вышеописанной схеме, при смене увеличения необходимо, чтобы прицельная точка

(центр перекрестия) была совмещена при сборке с оптической осью прибора и не смещалась при выверке и (или) вводе поправок. Именно это требование и обусловило реализацию в изделии внешней выверки: в конструкции предусмотрена возможность смещения корпуса прибора в вертикальном и горизонтальном направлениях внешними (по отношению к корпусу прибора) механизмами.

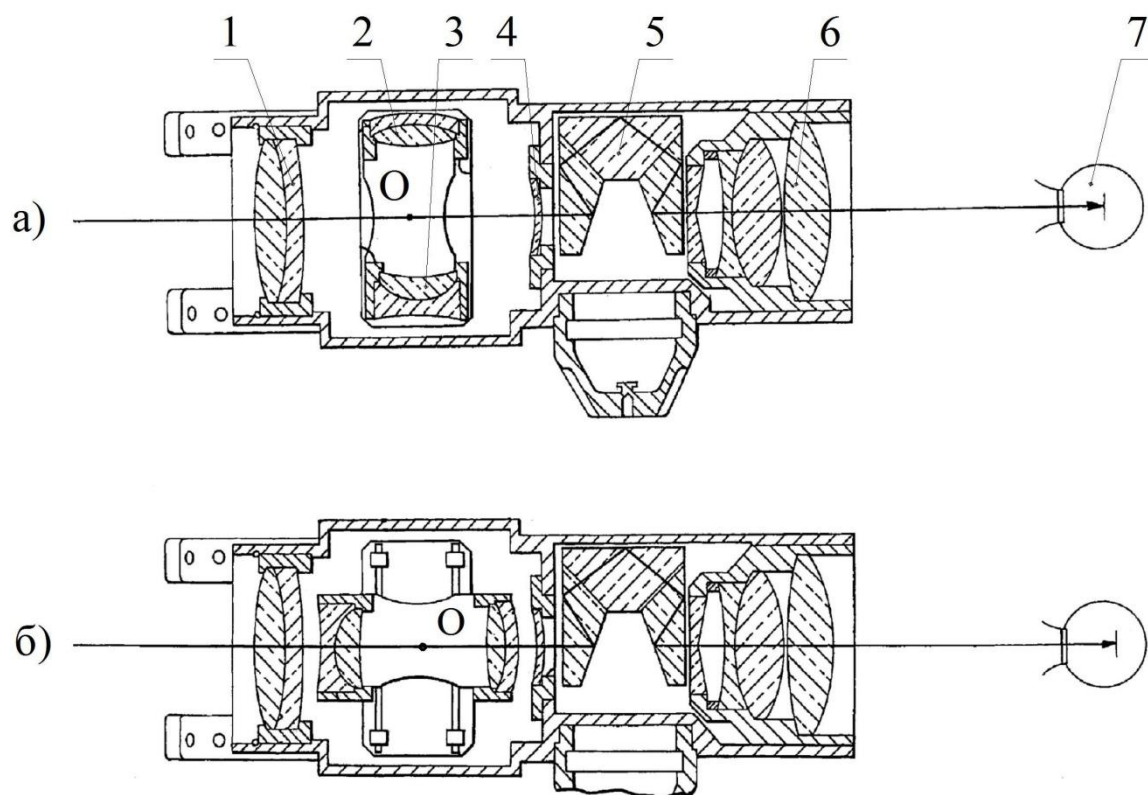


Рис. 1. Схематическое представление оптической системы и конструкции прицела Specter DR Dual Role 1-4x Combat Sight [3 – 5]:

а) увеличение 1 крат; б) увеличение 4 крат:

- 1, 4 – неподвижные компоненты объектива; 2, 3 – система смены увеличения (подвижные компоненты объектива); 5 – призменная оборачивающая система;
6 – окуляр; 7 – глаз наблюдателя

Прицел Specter DR Dual Role 1.5-6x Combat Sight (рис. 2) обеспечивает дискретную смену увеличения 1,5 и 6 крат, угловое поле, соответственно, 16 и 4 градуса, удаление выходного зрачка 70 мм, диаметр входного зрачка 42 мм, имеет длину 184 мм, массу 700 г. Оптическая схема прибора принципиально подобна изделию Specter DR Dual Role 1-4x Combat Sight, в нем также реализована внешняя выверка на оружии. Прибор обеспечивает большее увеличение и повышенное в сравнении с предыдущей моделью сумеречное число.

Прицел Specter TR 1-3-9x 3FOV Weapon Sight обеспечивает дискретную смену трех увеличений 1, 3 и 9 крат, угловое поле, соответственно, 16, 6 и 2 градуса, удаление выходного зрачка 70-79 мм, диаметр входного зрачка

30 мм, имеет длину 265 мм, массу 850 г. Внешний вид прицела представлен на рис. 3.

1:4x32 QR-TS 35mm PITBULL COMPACT SCOPE фирмы Valdada обеспечивает дискретную смену увеличения 1 и 4 крат, угловое поле, соответственно, 25,6 и 7,8 градуса, удаление выходного зрачка 89 мм, имеет длину 184 мм, массу 652 г. Внешний вид прицела представлен на рис. 4. Судя по внешнему виду, прибор имеет внутреннюю выверку, информации об устройстве принципиальной оптической схемы авторы не имеют.



Рис. 2. Внешний вид прицела Specter DR Dual Role 1.5-6x Combat Sight [6]



Рис. 3. Внешний вид прицела Specter TR 1-3-9x 3FOV Weapon Sight [7]



Рис. 4. Внешний вид прицела 1:4x32 QR-TS 35mm PITBULL COMPACTSCOPE фирмы Valdada [8]

Отечественный прибор ПСУ обеспечивает дискретную смену увеличения 1 и 4 крат, угловое поле, соответственно, 26 и 6,5 градуса, удаление выходного зрачка 70 мм, имеет длину 189 мм, массу 700 г. Часть оптической схемы и конструкции представлена на рис. 5.

Судя по [9, 10], оптическая схема принципиально выполнена в виде двух последовательно расположенных систем: афокальной насадки 1, 3, 4 прямого изображения с дискретной сменой увеличения и призмленного монокуляра, объектив 5 которого (или его часть) показан на рис. 5. Перемещение компонента 3 вдоль оптической оси из левого крайнего положения в правое крайнее обеспечивает дискретную смену увеличения без нарушения афокальности системы 1, 3, 4. Внутренняя выверка осуществляется перемещением сетки, расположенной в плоскости промежуточного изображения в призмленном монокуляре, перпендикулярно оптической оси. Для компенсации увода визирной оси прицела при

смене увеличения одновременно с выверкой осуществляется разворот оправы с компонентом 3 вокруг оси, конструктивно определяемой шаровой опорой 2.

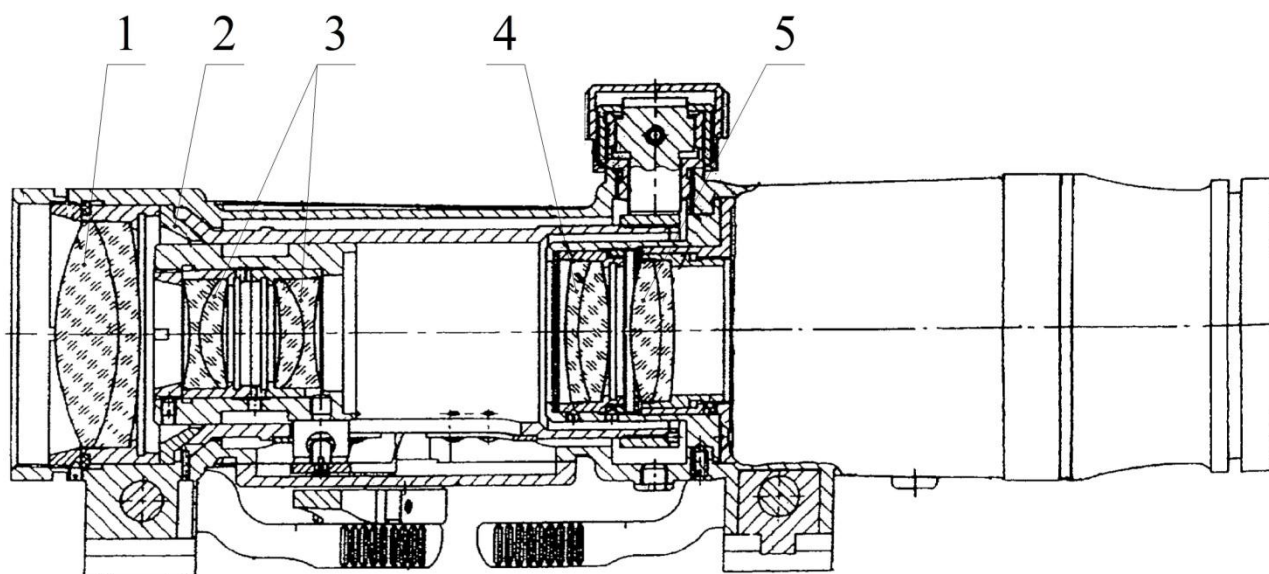


Рис. 5. Часть оптической системы и конструкции прицела ПСУ [9 – 11]

Таким образом, реализация системы смены увеличения с помощью оптических элементов, расположенных по ходу лучей до плоскости промежуточного изображения в прицеле, требует введения трех движений: для осуществления внутренней выверки, для смены увеличения, для компенсации увода визирной оси при смене увеличения.

Компаниями ЛУГГАР и «Оптическое Расчетное Бюро» [12, 13] проведена разработка двух оптических прицелов с дискретной сменой увеличения ПО 1,5/6 и ПО 1/4, в которых реализуется внутренняя выверка и дискретная смена увеличения путем использования двух независимых движений: для осуществления внутренней выверки и для смены увеличения, при этом положение визирной оси в пространстве предметов при смене увеличения не изменяется, поскольку в оптической схеме исключается принципиально увод визирной оси. Оптическая схема ПО 1,5/6 (рис. 6) обеспечивает увеличения 1,5 и 6 крат, угловое поле, соответственно, 16 и 4 градусов, диаметр входного зрачка 42 мм, длину 192 мм и массу оптики 200 г. Светосильный объектив 1 формирует на одной из поверхностей плоскопараллельной пластинки 2, на которой нанесена шкала, промежуточное изображение удаленных объектов, оборачивающая система 3-6, переворачивает изображение и формирует второе действительное изображение в передней фокальной плоскости окуляра 7. Для смены увеличения компоненты 3 и 5 вводятся / выводятся из хода лучей. Для изменения направления визирной оси прицела (выверки) предусмотрена возможность перемещения пластинки 2 перпендикулярно оптической оси системы.

Для удобства сравнения изделий, обсуждаемых в статье, их основные технические характеристики сведены в табл. 1.

Сопоставление технических характеристик отечественных разработок с зарубежными позволяет сделать вывод о том, что организация внутренней выверки не привела к ухудшению оптических и массо-габаритных характеристик, но повысила эксплуатационные показатели.

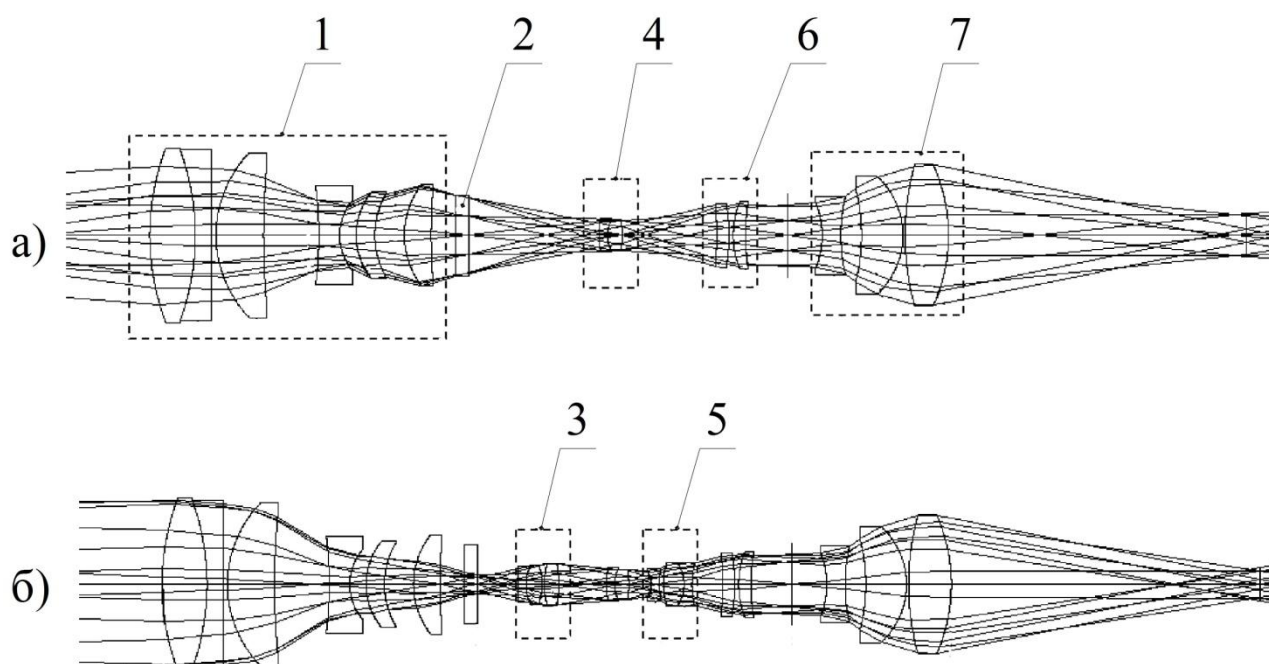


Рис. 6. Оптическая схема прицела ПО 1,5/6: а) увеличение 1,5 крат; б) увеличение 6 крат [12, 13]:

1 – объектив; 2 – сетка; 3 и 5 – подвижные компоненты оборачивающей системы; 4 – неподвижный компонент оборачивающей системы; 6 – коллектив; 7 – окуляр

Таблица 1

Технические характеристики прицелов с дискретной сменой увеличения

Название прицела	Γ , крат	2ω , градус	D_p , мм	D'_p , мм	s'_p , мм	L , мм	m , г	Диапазон выверки, т. д.
Specter DR Dual Role 1-4xCombat Sight[3 – 5]	1/4	24/6	32	8	70	184	640	$\pm 0-17$
Specter DR Dual Role 1.5-6x Combat Sight [6]	1,5/6	16/4	42	7	70	184	700	$\pm 0-17$
Specter TR 1-3-9x 3FOV Weapon Sight[7]	1/3/9	16/6/2	30/30/12	11,7/10/3,33	74,1/70,4/78,6	265	850	+0-25/ -0-08 $\pm 0-17$
1:4x32 QR-TS 35mm PITBULL COMPACT SCOPE [8]	1/4	25,6/ 7,2	32	32/8	89	184	652	0-19
ПСУ[9 – 11]	1/4	26/6,5	32	8	70	189	700	$\pm 0-10$
ПО 1,5/6[12, 13]	1,5/6	16/4	42	10/7	73,5	192	650	$\pm 0-10$
ПО 1/4	1/4	24/6	32	10/7	73	175	540	$\pm 0-10$
Примечание: Γ – увеличение; 2ω – поле зрения; D_p – диаметр входного зрачка; D'_p – диаметр выходного зрачка; s'_p – удаление выходного зрачка; L – длина; m – масса; т. д. – тысячная дистанции.								

Разработка методики юстировки является одним из этапов оптического проектирования, т.е. разработки оптической схемы изделия, и направлена на создание такой конструкции, которая обеспечивает технологичность изготовления, сборки и юстировки изделия, ориентированные на технологические возможности конкретного производителя. На примере одного из изделий (ПО 1,5/6) далее обсуждаются особенности этого этапа оптического проектирования – расчета юстировочных подвижек, дается обоснование методики юстировки, позволяющей расширить допуски на изготовление оптических и механических деталей и повысить технологичность изделия.

Первым этапом юстировки системы смены увеличения является юстировка наименьшего увеличения 1,5 крат: она осуществляется подвижкой компонента 4 вдоль оси (рис. 7) с одновременной установкой окуляра в положение, обеспечивающее нулевую расходимость осевого пучка за окуляром. Результаты расчетного моделирования юстировочных подвижек с одновременным расчетом требуемого смещения окуляра, величины видимого увеличения системы и качества изображения для различных точек поля сведены в табл. 2.

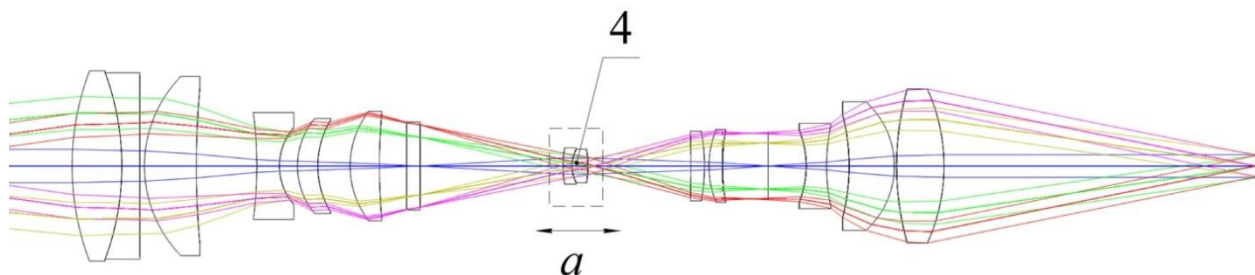


Рис. 7. Схема юстировки увеличения 1,5 крат

Таблица 2

Перемещение a компонента 4, мм	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2
Расходимость за окуляром, дптр	0,06	0,03	0	-0,03	-0,06
Требуемое смещение окуляра, мм	0,074	0,037	0	-0,036	-0,071
Γ , крат	1,491	1,483	1,476	1,468	1,461
Изменение Γ , крат	0,015	0,007	0	-0,008	-0,015
RMS на оси, отн. ед.	1	1	1	1	1
RMS на зоне, отн. ед.	2,18	2,14	2,11	2,07	2,04
RMS на краю, отн. ед.	4,39	4,37	4,24	4,24	4,16
Примечание: RMS – среднеквадратический размер aberrаций за окуляром прибора					

Согласно табл. 2, небольшие перемещения a ($\pm 0,2$ мм) компонента 4 будут вызывать расходимость за окуляром в диапазоне $\pm 0,06$ дптр, для компенсации которой окуляр должен перемещаться в пределах $\pm 0,074$ мм. При этом величина увеличения изменяется на $\pm 0,015$ крат, что составляет примерно 1 % от номинального значения увеличения. Аналогичные расчеты при увеличении величины подвижки a до ± 1 мм показывают, что качество изображения меняется незначительно и сохраняется близким к расчетному, что позволяет корректиро-

вать увеличение в пределах $\pm 5\%$ и более. Таким образом, юстировка наименьшего увеличения в прицеле может быть эффективно осуществлена при изготовлении оптических и механических деталей системы, расположенной за сеткой, с допусками на экономическом уровне точности.

Второй этап юстировки системы смены увеличения – одновременное достижение точного значения наибольшего увеличения 6 крат и сохранения диоптрийной установки окуляра – принципиально требуется не менее двух подвижек. При этом юстировка может осуществляться двумя способами: подвижками компонентов 3 и 5 или совместными подвижками компонентов 3 и 5, а затем дополнительной подвижкой одного из компонентов.

Оба способа юстировки были смоделированы расчетным образом. Результаты расчетного моделирования юстировочных подвижек первым способом – небольшими подвижками компонентов 3 и 5 (рис. 8) – представлены в табл. 3.

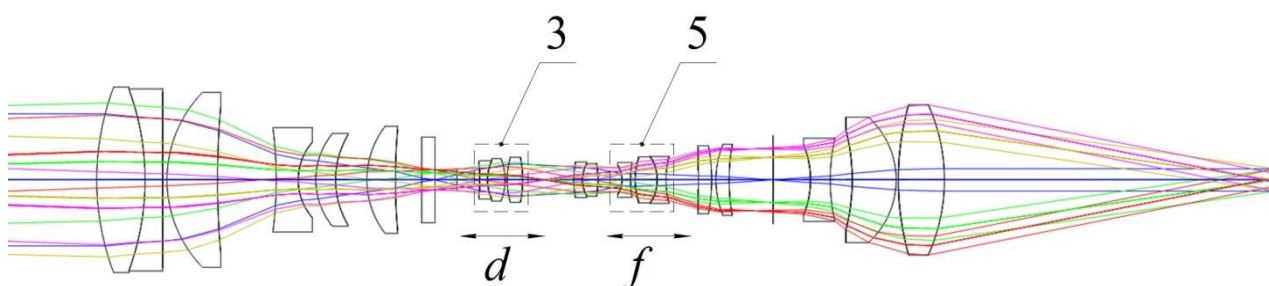


Рис. 8. Схема юстировки увеличения 6 крат независимыми подвижками

Таблица 3

	Перемещение d компонента 3					Перемещение f компонента 5				
Перемещение компонента, мм	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2
Смещение окуляра, мм	2,040	1,004	0	-0,973	-1,916	1,413	0,702	0	-0,693	-1,376
Расходимость за окуляром, дптр	1,65	0,81	0	-0,79	-1,55	1,14	0,57	0	-0,56	-1,11
Γ , крат	6,128	6,043	5,960	5,878	5,799	6,012	5,986	5,960	5,932	5,904
Изменение Γ , крат	0,168	0,083	0	-0,082	-0,161	0,052	0,026	0	-0,028	-0,056
RMS по оси, отн. ед	1,03	1	1	1	1	1,13	0,99	1	1,15	1,36
RMS на зоне, отн. ед	2,04	2,08	2,11	2,13	2,15	2,15	2,13	2,11	2,11	2,13
RMS на краю, отн. ед	1,70	1,60	1,60	1,68	1,78	1,58	1,58	1,60	1,66	1,74

Согласно табл. 3, небольшие перемещения d ($\pm 0,2$ мм) компонента 3 будут вызывать расходимость за окуляром в диапазоне $\pm 1,65$ дптр и изменение увеличения $\pm 0,168$ крат, что составляет до 3 % от номинального значения наиболь-

шего увеличения. Такие же по величине перемещения f компонента 5 будут вызывать расходимость за окуляром в диапазоне примерно $\pm 1,14$ дптр и изменение увеличения до $\pm 0,056$ крат, т.е. до 1 % от 6 крат. Таким образом, обеспечение нулевой расходимости может привести к относительной погрешности увеличения более 1 %.

Результаты расчетного моделирования юстировочных подвижек вторым способом – совместными подвижками компонентов 3 и 5 (подвижка b , рис. 9), а затем дополнительной подвижкой одного из компонентов (подвижки g и h) представлены в табл. 4.

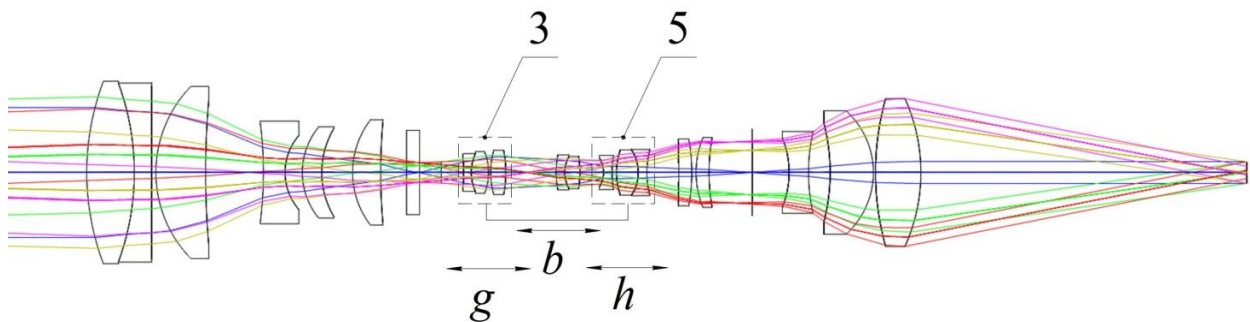


Рис. 9. Схема юстировки увеличения 6 крат совместной подвижкой b и одной из подвижек g или h

Таблица 4

Совместное перемещение b компонентов 3 и 5	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2
Расходимость за окуляром, дптр	2,82	1,39	0	-1,34	-2,63
Требуемое смещение окуляра, мм	3,488	1,715	0	-1,657	-3,256
Γ , крат	6,178	6,069	5,960	5,851	5,742
Изменение Γ , крат	0,218	0,109	0	-0,109	-0,218
RMS по оси, отн. ед	1,25	1,04	1,00	1,16	1,39
RMS на зоне, отн. ед	2,07	2,09	2,11	2,13	2,20
RMS на краю, отн. ед	2,32	1,63	1,61	1,77	2,01
Дополнительная подвижка g компонента 3	0,343	0,170	0	-0,170	-0,338
Расходимость за окуляром после дополнительной подвижки g , дптр	0	0	0	0	0
Γ после дополнительной подвижки g , крат	5,897	5,929	5,96	5,990	6,020
Изменение Γ после дополнительной подвижки g , крат	-0,063	-0,031	0	0,03	0,06
RMS по оси, отн. ед	1,04	0,96	1,00	1,13	1,34
RMS на зоне, отн. ед	2,18	2,13	2,11	2,10	2,09
RMS на краю, отн. ед	1,57	1,59	1,61	1,61	1,62
Дополнительная подвижка h компонента 5	0,490	0,244	0	-0,240	-0,477
Расходимость за окуляром после дополнительной подвижки h , дптр	0	0	0	0	0
Γ после дополнительной подвижки h , крат	6,048	6,004	5,96	5,916	5,872
Изменение Γ после дополнительной подвижки h , крат	0,088	0,044	0	-0,044	0,088
RMS по оси, отн. ед	1,54	1,22	1,00	0,98	1,15
RMS на зоне, отн. ед	2,10	2,09	2,11	2,15	2,23
RMS на краю, отн. ед	1,63	1,61	1,61	1,59	1,57

Согласно табл. 4, небольшие совместные перемещения b ($\pm 0,2$ мм) компонентов 3 и 5 будут вызывать расходимость за окуляром в диапазоне примерно $\pm 2,8$ дптр и изменение увеличения до $\pm 0,218$ крат. Для компенсации расходимости за окуляром необходимо ввести подвижку g компонента 3 или подвижку h компонента 5. Для случая, когда величина b равна $\pm 0,2$ мм, размер подвижки g не превышает значение $\pm 0,343$ мм. При этом знаки изменения увеличения системы относительно номинального значения увеличения до и после компенсационной подвижки будут разными, например, до компенсации увеличение было равно 6,178 крат, а после компенсации увеличение стало 5,897 крат. Для случая, когда величина b равна $\pm 0,2$ мм, размер подвижки h не превышает значения $\pm 0,49$ мм. При этом знаки изменения увеличения системы относительно номинального значения увеличения до и после компенсационной подвижки будут одинаковыми, например, до компенсации увеличение было равно 6,178 крат, а после компенсации увеличение стало 6,048 крат.

Несмотря на то, что типовые рекомендации по назначению юстировочных подвижек в оптических приборах отдают предпочтение использованию независимых юстировочных подвижек, результаты проведенного оптического моделирования возможных вариантов юстировки при сборке рассматриваемого изделия позволяют сделать вывод, что наиболее оптимальным решением для юстировки наибольшего увеличения является вариант с зависимыми подвижками b и h . Таким образом, рекомендации по юстировке сводятся к следующему: «Последовательными итерациями смещать внутреннюю оправу («качели») с установленными в ней компонентами 3 и 5 вдоль оптической оси прибора и подвижкой компонента 5 восстанавливать нулевую расходимость лучей за окуляром прибора. Из-за одинакового направления изменения увеличения до и после компенсационной подвижки, добиваться смещением оси «качелей» увеличения, близкого к необходимому, затем компенсировать возникшую расходимость подвижкой компонента 5. Если в процессе сборки увеличение находится в допуске, то «качели» можно не перемещать, а юстировать расходимость за окуляром – либо компонентом 3, либо компонентом 5, но из-за меньшего изменения увеличения предпочтительным является вариант с подвижкой компонента 5».

Аналогичное расчетное моделирование юстировки выполнено и для изделия ПО 1/4.

Полученные рекомендации реализованы при разработке конструкций изделий ПО 1,5/6 и ПО 1/4 (рис. 10, 11). Они учитывают технологические возможности предприятия-изготовителя - ОАО «Швабе – Оборона и Защита», Новосибирск. Испытания опытных образцов показали обеспечение в изделиях заявленных технических характеристик.

В заключение отмечается актуальность разработки оптических прицелов с дискретной сменой увеличения. Детальное оптическое проектирование, а именно: собственно разработка оптической схемы, ее анализ с позиций юстировки, поведение при различных температурах эксплуатации и т.п. – является основой создания конструкции изделия, реализуемой на технологиях предприятия-изготовителя и обеспечивающей заявленные технические характеристики.



Рис. 10. Внешний вид оптического прицела ПО 1,5/6 [13]



Рис. 11. Внешний вид оптического прицела ПО 1/4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова К. Д., Хацевич Т. Н. Оптические системы с переменными характеристиками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 13–20.
2. Запрягаева, Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, – М.: Логос, 2000 - 584 с.
3. Патент US 8432610, 2013.
4. Патент US 7869125, 2011
5. Raytheon ELCAN Optical Technologies Specter DR Dual Role 1 – 4x Combat Sight. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcan.com>, свободный. – Загл. с экрана.
6. Проспект Raytheon ELCAN Optical Technologies Specter DR Dual Role 1,5 – 6x Combat Sight. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcan.com>, свободный. – Загл. с экрана.
7. Specter TR 1-3-9x 3FOV WeaponSight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcan.com>, свободный. – Загл. с экрана.
8. 1:4x32 QR-TS 35mm PITBULL COMPACTSCOPE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.valdada.com>, свободный. – Загл. с экрана.
9. Пат. 2532605 Российская Федерация, МПК⁷ F41G 1/38, G02B 7/02. Оптический прицел [Текст] / Дейснер А.А., Комбаров М.С.; патентообладатели ОАО "Швабе – Оборона и Защита" – № 2013129085/28; заявл. 25.06.2013; опубл. 10.11.2014 Бюл. № 31.
10. Пат. 2534504 Российская Федерация, МПК⁷ F41G 1/38. Оптический прицел [Текст] / Дейснер А.А., Комбаров М.С.; патентообладатели ОАО "Швабе – Оборона и Защита" – № 2013141812/12; заявл. 11.09.2013; опубл. 27.11.2014 Бюл. № 33.
11. Прицел сменного увеличения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://shvabe-rnd.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
12. Пат. 2547044 Российская Федерация, МПК⁷ F41G 1/14. Оптический прицел с дискретной сменой увеличения / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. А.; патентообладатели ООО «Оптическое Расчетное Бюро» – № 2014120776/12; заявл. 22.05.2014 (находится в процессе публикации).
13. Оптический прицел с дискретной сменой увеличения ПО1,5/6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://luggar.org/>, свободный. – Загл. с экрана.

© К. Д. Волкова, Е. В. Дружкин, Т. Н. Хацевич, 2015

СОСТАВ И РАЗМЕРЫ СТЕКЛОФАЗЫ В МИКРОСТРУКТУРЕ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ

Людмила Борисовна Воробьева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат химических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Анна Дмитриевна Зонина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Светлана Арсеньевна Степанова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В статье рассмотрены состав и размеры стеклофазы в микроструктуре корундовой керамики. Проведены исследования влияния стеклофазы на качество металллокерамических спаев.

Ключевые слова: корундовая керамика, микроструктура, стеклофаза.

THE COMPOSITION AND DIMENSIONS OF THE GLASS PHASE IN THE MICROSTRUCTURE OF ALUMINA CERAMICS

Ludmila B. Vorobyeva

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the chemical sciences, docent department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

Anna D. Zonova

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, docent department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Svetlana A. Stepanova

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, docent department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

In article studied the composition and dimensions of the glass phase in the microstructure of alumina ceramics. Investigated the effect the glass phase on the quality of metal-ceramic junctions.

Key words: alumina ceramics, glassphase, microstructure.

Вакуум-плотная корундовая керамика как конструкционный материал не первое десятилетие успешно используется в электронных приборах авиацион-

но-космической и ракетной техники, устройствах мощных СВЧ-приборов, для сборки линеек лазерных диодов. Одним из характерных видов отказов электронных приборов с металлокерамической оболочкой является потеря ими герметичности. Надежность металлокерамической оболочки определяется как технологией металлизации и спекания, так и составом и размерами включений стеклофазы в микроструктуре керамики. Присутствие стеклофазы в составе керамики позволяет керамическим изделиям паяться друг с другом, а также с металлами посредством легкоплавких и тугоплавких стеклоприпоев. Основным фактором, определяющим прочность спая корундовой керамики с металлом, считают миграцию стеклофазы в металлизационный слой [1, 2]. Мигрирующая стеклофаза способствует протеканию химических реакций между компонентами керамики и металлизационного слоя, образованию переходного слоя и, кроме того, является связующим элементом между зернами металла металлизации и керамикой. Стеклофаза керамики способна мигрировать в металлизационный слой за счет капиллярных сил и смачивания зерен молибдена. Существенное влияние на процесс миграции стеклофазы в металлизационный слой и его вакуумную плотность оказывают состав стеклофазы, а также количество и размер её включений в объеме керамического изделия.

Целью работы является исследование стеклофазы в микроструктуре вакуум-плотной корундовой керамики и ее влияния на качество металлокерамических спаев.

Исследована микроструктура изделия из вакуум-плотной корундовой керамики ВК-95, содержащей 95 масс. % оксида алюминия (Al_2O_3) в качестве основной кристаллической фазы, а также 3 масс. % MgO и 2 масс. % SiO_2 . Наличие двух последних оксидов определяют особенности технологии и эксплуатационные свойства. Ионный радиус катиона в MgO близок к размеру ионного радиуса катиона основного оксида Al_2O_3 , поэтому добавка оксида магния повышает эффективность образования твердого раствора. Также рядом авторов отмечается, что присутствие MgO в составе керамики предотвращает рост зерен при спекании Al_2O_3 . Добавка оксида кремния обеспечивает формирование стеклофазы.

Анализ состава и размеров стеклофазы

Исследование составляющих микроструктуры керамики выполнялось на аншлифах с использованием микроскопа МИМ-10, оснащенного окуляр-микрометром МОВ-1-15Х. Показатель преломления стеклофазы n_D измерялся иммерсионным методом с точностью 0,001.

Согласно расчета спеченная керамика ВК-95 должна иметь стеклофазу состава (в масс. %): 14 MgO – 23 Al_2O_3 – 63 SiO_2 . Этот состав соответствует силикатному алюмо-магниево-кремнево-кислородному стеклу состава 21,4 MgO – 13,87 Al_2O_3 – 64,73 SiO_2 (молярных %).

Расчет показателя преломления стекла приведенного состава с использованием аддитивного метода А.А. Аппена [3] дает значение $n_D = 1,501$. Используемые при расчете приближенно-усредненные молярнодолевые значения

парциальной величины показателя преломления компонентов силикатных стекол приведены в табл. 1.

Таблица 1

Приближенно-усредненные значения парциальной величины показателя преломления компонентов силикатных стекол [3, 4]

Компонент	Молекулярная масса M_i	Показатель преломления n	Пределы применимости в мольных %
SiO ₂	60,08	1,4585	100–45
Al ₂ O ₃	101,96	1,520	0–20
MgO	40,30	1,610	0–25

Измеренное в аншлифе значение показателя преломления стеклофазы больше и равно 1,576–1,579. Следует отметить, что в аншлифах включения стеклофазы имеют выраженный светлый серо-зеленый цвет.

Для выяснения причины расхождения расчетных и измеренных значений показателя преломления стеклофазы корундовой керамики были синтезированы стекла трех составов (стекло 1, стекло 2, стекло 3): состава стеклофазы в керамике и двух составов с несколько большим содержанием SiO₂ (табл. 2).

Таблица 2

Состав и показатель преломления синтезированных стекол

Стекло	Состав стекол						Показатель преломления	
	в массовых %			в мольных %			вычисл.	измерен.
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂		
Стекло 1	14	23,0	63,0	21,40	13,87	64,73	1,501	1,578
Стекло 2	14	21,5	64,5	21,26	12,93	65,81	1,499	1,565
Стекло 3	14	20,0	66,0	21,13	11,94	66,93	1,497	1,558

Превышения измеренного значения показателя преломления стекла относительно расчетных значений составляют 4,4 %, 4,4 %, 4,1 % для стекол 1, 2 и 3 соответственно.

В аншлифах стеклофаза составов «стекло 2» и «стекло 3» имеет более темный цвет. В металлокерамических спаях керамики изделий низкого качества, быстро потерявших герметичность, наблюдаются мелкие включения стеклофазы размером 1,0–1,5 мкм темно-зеленого или темно-серого цвета с меньшим значением показателя преломления, чем для стеклофазы состава «стекло 1». Для корундовой керамики со стеклофазой соответствующей составу «стекло 1», характерно высокое качество металлизации, а для изделий – расчетный период наработки на отказ. В аншлифах качественной керамики марки ВК-95 включения стеклофазы имеют размеры 1,5–3,0 мкм и составляют не менее 5,5 % (объемных).

В процессе вжигания используемой в изделии молибдено-марганцевой металлизации керамики образуются оксиды марганца и оксиды молибдена (MoO_2 , MoO_3) кислотной природы. Кислотные оксиды металлов, соединяясь с основными оксидами керамики (Al_2O_3 и MgO) в совокупности со стеклофазой керамики, образуют легкоплавкие молибдаты и сложное стекло, определяющие прочность и плотность спая в изделии. Таким образом, выбор металла и технологии металлизации связан с составом керамики, подлежащей металлизации. Другим не менее важным фактором, определяющим прочность спая корундовой керамики с металлом, является миграция стеклофазы в металлизационный слой [3-4]. Миграция стеклофазы способствует протеканию химических реакций между компонентами керамики и металлизационного слоя, образованию переходного слоя и, кроме того, является связующим элементом между зернами металла и керамикой. Существенное влияние на процесс миграции стеклофазы в металлизационный слой и его вакуумную плотность оказывают количество и вязкость стеклофазы, а также особенности её распределения в керамическом изделии.

Выводы

Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что стеклофаза корундовой керамики марки ВК-95 распределена в аншлифах участками размером 1,5-3,0 мкм, имеет серозеленый цвет и соответствует расчетному составу 21,4 MgO – 13,87 Al_2O_3 – 64,73 SiO_2 (в мольных %). Стеклофаза приведенного состава и размеров способствует образованию герметичных спаев с металлами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьева Л. Б., Зонова А. Д., Степанова С. А. Оценка погрешности измерений параметров микроструктуры керамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 115–120.
2. Симонова Г. В., Плетнёв П. М., Степанова С. А. Связь микроструктуры функциональной керамики с ее физико-техническими свойствами /// ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5. – С. 80–84.
3. Аппен, А.А. Химия стекла [Текст] / А.А. Аппен // Л.: Изд-во «Химия», 1970. – 352 с.
4. Немилов, С.В. Оптическое материаловедение: Оптические стекла. Учебное пособие, курс лекций [Текст] / С.В.Немилов // СПб: СПбГУ ИТМО, 2011 г. - 175 с.

© Л. Б. Воробьева, А. Д. Зонова, С. А. Степанова, 2015

ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ ТЕРАСТРУЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЯРКОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, профессор, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Геннадий Владимирович Шувалов

Сибирский НИИ метрологии, 630099, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова 4, директор, тел. (913)932-24-82, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Дмитрий Павлович Симонов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (923)245-38-99, e-mail: dumkah@gmail.com

Предложен оперативный метод контроля качества поверхности на основе изменения яркости её цифрового изображения. Оценка шероховатости и неоднородность рельефа поверхности показаны.

Ключевые слова: шероховатость, контроль качества, статистические характеристики, спектральная зависимость яркости, автоматизация.

EVALUATION OF SURFACE ROUGHNESS PRODUCTS FOR THE FORMATION OF THE PHOTONIC TERAJETS BASED ON THE CHANGES IN THE BRIGHTNESS OF DIGITAL IMAGE

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., professor department of metrology and optical engineering technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Chief of the department of metrology and optical engineering technology, professor, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Gennady V. Shuvalov

Siberian Research Institute of Metrology, 630099, Russia, Novosibirsk, Prospect Dimitrova 4, Director, tel. (913)932-24-82, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Dmitry P. Simonov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (923)245-38-99, e-mail: dumkah@gmail.com

The method of operating surface quality control on the basis of changes in the brightness of its digital image. Evaluation of surface roughness and heterogeneity of the surface relief are shown.

Key words: roughness, quality control, statistical characteristics, spectral dependence of the brightness, automation.

Для решения многих прикладных задач необходима информации о состоянии поверхности используемых компонентов. К таким характеристикам относятся шероховатость поверхности и неоднородность её распределения.

Для оценки и нормирования шероховатости поверхности известно примерно 30 параметров. ГОСТ 2789–73 [1] и ГОСТ 27964–88 [2] регламентируют шероховатость поверхности шестью параметрами, среди которых:

1. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины,
2. Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z – сумма средних арифметических (абсолютных) отклонений точек пяти наибольших максимумов и пяти наибольших минимумов профиля в пределах базовой длины,
3. Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} – расстояние между линией выступов профиля в пределах базовой точки.

Указанными нормативными документами допускается использование дополнительных параметров, к числу которых можно отнести среднеквадратическое отклонение профиля R_q (указывается в зарубежных стандартных по системе исчисления E).

Наибольшее распространение для бесконтактных измерений шероховатостей получили оптические приборы на основе светового сечения, теневой проекции и интерференции света [3]. В большинстве случаев эти методы требуют дополнительного дорогостоящего оборудования, а также использования визуальных наблюдений.

С другой стороны метрическая измерительная система может быть построена на основе цифровой съемочной системы, которая измеряет спектральные яркости в нескольких диапазонах в пространстве объектов и фиксирует измерения в плоскости изображения при определенных условиях. Однако для того чтобы на основе измерений яркостей изображения получить спектральные яркости объекта и, соответственно, определить объект и его характеристики, требуется установить функциональную зависимость с учетом всех факторов, влияющих на измерения спектральных яркостей. Одним из вариантов получения решения – нахождение статистических характеристик, описывающих распределение яркостей совокупности элементов. В частности, получение функции плотности распределения вероятностей яркостей элементов, образующих изображение объекта [4]. Отобразив функцию распределения плотности вероятности нахождения системы в данном состоянии, то есть отображение varia-

тивности, обусловленной объектом, можно выделить заданный вид объекта (параметры объекта) из других, обладающих другой зависимостью. Использование такого подхода позволит разработать методики дешифрирования цифровых изображений с учётом указанных особенностей, а, следовательно, повысить информативность и эффективность определения контролируемых свойств объекта, например, шероховатости поверхности. В большинстве случаев описание изображения какого-либо объекта не может быть задано абсолютными значениями яркости, поскольку на эту характеристику влияет множество других факторов [4]но можно использовать функцию частоты появления пикселей заданного уровня в совокупности пикселей, составляющих объект.

Рассмотрим в качестве примера определение шероховатости поверхности мезоразмерного диэлектрического кубика, предназначенного для использования в системах формирования фотонных терастрей [5-6] и выполненного из материала фторопласт-4 (продукт полимеризации тетрафторэтилена) [7]. Образец изготавливался в ФГУП СНИИМ с требованием $R_z=40$. Для получения количественной оценки указанного признака, то есть его измерения, была проведена калибровка соответствующей измерительной системы (микроскопа). На рис. 1, а показан фрагмент исходного изображения поверхности кубика с нанесенной масштабной меткой. Изменение яркости поверхности обусловлено расфокусировкой при перепаде высоты из-за неровности поверхности и неоднородностью освещения. Процесс определения шероховатости поверхности заключал следующие основные этапы: определение участка поверхности для цифровой обработки, выделение границы края и заданием системы отсчёта (рис. 1, а), приведение изменения яркости по снимку на 5 ступенчатых значений (рис. 2), в которых участки с одной условной яркостью раскрашены в различные цвета (рис. 1, б) и построение гистограмм цветового распределения по каналам в системе RGB (рис. 3, 4).

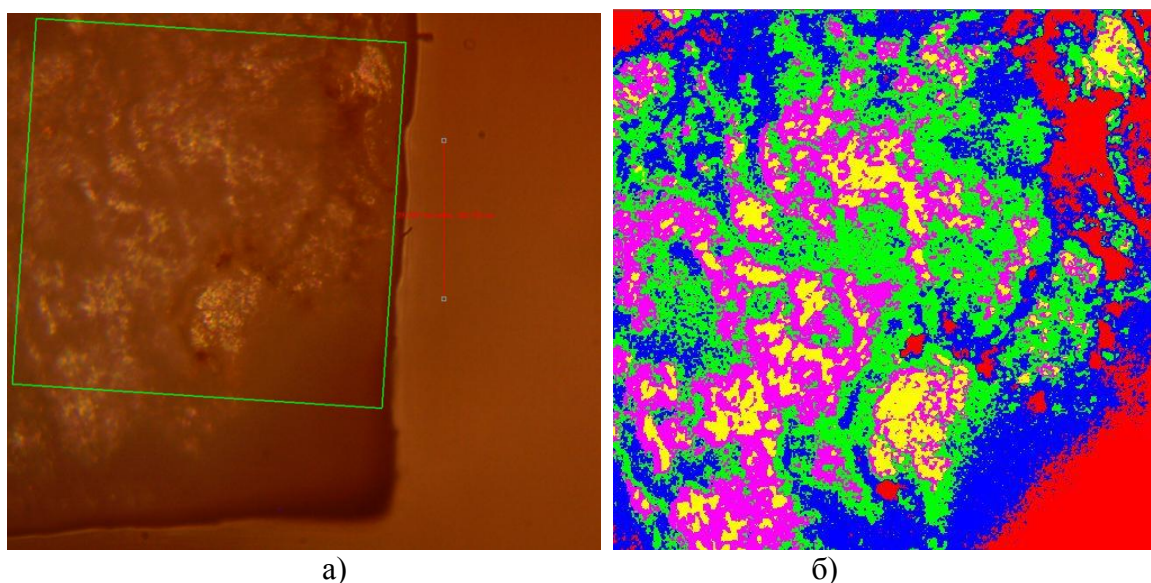


Рис. 1. Участок поверхности диэлектрического куба (а) и цветовое кодирование (б) выбранного для контроля участка поверхности

Количественное соотношения пикселей разной яркости показано на рисунке 2. Полученное распределение показывает, что присутствует существенная неоднородность распределения отражательной способности по поверхности образца.

1	42774	Red
2	82664	Blue
3	93274	Green
4	66089	Magenta
5	25993	Yellow

Рис. 2. Количественное распределение пикселей по заданным уровням яркости

На рис. 3 показано изображение объекта в разных спектральных интервалах соответствующих системе RGB

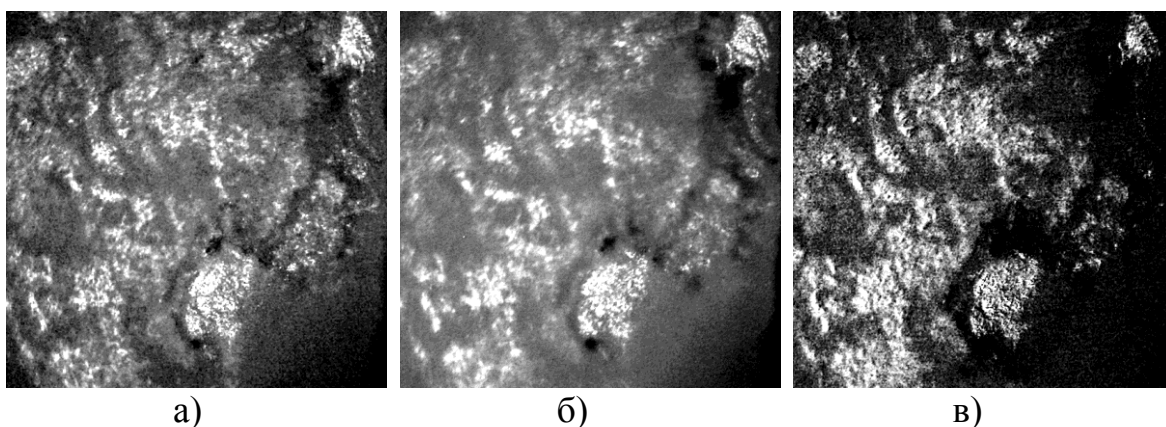


Рис. 3. Изображения контролируемого участка при цветовом кодировании красным (а), зеленым (б) и синим цветом (в)

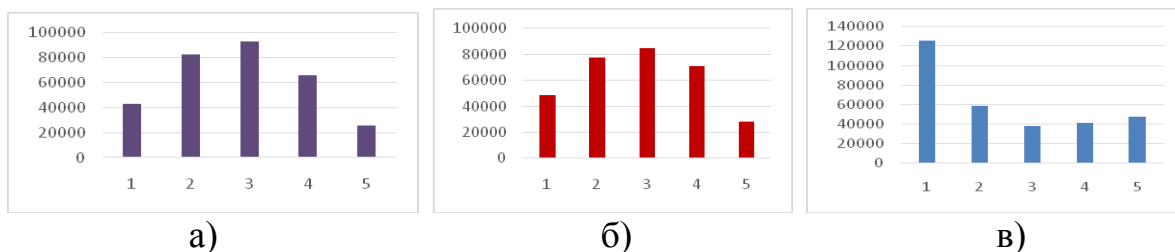


Рис. 4. Гистограммы распределения яркости по каналам в системе R(а)G(б)B(в)

Полученные изображения и гистограммы показывают различную информативность спектральных каналов, но подтверждают неоднородность распределения.

Однако на распределения яркости по исследуемой поверхности может влиять и неоднородность освещения исследуемого участка, поэтому для количественной оценки удобнее использовать край образца. В этом случае шероховатость поверхности можно определить в предположении, что неровность края это поверхность образца сбоку. Было введено условное начало координат как

линии примерно параллельной грани кубика и перпендикулярной второй стороне. В этой условной системе координат были пересчитаны и сравнены все X координаты в пикселях, принимая границу отсчёта за Y. В результате было получено, что минимальное отклонение составило 19 пикселей, а максимальное – 31. Разница (в данном случае и перепад высот) составила 12 пикселей, что при заданном масштабе соответствует примерно 15 мкм. Измеренная данным методом величина шероховатости соответствует предъявляемым при изготовлении требованиям.

Приведенный пример показывает возможность использования предложенной методики для объективного контроля различных объектов и определения их параметров, например, шероховатости и неоднородности поверхности. Рассмотренный подход с использованием компьютерной обработки, расширяет номенклатуру и диапазон возможных методов для практического применения в соответствующих задачах, а также позволяет автоматизировать процесс контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77). Шероховатость поверхности. параметры, характеристики и обозначения.
2. ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78) Шероховатость поверхности. термины и определения.
3. Корчевский В.В., Румановский И.Г. Базовые методы и средства измерений и испытаний в технике. Электронное учебное пособие, режим доступа <http://str2407.px6.ru/>
4. Симонов Д. П., Хлебникова Е. П. Исследование возможности использования цифровых снимков высокого разрешения для определения отражательных характеристик растительности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 64–69.
5. V. Pacheco-Pena, M. Beruete, I. V. Minin, O. V. Minin Terajets produced by 3D dielectric cuboids // Appl. Phys. Lett. V.105 (2014) pp. 084102-084105
6. Минин И. В., Минин О. В., Харитошин Н. А. Формирование фотонных тераструктур от диэлектрических частиц, не обладающих осевой пространственной симметрией формы // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 102–111.
7. ГОСТ 10007-80. Фторопласт-4. Технические условия.

© И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, Д. П. Симонов, 2015

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЯСА ПТИЦЫ

Ирина Георгиевна Пальчикова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, тел. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

Александр Федорович Алейников

Сибирский физико-технический институт аграрных проблем Российской академии сельскохозяйственных наук, 630501, Россия, Новосибирская обл., Новосибирский район, п. Краснообск, а/я 468, доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАЕН, главный научный сотрудник, e-mail: fti2009@yandex.ru

Юрий Васильевич Чугуй

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, директор; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, тел. (383)306-58-95, e-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Евгений Сергеевич Смирнов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Ксения Николаевна Ницеевская

Сибирский научно-исследовательский институт переработки сельскохозяйственной продукции Российской академии сельскохозяйственных наук, 630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, п. Краснообск, а/я 358, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)348-04-09, e-mail: fti2009@yandex.ru

Александр Николаевич Швыдков

ООО «Птицефабрика Бердская», 633004, Новосибирская обл., г. Бердск, ул. Промышленная, 38, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, тел. (383)412-24-87

Установлен инструментальный метод определения цветовых характеристик (длина волны и насыщенность) и цветовых различий образцов мясного сырья. Показана возможность и обоснована необходимость проведения калибровки цифровых измерительных колориметрических устройств и уточнения алгоритма расчета доминирующей длины волны. Разработанный оптический метод позволяет выявить интенсивные деструктивные процессы, происходящие в мясе при нарушении технологии выращивания, при несоблюдении технологии хранения и др.

Ключевые слова: цифровое изображение, цветовые характеристики, доминирующая длина волны, мясное сырье.

OPTICAL METHOD FOR THE QUALITY INSPECTION OF THE RAW POULTRY MEAT

Irina G. Palchikova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Sc. D., Laboratory Head; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Physical Department tel. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

Alexander F. Aleynikov

Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Agricultural Sciences, 630501, Novosibirsk region, Krasnoobsk, p.o. box 468, Professor, Principal Scientist, e-mail: fti2009@yandex.ru

Yuri V. Chugui

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Professor, Director; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St.; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 Karla Marksa Prospekt, tel. (383)306-58-95, e-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Evgenii S. Smirnov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Junior Researcher, tel. (965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Kseniya N. Nitsievskaia

Siberian Physical-Technical Institute of Agrarian Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Agricultural Sciences, 630501, Novosibirsk region, Krasnoobsk, p.o. box 358, Ph. D., Junior Researcher, tel. (383)348-04-09, e-mail: fti2009@yandex.ru

Alexander N. Shvidkov

BerdsK Poultry Farm Ltd., Russia, BerdsK, 38 Promishlennaya St., Ph. D., Director, tel. (383)412-24-87

The instrumental method for determining the color characteristics (dominant wavelength and saturation) and the color difference of the raw poultry meat samples is elaborated. The calibrating method and the modification of the procedure of the digital image processing for the dominant wavelength finding are proposed. Intense destructive processes occurring in the meat under violation of the cultivation or storage technology can be detected by mean of proposed optical method.

Key words: the digital image, color characteristics, dominant wavelength, poultry meat.

Оценка качества мяса является одной из первоочередных задач, так как от оперативности контроля и объективности оценки признаков, характеризующих мясо, зависит качество выдаваемой потребителю продукции в целом, её себестоимость, своевременность выбора и принятие адекватных мер по снижению брака на производстве [1]. Существующие методы оценки качества мясного сырья трудоемки, требуют применения при контроле качества дорогостоящего оборудования. Время проведения оценки длительное и не позволяет использовать традиционные методы для отбраковки покупателем поставляемого мясного сырья [2-4]. Для экспресс-оценки качества мяса широко используются опти-

ческие методы, которые дают более объективную характеристику свежести исследуемого мясного сырья по сравнению с регламентированными методами.

Настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов использования цветового анализа видеоизображений для оценки качества мяса птицы. Изучаются возможности, которые предоставляют интегральные цветовые характеристики (доминирующая длина волны и насыщенность) для количественного описания образцов и установления связей оптических свойств мяса птицы различных видов с особенностями условий их содержания, кормления убоя и хранения.

Были исследованы образцы мяса цыплят-бройлеров и кур-несушек производства ООО «Бердская птицефабрика», и ЗАО «Приосколье». Эти образцы были подвергнуты маркировке: образец №1 (красные и белые мышцы, дата выработки 01.09.2013, мясо кур несушек, ООО «Бердская птицефабрика»); образец №2 (красные и белые мышцы, дата выработки 10.02.2014, мясо цыплят-бройлеров, ООО «Бердская птицефабрика»); образец №3 (красные и белые мышцы, дата выработки 14.03.2014, мясо цыплят-бройлеров, ООО «Бердская птицефабрика»), образец №4 (красные и белые мышцы, дата выработки 05.05.2014, мясо цыплят-бройлеров, птицефабрика ЗАО «Приосколье»), образец №5 (фарш, дата выработки 03.06.2014, ООО «Бердская птицефабрика»). То есть были исследованы образцы мяса двух видов птицы (бройлеры, несушка), трёх видов полуфабрикатов (красное и белое мясо, фарш), с отличающимися срезами (вдоль, поперек волокон), а так же разных сроков хранения и производителей.

В качестве основного элемента оптической установки (рис.1) использовалась цветная телевизионная камера Видеоскан 415/Ц *USB Camera* (матрица *ICX415, Sony Corp., Japan*; ООО «ЭВС» Россия, Санкт-Петербург). Измерительный объём анализатора цвета определяет максимальный размер исследуемого образца, который помещается в кювету. Кювета также выполняет функцию защитной крышки при хранении и транспортировке анализатора. При исследовании характеристик поверхности образца кювета помещалась вблизи открытого торца измерительного блока, защитный корпус которого выполнен из непрозрачного материала. Для освещения исследуемого образца во время его видеосъёмки камерой в измерительном блоке анализатора предусмотрено использование внутреннего осветителя. Для освещения исследуемого образца во время его видеосъёмки в измерительном блоке анализатора предусмотрено использование как внутреннего, так и отдельного внешнего осветителя. Импульсный режим подсветки с высокой энергией и малой экспозицией позволяет выполнять более точные измерения в условиях фоновой засветки помещения. Процесс определения характеристик мясного сырья включает подготовку образца мяса птицы, получение и регистрацию его изображения с помощью цифровой камеры, преобразование изображения в цифровой формат для дальнейшего использования в компьютере и последующую обработку файла по соответствующим алгоритмам. Зарегистрированное камерой цифровое изображение пересылается в компьютер, где специально созданное программное обеспечение выполняет его обработку и представляет результаты на мониторе.

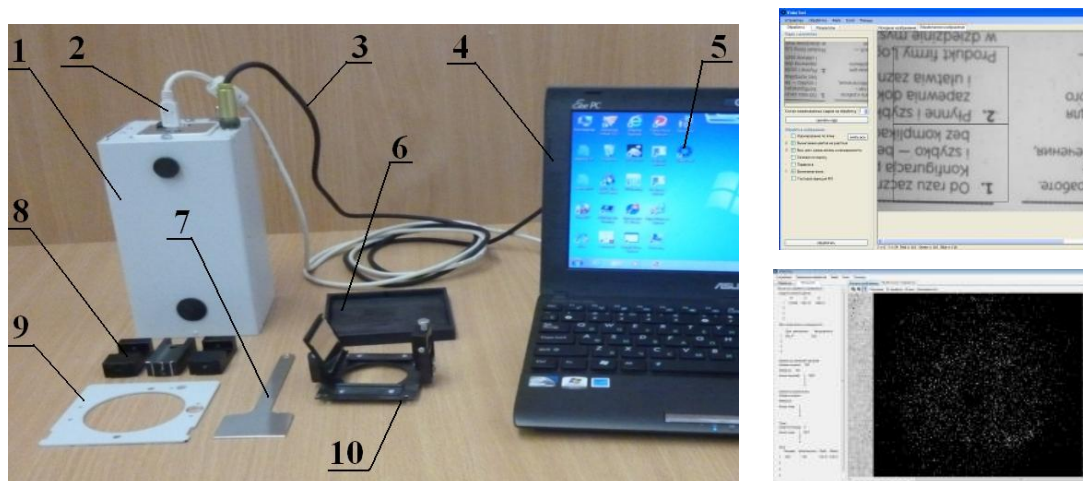


Рис. 1. Внешний вид портативного анализатора цвета:

1 – измерительный блок; 2 – кабель USB; 3 – кабель питания внутреннего осветителя; 4 – компьютер; 5 – ярлык программы «ColourVideoTool»; 6 – кювета для исследуемого образца; 7 – лопатка; 8 – сменные стойки; 9 – сменная верхняя крышка защитного корпуса; 10 – кронштейн световода внешнего осветителя.

Справа приведены рабочие окна программы

Предварительная цветовая коррекция изображения не применялась, типы калибровки камеры «баланс белого» и «баланс чёрного» выполнялись по мере необходимости до начала серии экспериментов. Общеизвестно, что цветные камеры позволяют лучше идентифицировать объекты, имеющие различные коэффициенты отражения в различных частях видимой области спектра. В ряде случаев на цветном изображении различимы детали, незаметные на полутоновом изображении.

Программа выполняет следующие функции: выбор типа камеры; отображение изображения; выбор рабочего кадра; создание фонового кадра; выбор участков рабочего кадра, на которых подсчитываются средние значения R , G , B – компонент и установка их нижнего и верхнего граничных уровней, при выходе за которые, пиксели из подсчета исключаются; нормировка рабочего кадра по фону, вычисление доминирующей длины волны λ_d и насыщенности s по каждому участку по средним значениям R , G , B – компонент; установка «баланса белого» для источника; введение координат цвета источника в специальное окно; обработка записанных ранее файлов в raw формате [3, 4]. Предусмотрен вывод двумерных карт и трёхмерных распределений вычисленных значений характеристик.

Доминирующая длина волны и насыщенность для каждой точки изображения (пикселя) вычисляются с использованием спектрального локуса. В наших приложениях мы не вводили дополнительных длин волн для пурпурных цветов, а принимали для них отрицательные значения на линии пурпурных тонов. При таком определении пурпурные цвета не маскируют остальные в процессе последующей обработки цифровых изображений и не используются для выделения характеристик изображения или значимых маркёров.

Чтобы оценить эффективность передачи цвета, в качестве эталонных образцов сравнения использовались во-первых, разработанные оттиски цветов в диапазоне длин волн 380 - 645 нм с шагом 1 нм и специальные атласы для калибровки цветопередачи *Datacolor SpyderCheckr™*. Во-вторых, была разработана методика оценки цветопередачи с использованием спектральных цветов, получаемых с помощью монохроматора УМ-2. Изображения цветовых элементов попиксельно нормировались на фоновое изображение. В качестве фона выбрана белая матовая фотографическая бумага для струйной печати. Фон фотографировался перед съёмкой цвета один раз и сохранялся в виде графического файла. По нормированному изображению вычисляется доминирующая длина волны и насыщенность. Координаты источника света E использовались нами для каждого нормированного изображения при нормировании на белый фон.

На рис. 2 представлены графики, характеризующие цветопередачу разными камерами. По оси абсцисс указана доминирующая длина волны λ_d паспортных элементов атласа, по оси ординат – определенная анализатором цвета. Линия в крупную точку соответствует передаче длин волн камерой EVS (ООО «ЭВС» Россия, Санкт-Петербург), линия в мелкую точку и сплошная показывают передачу длин волн камерой Видеоскан 415/Ц USB Camera (матрица ICX415, Sony Corp., Japan; ООО «ЭВС» Россия, Санкт-Петербург), с разными (ярким и темным) источниками освещения. Пунктирная линия показывает идеальное соответствие паспортных и вычисленных величин доминирующих длин волн элементов атласа. Стандартные ошибки средних значений λ_d для выборок пикселей в пределах цветового элемента составили не более 0,05% от λ_d . В силу малого своего значения, данный параметр не различим на рис. 2. Графики цветопередачи для разных камер, с разными матрицами идентичны и практически совпадают друг с другом, что позволяет сделать вывод о наличии связи хода кривой графика с параметрами локуса. Точки графиков расположены таким образом, что координаты значений можно скорректировать до совпадения с пунктирной линией идеальной цветопередачи. То есть для получения достоверных количественных данных о цвете, возможно провести корректировку для используемой камеры. Разработанный способ расчета поправок в значения доминирующих длин волн цифровых изображений позволяет повысить достоверность и точность определения спектральных цветов до значения не более ± 2 нм в диапазоне 380 – 645 нм.

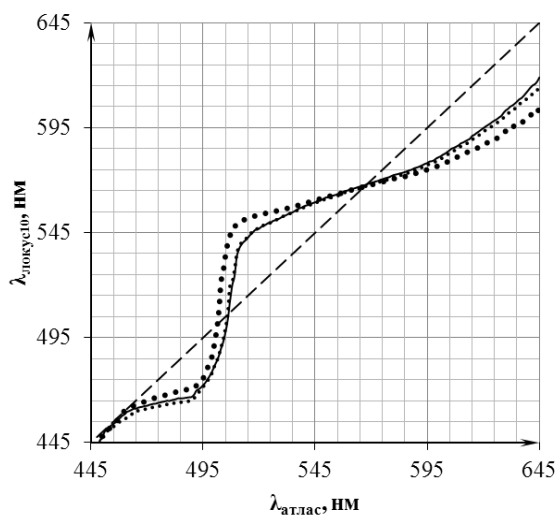


Рис. 2. Цветопередача анализатора с различными камерами

В табл. 1 приведены оптические свойства замороженных образцов мяса птицы, в табл. 2 – оптические свойства размороженных образцов мяса птицы.

Таблица 1

Значения доминирующей длины волны и насыщенности замороженных образцов видов птичьего мяса

№п/п	Длина волны, нм	Насыщенность, %	Описание и № образца
1	591,2	21,76	№1 белое вдоль
2	591,8	23,74	№ 1 белое поперек
3	603,7	25,36	№ 1 красное вдоль волокон
4	603,6	25,18	№ 1 красное вдоль волокон
5	605,7	30,21	№ 1 красное поперек 2
6	602,0	28,94	№ 1 красное поперек
7	588,0	24,02	№ 2 вдоль волокон белое
8	600,0	25,52	№ 2 вдоль волокон красное
9	586,0	20,71	№ 2 поперек волокон белое
10	599,90	26,96	№ 2 поперек волокон красное
11	608,6	30,63	№ 3 фарш 2
12	609,6	29,45	№ 3 фарш
13	583,7	20,81	№ 4 вдоль волокон
14	610,9	31,47	№ 4 вдоль волокон красное
15	614,2	27,38	№ 4 вдоль волокон красное 3
16	608,4	30,79	№ 4 вдоль волокон красное 2
17	584,2	19,86	№ 4 вдоль волокон белое
18	583,9	19,37	№4 поперек волокон белое
19	618,2	26,68	№ 4 поперек волокон красное 2
20	604,1	22,29	№ 4 поперек волокон красное 3
21	617,5	27,13	№ 4 поперек волокон красное
22	589,1	22,58	№ 5 вдоль грудка
23	590,8	22,89	№ 5 вдоль красное 2
24	590,6	26,75	№ 5 вдоль красное
25	588,6	22,61	№ 5 поперек бел
26	585,4	20,51	№ 5 поперек бел 2
27	592,9	27,26	№ 5 поперек красное

На основании анализа результатов исследований можно утверждать, что для образцов мяса ООО «Бердская птицефабрика», наблюдается четкая граница соответствия доминирующих длин волны белого и красного мяса. Это подтверждает нормальное, естественное формирование волокон, в соответствии с физиологическими возможностями, которые оптимизируются кормовыми, ветеринарными и другими технологическими факторами, определяющими содержание миоглобина.

Таблица 2

Значения доминирующей длины волны и насыщенности размороженных по истечению 6 часов со времени заморозки, образцов видов птичьего мяса

№п/п	Длина волны, нм	Насыщенность, %	Описание образца
1	602,7	27,73	№ 1 белое вдоль
2	600,9	22,19	№ 1 белое поперек
3	609,5	22,08	№ 1 красное вдоль волокон
4	603,8	23,98	№ 1 красное поперек
5	592,0	17,69	№ 2 вдоль волокон белое
6	595,6	20,01	№ 2 поперек волокон белое
7	600,3	24,11	№ 2 вдоль волокон красное
8	607,1	24,95	№2 поперек волокон красное
9	610,5	25,47	№ 3 фарш
10	609,3	24,79	№ 3 фарш 2
11	588,9	18,29	№ 4 вдоль волокон бел
12	585,4	23,30	№ 4 поперек волокон белое
13	611,8	25,99	№ 4 вдоль волокон красное
14	611,6	22,69	№ 4 поперек красное
15	590,4	21,78	№ 5 белый вдоль
16	595,6	24,66	№ 5 белый поперек
17	600,9	26,16	№ 5 красный вдоль
18	596,9	25,98	№ 5 красный поперек

В сравнении с мясом бройлеров, характеристика отраженного света мяса несушки имеет более выраженные различия между белым и красным мясом. Это объясняется тем, что мясо несушки имеет другой качественный и химический состав. Кроме того, оно менее водянисто, чем мясо бройлеров. В красном и белом мясе бройлеров находится больше липидов, влияющих на окисление метмиоглобина, определяющего его цвет. Как правило, любые технологические операции по снижению pH приводят к образованию оксигемоглобина и изменению цвета на не ярко красный. Быстрое обезвоживание мяса приводит к этому же эффекту, что и получилось при изготовлении фарша.

В образцах мяса ЗАО «Приосколье» отмечается отсутствие ярко выраженных границ между цветовыми характеристиками у белого и красного мяса. Отражение света практически в одной части спектра, 585–593нм, могут свидетельствовать о следующем. Во-первых, при кормлении использовались корма с высоким содержанием белка. Как правило, такие рационы требуют увеличения энергообеспечения организма за счет применения жира, снижая усвоение железа. Содержание жира в мясе при этом, резко возрастает, ускоряя процесс окисления метмиоглобина. А отсутствие способности переносить кислород связано с отравлениями ядовитыми веществами. Во-вторых, при обеззараживании видимо были применены дезинфицирующие растворы, снизившие насыщенность красного мяса до уровня белого. В-третьих, при производстве быстрее всего были использованы технологии инъектирования тушек, с целью получения более рельефной формы тушки. В-четвёртых, бройлеры выращивались при

клеточном содержании и интенсивном кормлении, сокращающем сроки выращивания, ускоряющем рост и формирование тушек, предполагающем или приводящим к изменению или нарушению обмена веществ, приводящему к нарушению мальабсорбции питательных веществ корма в кишечнике, усвоению и накоплению питательных веществ в виде транссудатов, вносящих свою коррекцию в информативную светоотражающую плоскость образцов.

Установлен инструментальный метод определения цветовых характеристик (доминирующей длины волны и насыщенности) и цветовых различий образцов мясного сырья. Показана возможность и обоснована необходимость проведения калибровки цифровых измерительных колориметрических устройств и уточнения алгоритма расчета доминирующей длины волны.

Разработанный оптический метод позволяет выявить интенсивные деструктивные процессы, происходящие в мясе при нарушении технологии выращивания, при несоблюдении технологии хранения и др. По оптическим свойствам ткани можно достоверно вести оценку качественных изменений замороженного и размороженного мяса птицы, обеспечить возможность и достоверность определения длительности хранения мяса в замороженном виде и его пригодность для употребления в пищу в соответствии с нормативными документами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лисицын А. Б., Липатов Н. Н., Кудряшов Л. С., Алексахина В. А., Чернуха И. М. Теория и практика переработки мяса // Под общей ред. академика РАСХН А. Б. Лисицына. – 2-е изд. – М.: Эдиториал сервис, 2008. – 308 с.
2. Алейников А. Ф., Пальчикова И. Г., Обидин Ю. В., Смирнов Е. С., Гляненько В. С., Чугуй Ю. В. Цифровая видеосистема для определения и анализа цветовых характеристик мясного сырья // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2013. – № 1. – С. 78–88.
3. Пальчикова И. Г., Обидин Ю. В., Смирнов Е. С., Алейников А. Ф., Чугуй Ю. В. Программное обеспечение экспериментальной установки для измерения цветовых характеристик мяса // Сборник научных докладов ВИМ. – 2013. – Т. 2. – С. 343–346.
4. Пальчикова И. Г., Алейников А. Ф., Чугуй Ю. В., Воробьев В. В., Ярушин Т. В., Сартаков В. Ю., Макашев Ю. Д., Швыдков А. Н. Портативный анализатор цвета поверхности образцов биологической ткани // Сибирский научный вестник. – 2013. – № 17. – С. 171–175.

*© И. Г. Пальчикова, А. Ф. Алейников, Ю. В. Чугуй,
Е. С. Смирнов, К. Н. Ницневская, А. Н. Швыдков, 2015*

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Татьяна Вячеславовна Ларина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Анна Дмитриевна Зонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В статье рассмотрена возможность определения изменений физических и механических свойств поверхности металла оптическими методами на примере анализатора содержания свинца СИМ-14. Определены его метрологические характеристики по содержанию свинца в аттестованной смеси.

Ключевые слова: физические и механические свойств, оптические методы, абсолютная и относительная погрешности.

THE POSSIBILITY OF DETERMINING CHANGES IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE METAL SURFACE OPTICAL METHODS

Tatiana V. Larina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Elena Yu. Kutenkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

Anna D. Zonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. tech., assistant professor Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

The article considers the possibility of determining the changes in the physical and mechanical properties of the metal surface by optical methods on the example of the analyzer lead SIM-14. Determine its metrological characteristics of the content of lead in the certified mixture.

Key words: physical and mechanical properties, optical methods, absolute and relative errors.

Коррозионная стойкость — способность материалов сопротивляться коррозии, определяющаяся скоростью коррозии в данных условиях. Для оценки скорости коррозии используются как качественные, так и количественные характеристики. Изменение внешнего вида поверхности металла, изменение его микроструктуры являются примерами качественной оценки скорости коррозии. Для количественной оценки можно использовать изменение какого-либо свойства за определённое время коррозии (например, электросопротивления, отражательной способности материала, механических свойств).

К настоящему времени разработан ряд оптоэлектронных приборов для неразрушающего контроля изменения свойств в различных веществах и материалах [1-7]. В данных приборах применяется принцип сравнения качественных параметров исследуемого объекта с эталоном, в роли которого могут применяться образцовые стандартизованные меры зернистости, шероховатости и дефектности.

Основной измеряемой оптической характеристикой выступает интенсивность отраженного светового потока от поверхности контролируемого объекта, которая сравнивается с величиной аналогичной характеристики эталона.

При исследовании цветности определяющим выступает спектр коэффициента отражения излучения светоизлучающего диода и монохроматическая чувствительность приемника оптического излучения.

В данной работе предлагается перспективный в отношении простоты и удобства анализатор СИМ-14, который предназначен для измерения содержания свинца в автомобильных бензинах при оперативном контроле его качества.

Принцип действия анализатора основан на разложении тетраэтилсвинца $Pb(C_2H_5)_4 \rightarrow Pb + 4C_2H_5$ при облучении его ультрафиолетовым излучением с длиной волны 320-350 нм с последующим фотометрическим определением

свинца после его реакции с 4-(2-пиридил-азо)-резорцином (Пар), при этом образуется соединение (рис. 1).

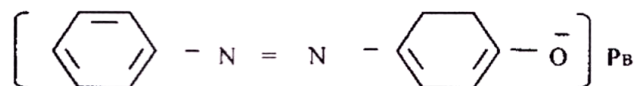


Рис. 1. Соединение свинца после реакции с 4-(2-пиридил-азо)-резорцином

Плотность цветонасыщения полученного соединения зависит от содержания в нем свинца.

Фотометрирование производится измерительным прибором, построенным по однолучевой двухканальной схеме.

Индикаторная бумага (далее – индикатор), предварительно смоченная в контролируемом бензине и обработанная согласно РЭ, попеременно освещается красным и зеленым светом. Отраженный от бумаги свет попадает на фотоприемник, при этом отношение интенсивностей отраженных красного и зеленого света зависит от содержания свинца в бензине.

Измерительный прибор рассчитывает содержание свинца в бензине и индицирует его в цифровом виде. Конструктивно анализатор состоит из измерительного прибора и ультрафиолетового излучателя (УФ-излучателя).

Основные технические характеристики:

- 1 Диапазон измерения содержания свинца в бензинах от 2,5 до 50 мг/дм³.
- 2 Пределы допускаемой относительной погрешности измерения содержания свинца в бензинах $\pm 10\%$.
- 3 Время непрерывной работы не более 8 ч.
- 4 Мощность, потребляемая анализатором, не более 25 В·А.
- 5 Габаритные размеры, мм, не более:
 - измерительного прибора 210×200×65;
 - УФ-излучателя 330×150×80.
- 6 Масса анализатора не более 4 кг.
- 7 Средняя наработка на отказ не менее 5000 ч.
- 8 Средний срок службы не более 5 лет.

Работа анализатора заключается в следующем. Индикатор 12 после предварительной обработки помещают в первичный преобразователь (ПП) и закрепляют прижимным устройством 1. Индикатор попеременно освещается источниками 2, 3 с разным спектральным составом (красным и зеленым).

Отраженный от индикатора свет попадает на фотоприемник 4. Электрический сигнал от фотоприемника поступает на усилитель 5 и далее на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 6. Разной концентрации свинца соответствует разная окраска индикатора, что приводит к изменению показаний АЦП и позволяет контроллеру вычислить измеряемую концентрацию.

Вычисленное значение через буфер 8 выводится на табло 9. Кнопками 11 задаются режимы работы прибора. Блок питания 10 обеспечивает работу прибора от сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц.

Анализатор состоит из ультрафиолетового излучателя (УФ-излучателя) и измерительного прибора, схема которого приведена на рис. 2.

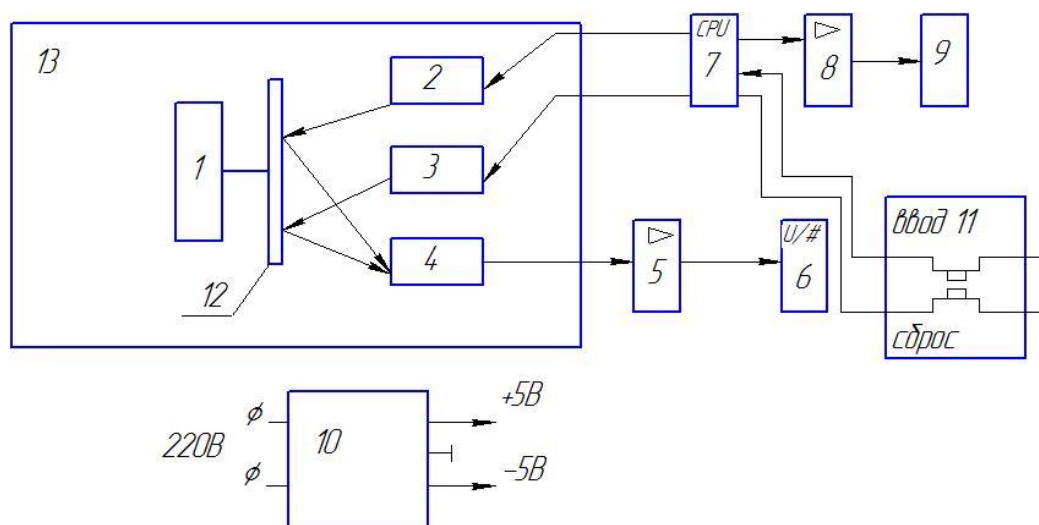


Рис. 2. Функциональная схема анализатора СИМ-14:

1 - прижимное устройство; 2, 3 - источник света; 4 – фотоприемник; 5 -усилитель; 6 -АЦП; 7 - контроллер; 8 - буферный каскад; 9 – табло; 10 - блок питания; 11 - кнопки; 12 -индикатор; 13 - первичный преобразователь

УФ-излучатель выполнен в металлическом корпусе 1. В корпусе находится ультрафиолетовая лампа и сушилка. Лампа закреплена в держателях. Под лампой находится подставка 2, на которую помещают индикаторы для облучения ультрафиолетовым излучением. На верхней крышке корпуса имеется отверстие, через которое встроенный в корпус вентилятор всасывает воздух. Отверстие закрыто сеткой 3, на которой размещают индикаторы при сушке. Кроме того, на крышке располагаются тумблер включения питания и кнопки включения ультрафиолетовой лампы, сушилки.

Измерительный прибор выполнен в унифицированном корпусе 1, изготовленном из ударопрочного полистирола. Для удобства работы с прибором корпус снабжен откидывающей подставкой 2, которая может служить ручкой для переноски прибора.

Внутренняя часть корпуса состоит из платы индикации, платы измерительного канала прибора и преобразователя напряжения. На передней панели расположены цифровое табло, тумблер включения питания, кнопки СБРОС и ВВОД, а также закреплён первичный преобразователь, предназначенный для фотометрирования индикатора.

На задней панели располагаются держатель предохранителя, сетевой кабель, клемма заземления и разъем для подключения анализатора к ПЭВМ (компьютеру).

Для определения свинца в различных бензинах использовался разработанный анализатор СИМ-14. Для испытаний применялись различные марки бензинов, приведённые в табл.

Результаты опытов по определению ТЭС в автомобильных бензинах

Марка бензина	Содержание свинца по ГОСТ 28828–90 (стандартный метод), мг/дм ³	Определение содержания свинца по СИМ-14, мг/дм ³	Среднее значение, мг/дм ³	Абсолютная погрешность, мг/дм ³	Относительная погрешность, %
«Бензин стабильный газовый» - ГОСТ 2084–77	0,013	0,011; 0,012; 0,012; 0,011; 0,012; 0,012; 0,012; 0,011; 0,015; 0,012; 0,009; 0,014	0,0119	0,0011	0,092437
«Бензин стабильный газовый» - ТУ 39-1340–89	0,010	0,012; 0,011; 0,011; 0,010; 0,011; 0,011; 0,011; 0,012; 0,011; 0,010; 0,011; 0,011	0,011	0,001	0,090909
«Бензин автомобильный АИ-95» - ГОСТ 2084–77	0,12	0,10; 0,09; 0,10; 0,09; 0,11; 0,11; 0,08; 0,09; 0,11; 0,10; 0,09; 0,11	0,098	0,022	0,22449
«Бензин автомобильный экспортный А-92» - ТУ 38.001165–87	0,15	0,16; 0,15; 0,16; 0,14; 0,15; 0,13; 0,15; 0,16; 0,15; 0,15; 0,15; 0,12	0,147	0,003	0,020408
«Бензин автомобильный с улучшенными экологическими свойствами»-ТУ 38.401-58-171–96	0,09	0,09; 0,08; 0,09; 0,07; 0,08; 0,10; 0,09; 0,08; 0,09; 0,08; 0,09; 0,10	0,086	0,004	0,046512
«Бензин АИ-80»- ТУ 38.00116597	0,013	0,012; 0,013; 0,012; 0,015; 0,012; 0,014; 0,012; 0,010; 0,013; 0,013; 0,015; 0,012	0,0127	0,0003	0,023622

Содержание свинца определялось сначала по стандартному методу (ГОСТ 28828–90. Стандартный метод определения свинца в бензинах), а затем с помощью прибора. В результате этого были исследованы его метрологические характеристики.

Расчет метрологических характеристик анализатора СИМ-14 проводился по следующей методике:

а) характеристика абсолютной погрешности содержания свинца в аттестованной смеси, равной 0,2 г/дм³, определяется по формуле

$$\Delta_1 = C \sqrt{\left(\frac{\Delta V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_2}{V_2}\right)^2} = 0,003 \text{ г/дм}^3, \quad (1)$$

где $C = 0,2 \text{ г/дм}^3$ – содержание свинца в аттестованной смеси;

$V_1 = 150 \text{ мл}$ – объём основного раствора;

$\Delta V_1 = 0,2 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

$V_2 = 300 \text{ мл}$ – объём чистого бензина;

$\Delta V_2 = 0,2 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

б) характеристика абсолютной погрешности содержания свинца в аттестованной смеси, равной $0,04 \text{ г/дм}^3$, определяется следующим образом:

$$\Delta_2 = C \left(\frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta V_2}{V_2} \right) = 0,0003 \text{ г/дм}^3, \quad (2)$$

где $C = 0,04 \text{ г/дм}^3$ – содержание свинца в аттестованной смеси;

$V_1 = 25 \text{ мл}$ – объём основного раствора;

$\Delta V_1 = 0,2 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

$V_2 = 365 \text{ мл}$ – объём чистого бензина;

$\Delta V_2 = 0,2 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

в) характеристика абсолютной погрешности содержания свинца в аттестованной смеси, равной $0,004 \text{ г/дм}^3$, определяется по следующей формуле

$$\Delta_3 = C \left(\frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta V_2}{V_2} \right) = 0,00004 \text{ г/дм}^3, \quad (3)$$

где $C = 0,004 \text{ г/дм}^3$ – содержание свинца в аттестованной смеси;

$V_1 = 5 \text{ мл}$ – объём основного раствора;

$\Delta V_1 = 0,05 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

$V_2 = 755 \text{ мл}$ – объём чистого бензина;

$\Delta V_2 = 0,2 \text{ мл}$ – предел допускаемой погрешности цилиндра;

Результаты испытаний приведены в табл. и представлены на рис. 3-4.

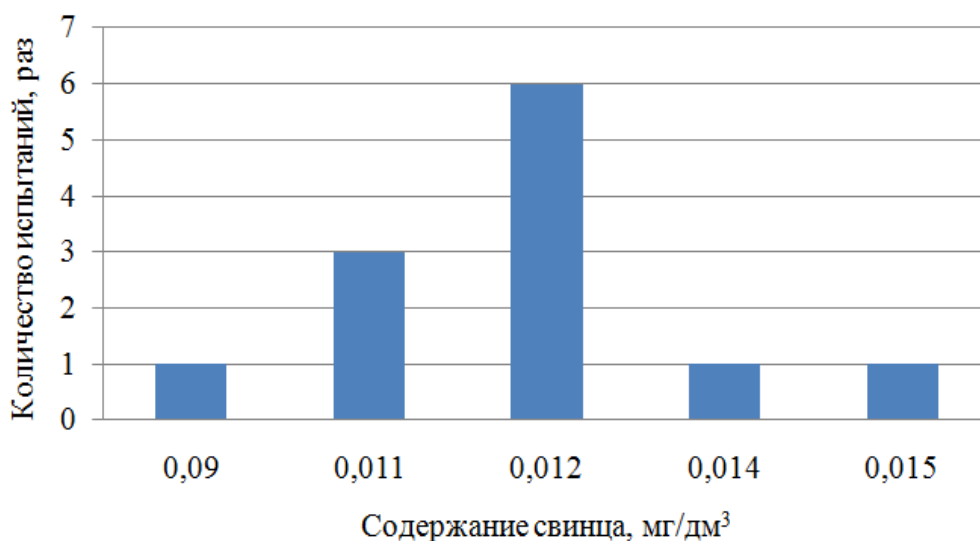


Рис. 3. ГОСТ 2084–77. Бензин стабильный газовый

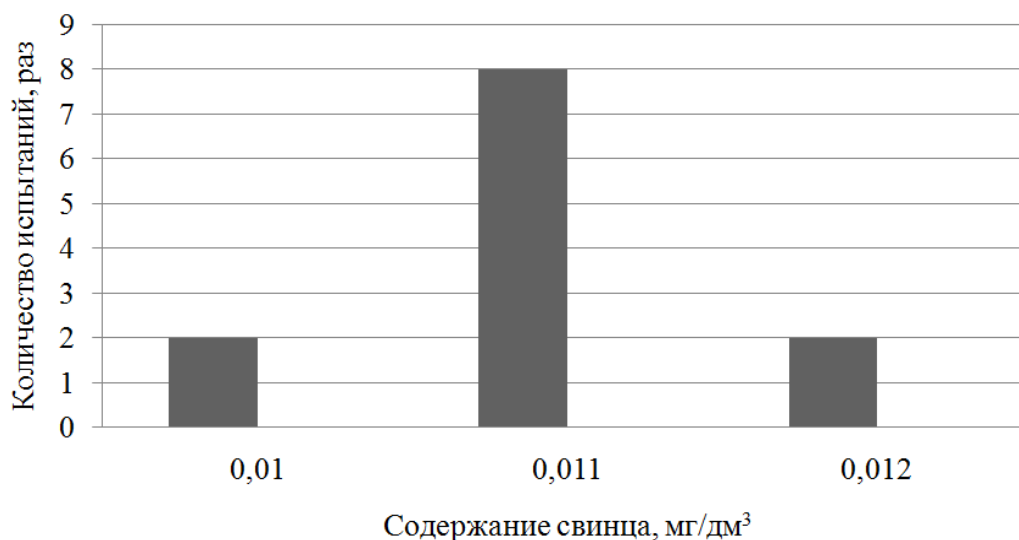


Рис. 4. ТУ 39-1340–89. Бензин стабильный газовый

Таким образом, по результатам испытаний можно сделать вывод, что определение погрешности содержания свинца от концентрации не превышает 10 %, что, в свою очередь, подтверждает действительные значения метрологических характеристик анализатора СИМ-14, изложенные в ТУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, Носков М. Ф. // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 3. – С. 131–132.
2. Пат. №2428728 Российская Федерация, МПК 51G01J 3/46. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Рахимов Б. Н., Ушаков О. К., Кутенкова Е. Ю., Ларина Т. В., заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2009147534/28; заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2011 Бюл. № 26. – 7 с.: 3 ил.
3. Пат. №2485457 Российская Федерация, МПК 51 G01 J 3/46, G01B 11/30. Оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов // Т. В. Ларина, О. К. Ушаков, Н. Р. Рахимов, М. П. Исаев, заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2012101558/28 (068170); заявл. 17.01.2012; опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17. – 9 с.: 2 ил.
4. Пат. № 2462698 Российская Федерация, МПК 51G01N 11/16. Устройство и способ для определения мест предразрушения конструкций / Рахимов Б. Н., Ларина Т. В., Кутенкова Е. Ю., заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2010147202/28, заявл. 18.11 2010 г. опубл. 27.05.2012 Бюл. № 27. – 11 с.: 4 ил.
5. Математическая модель анализа состояния поверхности конструкционных материалов / Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, В. М. Тымкул, О. В. Минин, И. В. Минин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 98–103.
6. РОптоэлектронная система для контроля усталости машиностроительных конструкций / Н. Р. Рахимов, Т. В. Ларина, О. К. Ушаков, В. А. Жмудь, П. В. Петров // Интерэкспо

ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 229–238.

7. Ларина, Т. В. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 111–115.

© Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, О. В. Минин,
И. В. Минин, А. Д. Зонова, 2015

ОБ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Роман Александрович Корякин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики, тел. (383)343-25-77, e-mail: koryakin@snga.ru

Артём Васильевич Логачёв

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель, тел. (383)343-25-77, e-mail: A.V.Logachev@snga.ru

Диана Георгиевна Макарова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: Diana_snga@mail.ru

Василий Михайлович Тымкул

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и опtotехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Рассмотрена математическая модель определения оптико-технологических параметров шероховатой поверхности применительно к субмиллиметровой области спектра.

Ключевые слова: коэффициент отражения, поверхность шероховатая, полированная, диффузная.

ABOUT REFLECTIVE ABILITY OF THE ROUGH SURFACE IN THE SUBMILLIMETRIC RANGE OF THE SPECTRUM

Victor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Roman A. Koryakin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, the senior teacher of faculty of higher mathematics, tel. (383)343-25-77, e-mail: koryakin@snga.ru

Artem V. Logachev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., the senior teacher of faculty of higher mathematics, tel. (383)343-25-77, e-mail: A.V.Logachev@snga.ru

Diana G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Post-graduate student of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: Diana_snga@mail.ru

Vasiliy M. Timkul

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Science, Professor, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@snga.ru

The mathematical model of definition of optic-technological parameters of a rough surface with reference to submillimetric area of a spectrum is considered.

Key words: Factor of reflection, surface rough, polished, diffuse.

В технологическом процессе формообразования оптической поверхности наиболее трудоемким является этап полирования – получения требуемой высоты микронеровности поверхности (R_a). Параметр R_a определяет шероховатость поверхности, обеспечивающий максимальное пропускание оптического материала, в данном спектральном диапазоне или для определенной длины волны (λ) излучения. В визуальном диапазоне спектра на длине волны $\lambda = 0,546$ мкм этот параметр установлен давно, проверен на практике и равен примерно $0,1 \lambda$ т.е. значению $R_z 0,05$ мкм, что примерно соответствует $R_a 0,01$ мкм.

Перспективы разработки оптической элементной базы для субмиллиметрового диапазона (СМД) спектра требует оптимизации технологии формообразования преломляющих поверхностей с учетом свойств материалов и серийности производства. Величины допусков размеров и формы (Δz) позволяют использовать на первом этапе формообразования поверхностей операции точения, фрезерования и горячего прессования.

Для анализа оптико-технологических параметров шероховатой поверхности воспользуемся следующей моделью отражения излучения от поверхности [1], применив отечественную систему обозначения параметров:

$$R = R_0 e^{-4\pi R_q / \lambda^2} + \alpha R_d \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения шероховатой поверхности;

R_0 – коэффициент отражения полированной поверхности;

R_d – коэффициент диффузного отражения поверхности;

α – коэффициент меньше единицы, зависящий от телесного угла приемного устройства и индикатрисы рассеяния.

R_q – среднеквадратическое отклонение профиля шероховатости поверхности [2].

Вычисляя коэффициент отражения R шероховатого профиля при достаточно большой величине длины волны λ , прочими компонентами (в том числе, диффузным отражением) отражательной способности профиля можно пренебречь [2, с.154] и считать $R = R_\lambda$, то есть

$$R_\lambda = R_0 e^{-4\pi R_q^2 / \lambda^2}, \quad (2)$$

откуда с помощью элементарных преобразований получаем

$$R_0 / R_\lambda = e^{4\pi R_q^2 / \lambda^2} \Rightarrow \ln R_0 / R_\lambda = 4\pi R_q^2 / \lambda^2 \quad (3)$$

При достаточно больших значениях λ можно положить, $\lambda \rightarrow \infty$, тогда

$$4\pi R_q^2 / \lambda^2 \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow \ln R_0 / R_\lambda \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow R_0 / R_\lambda \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 1$$

Последнее соотношение означает, что разница между данной шероховатой поверхностью и идеальной ровной поверхностью того же материала несущественна при достаточно большой длине волны.

Так как $R_0 / R_\lambda \rightarrow 1$, то $R_0 / R_\lambda - 1 \rightarrow 0$. Воспользуемся известным фактом, что при достаточно малых x

$$\ln 1 + x \sim x$$

Полагая выражение $(R_0 / R_\lambda - 1)$ в качестве x , получим асимптотическое соотношение при $\lambda \rightarrow \infty$:

$$\ln R_0 / R_\lambda = \ln 1 + R_0 / R_\lambda - 1 \sim R_0 / R_\lambda - 1 = R_0 - R_\lambda / R_\lambda$$

Подставляя это соотношение в формулу для коэффициента отражения R , с помощью элементарных преобразований получим:

$$\ln R_0 / R_\lambda = 4\pi R_q^2 / \lambda^2 \Rightarrow R_0 - R_\lambda / R_\lambda = 4\pi R_q^2 / \lambda^2 \Rightarrow R_q = \lambda \sqrt{R_0 - R_\lambda} / 4\pi \sqrt{R_0}$$

Заменяя $R_0 - R$ на величину R_d , получаем формулу зависимости диффузного отражения от среднеквадратичной шероховатости профиля:

$$R_d = R_0 4\pi R_q^2 / \lambda^2 \quad (4)$$

В отечественной практике вместо параметра шероховатости R_q используется параметр R_a , связь между которыми $R_a = R_q \sqrt{2/\pi}$ дана в работе [3].

Таким образом, в случае нормального распределения шероховатостей формула зависимости диффузного отражения от среднего значения шероховатости R_a профиля не зависит от дисперсии R_q^2 и имеет вид:

$$R_d = R_0 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 \quad (5)$$

Согласно [2] и вышеизложенным допущениям

$$R_{\lambda} = R_0 - R_d, \quad (6)$$

получим

$$R_{\lambda} = R_0 \left(1 - 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 \right) \quad (7)$$

Коэффициент отражения от полированной поверхности определяется коэффициентом Френеля и не зависит от шероховатости. Таким образом, коэффициент отражения от шероховатой поверхности определяется членом выражения (7), находящимся в скобках, зависит от высоты микронеровности и длины волны излучения. Для определения минимального значения R_a , положим выражение в скобках равным 0.

$$1 - 8\pi^3 R_a^2 / \lambda^2 = 0$$

Тогда R_a будет определяться выражением $R_a = \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}$, которое конечно не является математически точным, но позволяет в инженерном приближении назначать допуски на шероховатость поверхности в СМД спектра.

Для граничных значений длин волн субмиллиметрового диапазона при $\lambda = 100$ мкм высота микронеровностей $R_a = 6,3$ мкм, а при $\lambda = 1000$ мкм высота $R_a = 63,5$ мкм. Для рассматриваемого случая при $\lambda = 200$ мкм $R_a = 12,5$ мкм.

В докладе проиллюстрированы возможности применения математической модели определения оптико-технологических параметров шероховатости поверхности для назначения рациональных допусков применительно к субмиллиметровой области спектра

Для экономической обоснованности упрощения технологического процесса представлены данные времени на обработку детали в нормо-часах для разных шероховатостей поверхности Ra 12,5 и Ra 0,01 [4].

Поскольку значения допусков на изготовление довольно велики, то можно сделать вывод о возможности исключения из процесса формообразования оптической поверхности трудоемких операций как шлифование и полирование.

В качестве примера рассмотрим требования к изготовлению одиночной линзы в воздухе для $\lambda = 200$ мкм. На рис. представлены графики допусков и норм времени для изготовления первой поверхности линзы с учетом материала и технологии формообразования при разных требованиях к шероховатости поверхности. Необходимое качество изображения достигается при шероховатости поверхности Ra 12,5.

Из графиков видно, что рационально назначенный допуск шероховатости снижает трудоемкость изготовления поверхности более чем в три раза.

Поскольку значения допусков на изготовление довольно велики, а трудоемкость напрямую зависит от допусков, то можно сделать вывод о желательности и возможности исключения из процесса формообразования оптической поверхности таких трудоемких операций как шлифование и полирование для оптических деталей субмиллиметрового диапазона спектра.

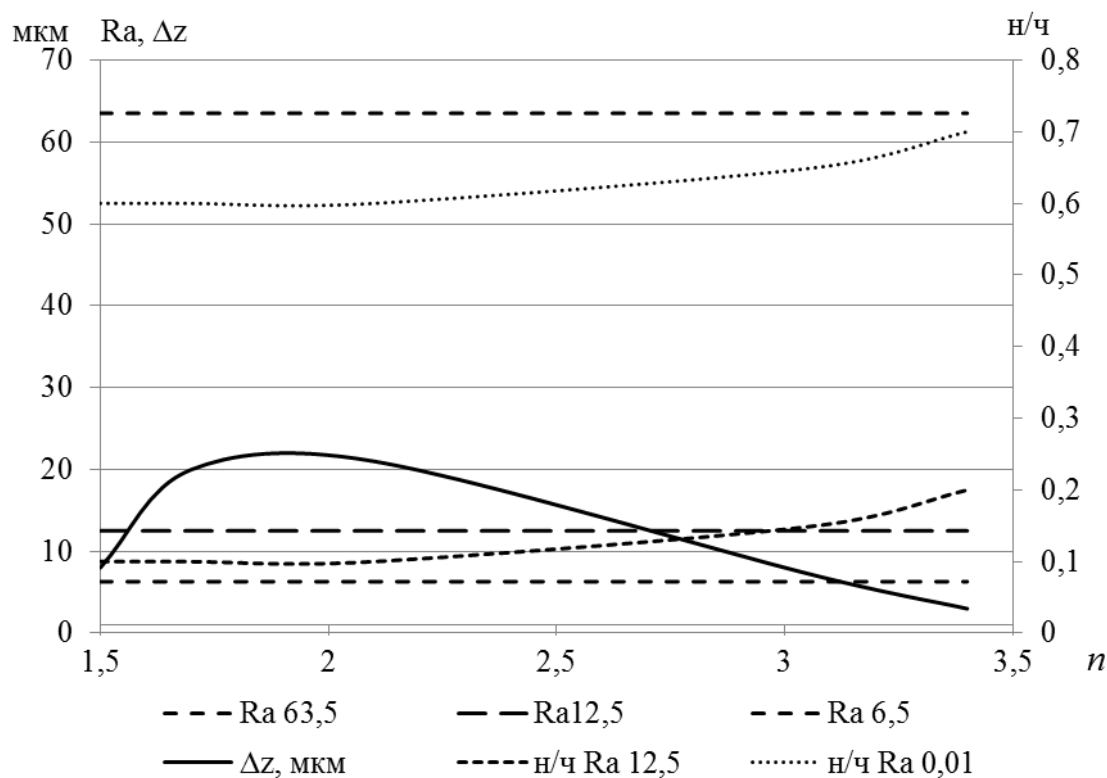


Рис. Графики значений допусков и норм времени для изготовления первой поверхности линзы с учетом материала и технологии формообразования

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davies H. Reflection of electromagnetic waves from rough surfaces // Proc. Inst. Elec. Engrs. 1954. Vol. 101. pp. 209-214.
2. Bennett, H.E. Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence / H. E. Bennett, J. O. Porteus // JOSA.-1961.-VOL.51.-№2.-S. 123-129.
3. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М. Наука, 1975. – 344 с.
4. Соболев, С.Ф. Методические указания по разработке технологических процессов изготовления деталей механической обработкой / С.Ф. Соболев, Ю.П. Кузьмин. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2007. – 118с.

© В. С. Ефремов, Р. А. Корякин, А. В. Логачёв, Д. Г. Макарова, В. М. Тымкул, 2015

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ФОРМЫ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Александр Григорьевич Поleshchuk

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsk.su

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: vkorolkov@yandex.ru

Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Рассмотрены методы изготовления и применения дифракционных оптических элементов для управления параметрами лазерного излучения и прецизионного контроля формы асферических поверхностей разработанные в ИАиЭ СО РАН.

Ключевые слова: синтезированная голограмма, дифракционный оптический элемент, асферический волновой фронт, интерферометр.

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF LASER RADIATION AND THE PRECISE TESTING THE ASPHERIC SURFACES

Alexander G. Poleschchuk

Institute of Automation and Electrometry SB of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, Doctor of Science, head of laboratory of diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsc.su

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, Doctor of Science, Senior Researcher, tel. (383)333-30-91, e-mail: vkorolkov@yandex.ru

Ruslan K. Nasyrov

Institute of Automation and Electrometry SB of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, Doctor of Science, Researcher, tel. (383)333-30-91, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Review of the methods for manufacture and application of diffractive optical elements for controlling the parameters of the laser radiation and the precise shape control of aspheric surfaces developed at IA&E SB RAS are presented and discussed.

Key words: computer generated hologram, diffractive optical element, aspherical wavefronts.

Введение. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) рассчитываются с помощью компьютера и изготавливаются с использованием оптических, механических или электронно-лучевых устройств записи. Такие элементы позволяют преобразовывать исходный волновой фронт в любой другой волновой фронты с практически любой заданной формой. Это одно из основных свойств ДОЭ, отмеченное еще в первых работах по цифровой голографии [1] и сразу нашедшее практическое применение в оптической метрологии для интерферометрического контроля формы асферических поверхностей [2].

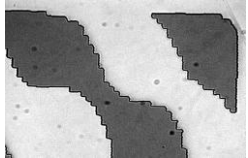
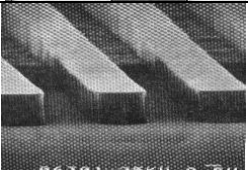
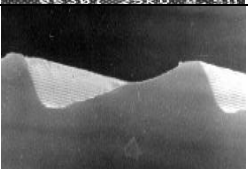
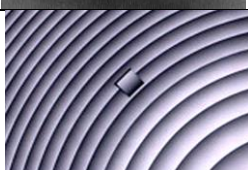
Основные типы ДОЭ приведены в табл. Промежуточное положение между обычными и дифракционными элементами занимают ДОЭ с глубоким рельефом. Такие элементы совмещают в себе достоинства классической оптики (ахроматичность) с гибкостью дифракционной. Имея малую толщину, ДОЭ не поглощают оптическое излучение и имеют высокую лучевую стойкость. Однако обычные ДОЭ не годятся для работы с широкополосным фемтосекундным излучением, так как угол дифракции зависит от длины волны. Для решения проблемы коррекции волнового фронта фемтосекундного излучения необходим оптический элемент, имеющий малую оптическую толщину и непрерывную двумерную функцию пропускания, независимую от длины волны. Кроме того, такой элемент должен формировать без потерь волновой фронт с заданным распределением, на заданном расстоянии, в заданном месте пространства, например, в нелинейном кристалле параметрического усилителя или на мишени. В некоторой степени этим требованиям удовлетворяют элементы, получившие в англоязычной литературе название *conformal optical elements* «конформные оптические элементы (КОЭ)» [3]. Этот термин, обозначает оптические элементы, функция пропускания которых выбирается исходя из заданных условий (например, aberrаций лазерного кристалла), а не из набора стандартных оптических поверхностей. Такие элементы с достаточно гладкой фазовой функцией пропускания уже применены для коррекции aberrаций лазерных усилителей 192 канальной системы NIF (Ливермор, США) [4].

Разработка методов изготовления высококачественных ДОЭ была начата в Институте автоматики и электрометрии СО РАН в середине 70-х годов. Усилия были направлены на создание прецизионных круговых лазерных систем записи (КЛЗС) дифракционных структур и разработку технологий изготовления микроструктур ДОЭ (см. табл.).

Одним из направлений нанометрического контроля, которое развивается в Институте автоматики и электрометрии СО РАН АН, является разработка, исследование и применение дифракционных «нулевых систем». Такая система, преобразует исходный (плоский или сферический) волновой фронт лазера в асферический волновой фронт, совпадающий с формой исследуемой асферической поверхности. Форма волнового фронта отраженного от исследуемой поверхности и второй раз прошедшей ДОЭ контролируется интерферометром типа Физо.

В настоящей работе представлен обзор оригинальных работ по разработке оборудования и технологий изготовления дифракционных оптических элементов с бинарным, многоуровневым и непрерывным профилем для преобразования формы волновых фронтов, контроля асферических поверхностей и обработки информации.

Таблица

№ п/п	Тип структуры	Вид структуры	Характерные размеры	Область применения
1	Бинарная амплитудная структура		Минимальный период: $T_1 = 0,4-0,6$ мкм.	Оптическое приборостроение: фотошаблоны, маски, сетки, шкалы, кодовые диски, амплитудные голограммы
2	Бинарный (фазовый) микрорельеф		Минимальный период: $T_1 = 0,4-0,6$ мкм. Высота рельефа: $h_b = 0,1 - 10$ мкм.	Научное приборостроение, микромеханика, информатика, квантовая электроника, интегральная оптика, лазерная оптика.
3	Непрерывный микрорельеф (киноформ)		Минимальный период: $T_1 = 1,5-2$ мкм. Высота рельефа: $h_k = 0,1 - 30$ мкм.	Оптическое приборостроение, медицина, системы и приборы, лазерная оптика.
4	Структура с полутонным пропусканием		Диапазон изменения пропускания: $t_{\max}/t_{\min} > 5-50$. Минимальный период: $T = 1,5-2$ мкм	Технология оптического приборостроения и микроэлектроники, голография, оптическая обработка информации.

ДОЭ для формирования пучков с равномерной интенсивностью. Для формирования заданного распределения интенсивности в дальней зоне был разработан гомогенизатор. Такой гомогенизатор использовался для преобразования излучения полупроводникового лазера, имеющего эллиптическую форму, в пучок с равномерной интенсивностью. Дифракционная структура была рассчитана по алгоритму Герберта-Саксона. Полученный пучок имел равномерную интенсивность, однако из-за большой расходимости исходного пучка вдоль вертикальной оси, возникли краевые эффекты вдоль верхней и нижней границы. Такие элементы обладают низкой чувствительностью к изменениям параметров исходного пучка.

Формирование асферических волновых фронтов. В настоящее время для формирования асферических волновых фронтов широко используются как рефракционные, так и дифракционные оптические элементы. Такие элементы преобразуют исходный плоский (или сферический) волновой фронт в асферический, т. е. по своей сути являются корректорами волнового фронта. Дифракционная структура ДОЭ может быть осевой или внеосевой. Каждая из этих оптических схем имеют свои достоинства и недостатки.

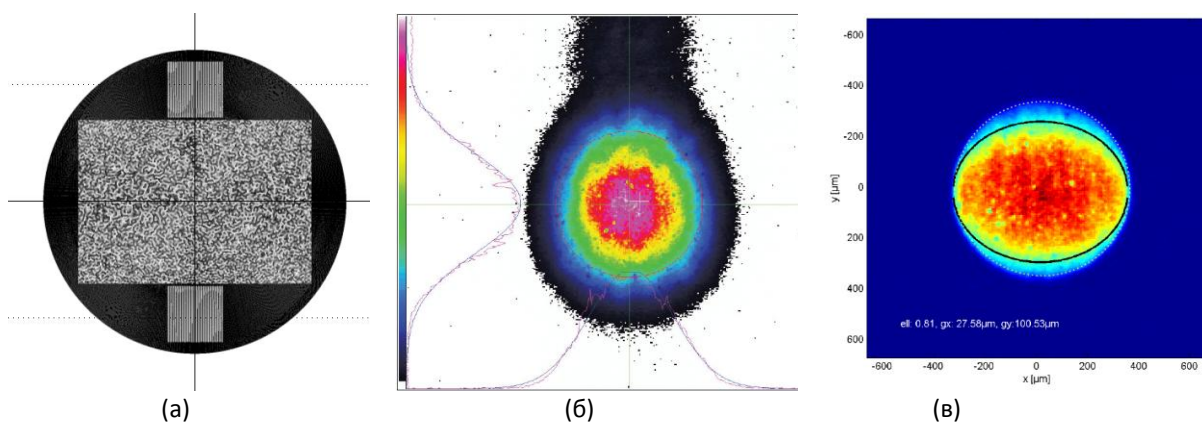


Рис. 1. Полутоновой шаблон для создания дифракционной структуры гомогенизатора (а). Исходное распределение интенсивности (б). Сформированное распределение интенсивности (в)

Методы контроля точности формирования асферического волнового фронта. Корректоры на основе ДОЭ идеально подходят для преобразований формы волновых фронтов и в настоящее время уже широко применяются для интерферометрического контроля асферических поверхностей. Однако обеспечение высокой точности требует точной юстировки оптической системы, применения очень хорошей оптической подложки, или вычитания ее погрешностей, использования безабберационного источника монохроматического излучения и т.д. Таким образом, формирование асферического фронта с помощью ДОЭ является сложной проблемой, так как форма волнового фронта зависит от многих факторов, которые необходимо контролировать. Для решения задачи формирования эталонных волновых фронтов мы предлагаем следующие методы контроля:

- контроль и сертификация структуры ДОЭ в процессе изготовления;
- прямой контроль формируемого асферического волнового фронта;
- интерферометрический контроль с помощью имитатора;
- интерферометрический контроль с помощью комбинированного ДОЭ.

Анализу погрешностей и сертификации структуры ДОЭ посвящено много работ [5, 6]. Особое внимание уделялось анализу погрешностей дифракционной структуры и методам их минимизации. Развитие методов прямой лазерной и электронно-лучевой записи позволило изготовить дифракционные структуры, обеспечивающие формирование волновых фронтов с погрешностью в единицы нанометров [7].

Прямой контроль сформированного асферического волнового фронта возможен (с рядом ограничений) с помощью датчика волнового фронта Шака-Хартмана или интерферометра сдвига. Однако эти приборы имеют ограниченную точность, позволяют проводить только относительные измерения и нуждаются в калибровке.

Наиболее исследованным методом контроля является применение дифракционного имитатора и интерферометра Физо в качестве регистрирующего при-

бора [8]. В соответствии с этим методом, сферический (или плоский) волновой фронт от интерферометра Физо проходит ДОО-корректор и преобразуется в асферический волновой фронт. Последовательно с ДОО-корректором устанавливается другой дифракционный элемент: ДОО-имитаторб работающий в режиме отражения. Если оба ДОО изготовлены без ошибок и оптическая схема настроена правильно (допустимая погрешность расположения ДОО как правило составляет единицы и доли микрон), интерферометр не будет регистрировать искажения волнового фронта и можно будет сделать вывод, что форма асферического фронта является правильной. Однако если обнаруживаются остаточные искажения, то это означает, что в каком-то из элементов имеется ошибка. Их анализ в некоторых случаях позволяет определить источник искажений. Тем не менее, основным недостатком этой схемы является то, что дифракционный имитатор юстируется в положение минимальных аберраций, из-за чего аберрации низкого порядка могут быть не определены.

Интерферометрический контроль с помощью комбинированного ДОО основан на одновременном формировании двух функционально заданных и независимых волновых фронтов: асферического и сферического [9]. Так как каждая элементарная область ДОО участвует в формировании обеих волновых фронтов, то, измерив форму сферического волнового фронта интерферометром, можно будет судить о погрешностях асферического волнового фронта, проконтролировать который непосредственно невозможно.

Таким образом, комбинированный ДОО одновременно выполняет роли эталона и корректора волнового фронта. При этом, даже при наличии небольших неоднородностей оптической подложки, последние исключаются из результатов измерений (они находятся в области общего хода лучей), что позволяет существенно увеличить точность измерений.

Разработанные методы формирования асферического волнового фронта применяются при разработке корректоров волнового фронта мощных лазерных систем и ДОО для контроля асферических зеркал.

Некоторые результаты. За последние несколько лет в ИАиЭ СО РАН были разработаны и изготовлены эталонные ДОО для контроля формы поверхности асферических зеркал ряда уникальных Российских и зарубежных телескопов.

В ОАО ЛЗОС (г. Лыткарино) с помощью наших ДОО изготовлены асферическое зеркало ($\varnothing 1.7$ м) для перспективного российского космического телескопа «Спектр-УФ» (Рис.2а), зеркало ($\varnothing 4.1$ м) для широкоугольного телескопа VISTA (Рис.2б), который уже работает в обсерватории ESO на горе Параналь в Чили и для ряда других проектов.

В рамках международных контрактов разработаны и изготовлены ДОО для контроля оптических систем телескопов SALT, E-ELT, Magellan, LBT, JWST.

Большой Южноафриканский телескоп SALT (Рис. 2в) с зеркалом $\varnothing 11$ м был формально сдан в эксплуатацию в 2005г., но из-за сложности в настройке оптической системы был полностью неработоспособен. Его настройка стала

возможной с помощью ДОО разработанной и изготовленной в ИАиЭ СО РАН. В настоящее время коллектив Южноафриканской обсерватории закончил настройку телескопа и уже получил изображения звезд прекрасного качества. Экстремально большой европейский телескоп E-ELT (рис. 2г) с диаметром зеркала $\varnothing 39$ м, сдача в эксплуатацию которого планируется к 2018 году, будет крупнейшим в мире. В ИАиЭ СО РАН разработана и рассчитана оптическая система на основе прецизионной амплитудно-фазовой ДОО для контроля прототипов сегментов телескопа. Погрешность формируемого ДОО асферического волнового фронта с учетом все ошибок изготовления составила 5.3 нм (СКО).



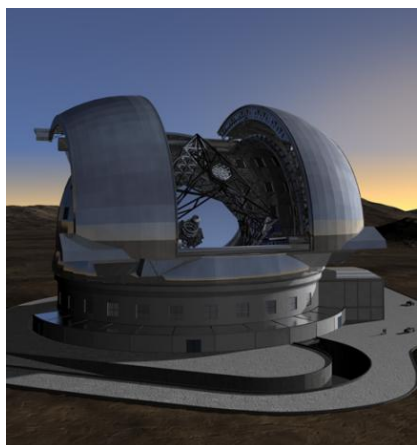
а



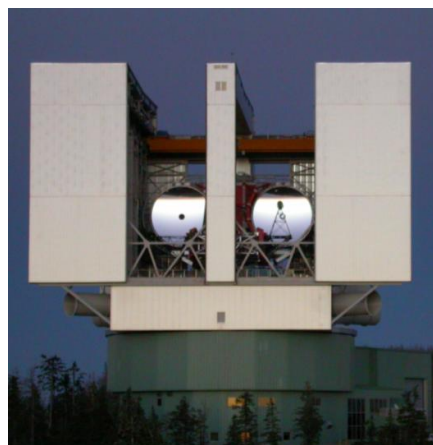
б



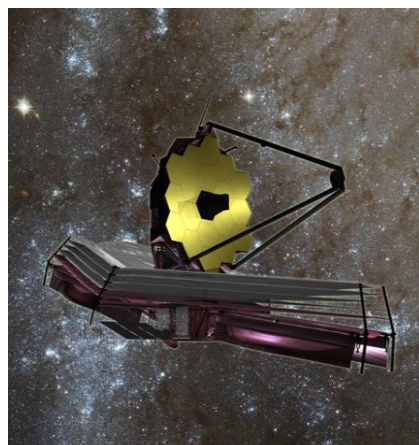
в



г



д



е

Рис. 2. Перспективные и уже работающие телескопы, асферические зеркала которых проконтролированы с помощью изготовленных в ИАиЭ СО РАН эталонных ДОО

ИАиЭ СО РАН разработал и изготовил для Университета Аризоны (США) эталонные ДОО для контроля асферических зеркал телескопов Магеллан (зеркало $\varnothing 6.4$ м), Большого бинокулярного телескопа (2 зеркала $\varnothing 8.4$ м) и новой космической обсерватории Джэймс Вебб (JWST) с диаметром зеркала 6.6 м (рис. 1 д, е).

Данная работ поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227 и междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.W. Lohmann, S.P. Paris. Binary Fraunhofer holograms generated by computer // *Appl. Opt.* - 1967.-V.6. -N10.-pp. 1739-1748.
2. Г. Н. Буйнов, Н. П. Ларионов, К. С. Мустафин. Голографический интерферометрический контроль асферических поверхностей // *Оптико-механическая промышленность*. – 1971. – № 4. – С. 6-11.
3. J. P. Turpin, A. T. Massoud, Z. H. Jiang, P. L. Werner, and D. H. Werner. Conformal mappings to achieve simple material parameters for transformation optics devices // *Opt. Express*.- 2009.- V.18.-P. 15120-15126.
4. C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach, M. W. Bowers, etc. National Ignition Facility laser performance status // *Appl. Opt.*-2007.- V.46 .- P.3276 – 3303.
5. Yu-Chun Chang and J.H. Burge. Error analysis for CGH optical testing // *Proc. SPIE*.-1999.- V.3782.- P. 358-366.
6. S. M. Arnold, L. Maxey J. Rogers, R. Yoder. Figure metrology of deep general aspherics using a conventional interferometer with CGH null // *Proc. SPIE*.- 1995.-V.2536.- P.106-116.
7. A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov etc. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Appl. Opt.*- 1999.- V.38.- P. 1295-1301.
8. J. Burge, et al. Null test optics for the MMT and Magellan 6.5-m $f/1.25$ primary mirrors // *Proc. SPIE*.- 1994.- V.2199.- P. 658-669.
9. A. Poleshchuk, R. Nasyrov. Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture // *Opt. Eng.*-2013.- V.52.- N9.-P. 091709.

© А. Г. Полещук, В. П. Корольков, Р. К. Насыров, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. Г. В. Флюдер, А. В. Бахолдин, А. О. Вознесенская. Разработка оптической системы градиентного эндоскопа.....	3
2. Г. Э. Романова, Г. Пысь. Исследование абберационных свойств и возможности пассивной атермализации оптических систем, работающих в области 8–12 мкм систем.....	10
3. А. Н. Галянтич, М. В. Киселев, А. А. Свищев, Д. С. Шелковой. Регистрирующее устройство для захвата и хранения тепловизионных данных модульного типа.....	18
4. Е. В. Грицкевич, А. Г. Беляева. Виртуальные испытания оптико-электронных систем ночного видения.....	23
5. И. С. Глебус, С. Н. Макаров. Волоконно-оптический виброметр на основе интерферометра Майкельсона.....	28
6. Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков. Двухканальный интерферометр белого света для получения дифференциальных интерферограмм.....	34
7. Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков. Определение эффективной длины волны источника света в интерференционном профилометре.....	39
8. В. И. Патерикин. Оптические методы зондирования для наголовных средств измерения пространственных параметров поверхности трехмерных предметов в реальном времени.....	44
9. И. Г. Пальчикова, А. А. Конев, Е. С. Смирнов. Сегментация в компьютерной цитофотометрии.....	49
10. Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, Хоан Хун Хай, Ю. В. Чугуй, И. А. Выхристюк, Лян-Чиа Чень, Куан-Чао Фань. Высокоточные поперечные линейные измерения в оптическом интерференционном микроскопе.....	56
11. А. Г. Верховгляд, М. А. Завьялова, Л. Б. Касторский, А. Е. Качкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков, О. Ю. Моисеев, А. Г. Полещук, Р. В. Шиманский. Круговая лазерная записывающая система для изготовления ДОЭ на сферических поверхностях.....	62
12. П. С. Завьялов, Л. В. Финогенов, Е. В. Власов. Разработка специализированных объективов для оптико-электронного контроля 3D-объектов.....	69
13. Е. В. Власов. О способах построения многоплановых изображений в 3D-дисплеях.....	76
14. В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский. Использование насадной жидкой линзы для изменения переднего отрезка объектива видеокамеры робототехнических устройств.....	80
15. Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева. Оптимальное согласование параметров оптико-электронного тракта измерительной системы по критерию минимизации распределенной погрешности.....	84
16. Г. Г. Горбунов, К. Н. Чиков, В. Б. Шлишевский. Дистанционная гипер- и ультраспектральная аппаратура.....	89
17. М. П. Егоренко. Двухспектральная оптическая система для нанодронов.....	95
18. Г. Г. Горбунов, В. Б. Шлишевский. Проект создания гиперспектрального фурье-видеоспектрометра для задач дистанционного зондирования.....	98
19. Е. В. Грицкевич, Л. А. Евдокимова, А. А. Немогучев, М. В. Адольф. Разработка программно-технического комплекса для исследований систем технического зрения.....	102

20. М. М. Векиин, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко, А. Д. Кузьменко. Микро- волноводный оптический интерферометр Юнга для сенсорных систем	107
21. В. А. Чербаев, Т. Н. Хацевич. Специализированный проекционный объектив	111
22. Д. Н. Шевченко, О. В. Багдасарова, А. А. Багдасаров. Панорамные сис- темы кругового обзора	117
23. А. А. Топорков, И. С. Бутримов. Совершенствование прицельных сеток перспективных оптических и ночных прицелов.....	121
24. Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов. Устройство для измерения индикатрисы рассеяния света структурированными поверхностями	128
25. Н. Ф. Чайка, Р. С. Дроздецкий. Разработка спектрофотометра для опре- деления колориметрических характеристик поверхностей.....	132
26. Н. Ю. Никаноров, В. В. Коваленко, И. В. Парко, Н. Ю. Филлипенко, А. А. Денисенко. Применение полноапертурного аподизационного светофильтра для фотографирования астрономических объектов	136
27. Л. В. Парко, М. С. Комбаров, И. В. Парко. Серийные телескопы	142
28. В. П. Лазаренко, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев. Алгоритм создания панорам с помощью всенаправленных оптико-электронных систем.....	148
29. Б. А. Князев, В. С. Павельев, В. Г. Сербо, Ю. Ю. Чопорова, Б. О. Волод- кин. Закрученные пучки: от рентгена до радиодиапазона	158
30. О. К. Ушаков, П. В. Петров. Тренажёр для стрельбы прямой наводкой по движущимся целям	168
31. И. О. Михайлов, В. Б. Шлишевский. Устройство и метод юстировки жид- колинзовых систем.....	171
32. В. И. Минин. Обеспечение безопасности обмена данными на откры- тых ресурсах	174
33. Н. Ф. Кашапов, С. Н. Шарифуллин. Многофункциональные покрытия оптических систем с повышенными оптико-механическими характеристиками.....	177
34. В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова. Об оптимизации технологического про- цесса формообразования оптических поверхностей для субмиллиметрового диа- пазона спектра	183
35. С. Г. Губин. Геометрические размеры зерна пороха и его влияние на увеличение начальной скорости.....	188
36. К. Д. Волкова, Е. В. Дружкин, Т. Н. Хацевич. Особенности оптического проектирования приборов с дискретной сменой увеличения с учетом технологи- ческих возможностей отечественных производителей.....	191
37. Л. Б. Воробьёва, А. Д. Зонова, С. А. Степанова. Состав и размеры стек- лофазы в микроструктуре корундовой керамики	202
38. И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, Д. П. Симонов. Оценка шеро- ховатости поверхности изделий для формирования фотонных тераструктур на основе изменения яркости цифрового изображения.....	206
39. И. Г. Пальчикова, А. Ф. Алейников, Ю. В. Чугуй, Е. С. Смирнов, К. Н. Ници- евская, А. Н. Швыдков. Оптический метод контроля качества мяса птицы	211
40. Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, О. В. Минин, И. В. Минин, А. Д. Зонова. Возможность определения изменений физических и механических свойств по- верхности металла оптическими методами.....	219
41. В. С. Ефремов, Р. А. Корякин, А. В. Логачёв, Д. Г. Макарова, В. М. Тымкул. Об отражательной способности шероховатой поверхности в субмиллиметровом диапазоне спектра	227
42. А. Г. Полещук, В. П. Корольков, Р. К. Насыров. Дифракционные оптиче- ские элементы для управления параметрами лазерного излучения и прецизионно- го контроля формы асферических поверхностей	232

CONTENTS

1. G. V. Fluder, A. V. Bakholdin, A. O. Voznesenskaya. Design of the endoscopic optical system with the use of gradient index lenses	3
2. G. E. Romanova, G. Pyś. Research of aberration properties and passive athermalization of Iwir optical systems working within spectral range 8–12μm	10
3. A. N. Galyantich, M. V. Kiselev, A. A. Svishev, D. S. Shelkovoy Recording device to capture and store thermal data module type	18
4. E. V. Gritskevich, A. G. Belyaeva. Virtual testing of optical-electronic night vision systems	23
5. I. S. Glebus, S. N. Makarov. Fibre optical vibrometer based on the michelson interferometer	28
6. E. V. Sysoev, I. A. Vykhristyuk, R. V. Kulikov, V. V. Shirokov. Two-channel white light differential interferometer	34
7. E. V. Sysoev, I. A. Vykhristyuk, R. V. Kulikov, V. V. Shirokov. Determination of the light source effective wavelength in the interference profilometer	39
8. V. I. Paterikin. Optical sounding methods for head measuring means of 3D objects surface spatial parameters in real time	44
9. I. G. Palchikova, A. A. Konev, E. S. Smirnov. Image segmentation in the computer cytophotometry	49
10. E. V. Sysoev, R. V. Kulikov, Hoang Hong Hai, Yu. V. Chugui, I. A. Vykhristyuk, Liang-Chia Chen, Kuang-Chao Fan. Highprecision lateral linear measuremetns in the optical intereference microscope	56
11. A. G. Verhoglyad, M. A. Zavyalova, L. B. Kastorsky, A. E. Kachkin, S. A. Kokarev, V. P. Korolkov, O. Yu. Moiseev, A. G. Poleshchuk, R. V. Shimansky. Application of circular laser writing system for fabrication of DOEs on spherical surfaces	62
12. P. S. Zavyalov, L. V. Finogenov, E. V. Vlasov. Development of the specialized lenses for optoelectronic inspection of 3D-objects	69
13. E. V. Vlasov. On the ways of multiplane images construction in 3D-displays	76
14. V. S. Efremov, D. G. Makarova, V. B. Shlishevsky. Usage of a mounted liquid lens for variation of a front segment of the objective of videocamera the robot technical of arrangements	80
15. E. V. Grickevich, P. A. Zviagintcheva. Optimum matching of the parameters of the optoelectronic channel measurement system according to the criterion of minimizing the distributed error	84
16. G. G. Gorbunov, K. N. Tchikov, V. B. Shlishevsky. Remote hyperspectral and ultraspectral apparatus	89
17. M. P. Egorenko. Two spectral optical system for nanodrons	95
18. G. G. Gorbunov, V. B. Shlishevsky. The project of creation of hyperspectral imaging fourier transform spectrometer for remote sensing	98
19. E. V. Gritskevich, L. A. Evdokimova, A. A. Nemoguchev, M. V. Adolf. Development of the software-tehnical complexes for sistems ofreseach technical vision	102
20. M. M. Vekshin, V. A. Nikitin, N. A. Yakovenko, A. D. Kuzmenko. Integrated-optic Young interferometer for sensor systems	107
21. V. A. Cherbaev, T. N. Khatsevich. Dedicated projection lens	111
22. D. N. Shevchenko, O. V. Bagdasarova, A. A. Bagdasarov. Panoramic 360-degree imaging apparatus	117

23. <i>A. A. Toporkov, I. S. Butrimov.</i> Improving aimed grids of advanced optical and night sights	121
24. <i>D. A. Belousov, A. G. Poleshchuk, V. N. Khomutov.</i> The measurement device of the light scattering indicatrix by structured surfaces	128
25. <i>N. F. Chayka, R. S. Drozdetski.</i> Development of spectrophotometer for measuring colorimetric characteristic of surfaces	132
26. <i>N. Yu. Nikanorov, V. V. Kovalenko, I. V. Parko, N. Yu. Philipenko, A. A. Denisenko.</i> Aplication full-aperture apodizing filter for foto spase object.....	136
27. <i>L. V. Parko, M. S. Kombarov, I.V. Parko.</i> Serial telescopes	142
28. <i>V. P. Lazarenko, V. V. Korotaev, S. N. Yaryshev.</i> Algorithm of the creation of panoramas with the aid of the omnidirectional optical-electronic systems	148
29. <i>B. A. Knyazev, V. S. Pavelyev, V. G. Serbo, Yu. Yu. Choporova, B. O. Volodkin.</i> Vortex beams: from x-rays to radiowaves.....	158
30. <i>O. K. Ushakov, P. V. Petrov.</i> Trainer for firing direct aiming on moving-targets	168
31. <i>I. O. Mikhailov, V.B. Shlishevsky.</i> The device and the method of liquid lens systems alignment.....	171
32. <i>V. I. Minin.</i> Safety data on public resources.....	174
33. <i>N. F. Kashapov, S. N. Sharifullin.</i> Multifunctional coating optical system with enhanced optical and mechanical characteristics.....	177
34. <i>V. S. Efremov, D. G. Makarova.</i> About optimization of technological process forming of optical surfaces for the submillimetric range of the spectrum.....	183
35. <i>S. G. Gubin.</i> The geometrical sizes of grain of gunpowder and its influence on increase in initial speed.....	188
36. <i>K. D. Volkova, E. V. Druzhkin, T. N. Khatsevich.</i> Specialty optical design of discrete devises according to technological possibilities of domestic producers	191
37. <i>L. B. Vorobyeva, A. D. Zonova, S. A. Stepanova.</i> The composition and dimensions of the glass phase in the microstructure of alumina ceramics	202
38. <i>I. V. Minin, O. V. Minin, G. V. Shuvalov, D. P. Simonov.</i> Evaluation of surface roughness products for the formation of the photonic terajets based on the changes in the brightness of digital image.....	206
39. <i>I. G. Palchikova, Al. F. Aleynikov, Yu. V. Chugui, E. S. Smirnov, K. N. Nitsievskaya, A. N. Shvidkov.</i> Optical method for the quality inspection of the raw poultry meat	211
40. <i>T. V. Larina, E. Yu. Kutenkova, O. V. Minin, I. V. Minin, A. D. Zonova.</i> The possibility of determining changes in the physical and mechanical properties of the metal surface optical methods.....	219
41. <i>V. S. Efremov, R. A. Koryakin, A. V. Logachev, D. G. Makarova, V. M. Timkul.</i> About reflective ability of the rough surface in the submillimetric range of the spectrum.....	227
42. <i>A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov, R. K. Nasyrov.</i> Diffractive optical elements for controlling the parameters of laser radiation and the precise testing the aspheric surfaces.....	232

Научное издание

XI Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2015

Международная научная конференция

СибОптика-2015

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Л. Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 28.04.2015. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,12. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 8.