

На правах рукописи

Семенцов Андрей Владимирович



Усовершенствование методики калибровки неметрических цифровых съемочных камер с использованием дополнительных геометрических условий

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук
Никитин Вячеслав Николаевич.

Официальные оппоненты:

Чибуничев Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», заведующий кафедрой фотограмметрии;

Аникеева Ирина Александровна, кандидат технических наук, акционерное общество «Роскартография», старший научный сотрудник Центра научно-технологического развития.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина» (г. Омск).

Защита состоится 11 февраля 2020 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/sementsov-andrey-vladimirovich/

Автореферат разослан 20 декабря 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 25.11.2019. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 162.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для крупномасштабной аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной фотограмметрической съемки широкое применение находят неметрические цифровые съемочные камеры (НЦСК). Такие камеры характеризуются малой стоимостью и массой, компактностью, оперативностью построения изображения и контроля его качества, однако снимки, получаемые цифровыми съемочными камерами, особенно подвержены влиянию систематических погрешностей, возникающих из-за искажения связки проектирующих лучей, и поэтому изначально не предназначены для решения измерительных задач. Для учета таких искажений выполняется калибровка камер.

Калибровка съемочной камеры предполагает определение параметров дисторсии объектива и элементов внутреннего ориентирования.

Метод полевой калибровки по снимкам горного испытательного полигона является наиболее надежным и точным. Однако создание и поддержка в рабочем состоянии такого полигона сопряжены с огромными трудовыми и финансовыми затратами, а часто – и с отсутствием необходимого ландшафта в пределах комфортной досягаемости. Существующая методика не позволяет выполнить полную калибровку НЦСК по снимкам равнинного полигона. Использование малых калибровочных тест-объектов, размещаемых внутри помещений, не в полной мере соответствует условиям производственной съемки, поэтому не все факторы, влияющие на искажения снимков, могут быть учтены.

Таким образом, упрощение процесса проведения калибровки НЦСК, сокращение объемов работ и снижение затрат на ее выполнение на данном этапе развития фотограмметрии является актуальной научной задачей, решение которой может быть найдено при помощи дополнительно вводимых геометрических условий.

Степень разработанности темы. Изучением решения задачи калибровки съемочных камер занимались отечественные ученые: Амромин П. Д., Антипов И. Т., Гук А. П., Дубиновский В. Б., Журкин И. Г., Лобанов А. Н.,

Малявский Б. К., Михайлов А. П., Погорелов В. В., Тюфлин Ю. С., Чибуничев А. Г. и др. Большой вклад в развитие теории и практики процесса калибровки внесли зарубежные ученые: Brown D., Grun A., Jacobsen K., Ackermann F., Norton C. и др.

В настоящее время предложено множество способов полной и частичной калибровки съемочных систем. Особое внимание уделено полевым методам калибровки, так как определение главных параметров непосредственно в полете выполняется при температурных, барометрических, вибрационных и прочих условиях, соответствующих съемке на реальном объекте работ. Если положение центра проектирования неизвестно, полная калибровка возможна только по снимкам горного испытательного полигона. По снимкам полигона, расположенного в равнинной местности, осуществима лишь частичная калибровка – определение параметров дисторсии при известных элементах внутреннего ориентирования. В ряде работ профессором Дубиновским В. Б. высказана идея калибровки путем совместного ориентирования нескольких снимков с большими взаимными углами наклона. Однако корректное математическое обоснование этой идеи отсутствует.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является усовершенствование методики калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий для снятия ограничений на пространственные характеристики лабораторного тест-объекта или испытательного полигона.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные научно-технические задачи:

- выполнить анализ современных методик калибровки тест-объектов и испытательных полигонов, применяемых для калибровки НЦСК;
- теоретически обосновать возможность калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта;
- усовершенствовать существующую методику калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий;
- разработать тест-объект для реализации усовершенствованной методики калибровки НЦСК;

– произвести апробацию усовершенствованной методики калибровки НЦСК на основе макетных и реальных снимков.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является процесс калибровки НЦСК.

Предметом исследования является методика калибровки НЦСК с использованием дополнительных геометрических условий.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– усовершенствована существующая методика калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий, отличающаяся от существующей возможностью использования плоских лабораторных тест-объектов и испытательных полигонов, расположенных в равнинной местности;

– разработана математическая модель штативной головки, позволяющая исключить влияние смещения центра фотографирования на точность определения параметров калибровки по снимкам плоского тест-объекта, полученным из одной точки пространства.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследований состоит в том, что теоретически обоснована возможность и определены условия съемки для калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта; усовершенствована методика и разработан алгоритм калибровки НЦСК, основанные на использовании дополнительных геометрических условий, что позволяет снять ограничение на перепад высот точек тест-объекта; разработана математическая модель штатива, обеспечивающая калибровку НЦСК по серии снимков плоского тест-объекта, полученных из одной точки пространства.

Практическая значимость работы заключается в том, что применение усовершенствованной методики калибровки НЦСК позволяет сократить затраты и объем работ на создание испытательного полигона за счет снятия ограничений на перепад высот точек тест-объекта, а также использовать имеющиеся геодезические полигоны. Разработанный алгоритм калибровки НЦСК реализован в программном комплексе на языке Object Pascal.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы теория линейной и матричной алгебры, теория фотограмметрической обработки снимков, теория вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования и статистической обработки результатов измерений. Эмпирической базой исследований служили макетные и реальные снимки.

При проведении экспериментальных работ применялось программное обеспечение: система компьютерной алгебры Mathcad, вычислительная среда программирования Equilibrium, программный продукт MonoSDS, средства Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту:

– усовершенствованная методика калибровки НЦСК с использованием дополнительных геометрических условий;

– математическая модель штативной головки, описывающая смещение центра фотографирования при получении нескольких снимков плоского тест-объекта с разными углами наклона из одной точки пространства.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует областям исследования: 1 – Теория получения изображений; 2 – Разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждена корректной математической обработкой макетных и реальных снимков.

Результаты выполненных исследований и основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2012–2015 гг., Новосибирск).

Разработанная методика калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта внедрена в производственный процесс в ООО «Беспилотные технологии» и в ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех», где применяется для калибровки неметрических камер фотограмметрического стереофотодальномера.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в 10 научных работах, три из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 72 наименования, содержит 7 таблиц, 54 рисунка и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов исследования.

В первом разделе представлены общие сведения о современных съемочных системах и областях их применения, отмечена тенденция использования неметрических камер для решения измерительных задач. Показано, что калибровка съемочной системы позволяет минимизировать систематические погрешности в координатах точек снимков и повысить точность выполняемых фотограмметрических работ.

Проведен обзор и анализ современных отечественных и зарубежных методик калибровки НЦСК, на основании которого выявлен основной недостаток полевой калибровки, связанный со сложностью создания пространственных тест-объектов (испытательных полигонов). Кроме того, часть методик калибровки по снимкам плоских тест-объектов не имеет научного обоснования.

Рассмотрены примеры применения различных дополнительных геометрических условий для решения задач геодезии и фотограмметрии, а также непосредственно для калибровки. Отмечено, что учет дополнительных геометрических условий, с одной стороны, позволяет повысить качество калибровки камер, с другой стороны, усложняет алгоритмы уравнивания, что является одной из главных причин их относительно редкого использования в современных программных комплексах.

Таким образом, научное обоснование принципиальной возможности калибровки НЦСК по плоскому тест-объекту, выявление условий, при соблюдении которых такая калибровка может быть практически выполнена, является актуальной научно-технической задачей.

Во втором разделе рассмотрены особенности учета систематических искажений по полю снимка, приведены примеры наиболее распространенных полиномиальных функций для описания этих искажений, предложено теоретическое обоснование возможности калибровки НЦСК по плоскому тест-объекту, представлены разработанные варианты методики калибровки с использованием дополнительных геометрических условий, рассмотрены способы устранения систематических ошибок, возникающих в результатах калибровки при нестрогом соблюдении условия получения нескольких снимков с разными углами наклона из одной точки пространства.

При определенных условиях задача определения элементов внутреннего ориентирования съёмочной системы значительно усложняется из-за корреляции части искомых параметров. Исходя из этого, при разработке усовершенствованной методики калибровки с использованием дополнительных геометрических условий акцент был сделан на возможность достоверного определения элементов внутреннего ориентирования съёмочной камеры.

Способ полевой калибровки по снимкам испытательного полигона является одним из самых надежных, однако не позволяет выполнить полную калибровку при превышении точек полигона менее 20 % от высоты фотографирования. Это связано с тем, что между коэффициентами при поправках к фокусному

расстоянию (f) и высоте фотографирования возникает пропорциональная зависимость (эффект преобразования связки лучей). Аналогичная зависимость имеет место между координатами главной точки снимка (x_0, y_0) и плановыми координатами центра фотографирования (X_S, Y_S).

С целью усовершенствования методики калибровки НЦСК решена задача снижения ограничений на обеспечение перепада высот точек испытательного полигона, что позволит выполнять калибровку по временным полигонам, размещенным вблизи съемочных участков с различным рельефом местности.

Для теоретического обоснования возможности калибровки по снимкам плоской местности выполнен анализ условия коллинеарности проектирующих лучей, представленного в упрощенном виде, в котором плановые координаты центра фотографирования равны нулю, объект съемки плоский с высотами точек (Z), равными нулю, из угловых элементов внешнего ориентирования только продольный угол наклона снимка не равен нулю.

Тогда для подобной связки лучей условие коллинеарности примет вид

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (-f) \frac{X \cos \alpha - Z_S \sin \alpha}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha}; \\ y - y_0 &= (-f) \frac{Y}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

а для преобразованной связки лучей –

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 - \delta x_0 &= k(-f) \frac{X \cos \alpha' - \delta X_S \cos \alpha' - Z'_S \sin \alpha'}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'}; \\ y - y_0 - \delta y_0 &= k(-f) \frac{Y - \delta Y_S}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где x, y – координаты точек снимка;

X, Y – плановые координаты точек местности;

Z_S и Z'_S – высота центра фотографирования снимка с подобной и преобразованной связками лучей соответственно;

α и α' – продольный угол наклона снимка с подобной и преобразованной связками лучей соответственно;

$\delta x_0, \delta y_0$ – изменения координат главной точки снимка (децентрация);

$\delta X_S, \delta Y_S$ – изменения плановых координат центра фотографирования;

k – коэффициент преобразования связки лучей.

Приравнивая координаты точек снимка подобной (формула (1)) и преобразованной (формула (2)) связок лучей, после выполнения ряда преобразований мы получили систему уравнений, которые являются степенными полиномами относительно координат точек местности. Для дальнейшего анализа уравнения разложены по методу неопределенных коэффициентов согласно степени членов в многочлене:

$$\left. \begin{aligned}
 X^2: & -X^2 \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' = -kX^2 \sin \alpha \cos \alpha'; \\
 X: & X \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' - X Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' + X Z_S \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & - \frac{\delta x_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
 & = kX \delta X_S \sin \alpha \cos \alpha' + kX Z'_S \sin \alpha \sin \alpha' - kX Z_S \cos \alpha \cos \alpha'; \\
 C: & -Z_S \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + Z_S Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' - \frac{\delta x_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \\
 & + \frac{\delta x_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = kZ_S \delta X_S \cos \alpha \cos \alpha' + kZ_S Z'_S \cos \alpha \sin \alpha'; \\
 X^2: & \frac{\delta y_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' = 0; \\
 XY: & -XY \sin \alpha' = -kXY \sin \alpha; \\
 X: & -\frac{\delta y_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
 & = kX \delta Y_S \sin \alpha; \\
 Y: & Y \delta X_S \sin \alpha' - Y Z'_S \cos \alpha' = -kZ_S Y \cos \alpha; \\
 C: & -\frac{\delta y_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = kZ_S \delta Y_S \cos \alpha.
 \end{aligned} \right\} (3)$$

После упрощения системы уравнений (3) получено:

$$\left. \begin{aligned}
 X^2: \quad \frac{\delta x_0}{f} &= \frac{\cos \alpha - \cos \alpha'}{\sin \alpha}; \\
 X: \quad Z'_S &= k Z_S; \\
 C: \quad 0 &= 0; \\
 X^2: \quad k \frac{\delta y_0}{f} \sin^2 \alpha &= 0 \Rightarrow \delta y_0 = 0 \quad \text{или} \quad \alpha = 0; \\
 XY: \quad \sin \alpha' &= k \sin \alpha; \\
 X: \quad 0 &= k \delta Y_S \sin \alpha \Rightarrow \delta Y_S = 0 \quad \text{или} \quad \alpha = 0; \\
 Y: \quad \delta X_S &= -\delta x_0 \frac{Z_S}{f}; \\
 C: \quad \frac{\delta y_0}{f} Z'_S \cos \alpha' &= k \delta Y_S \Rightarrow \delta Y_S = \delta y_0 \frac{Z'_S}{k f} = \delta y_0 \frac{Z_S}{f} \quad \text{при} \quad \alpha = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Анализ системы уравнений (4), описывающей преобразование связки лучей, восстановленной по наклонному снимку плоской местности, позволил сделать следующие выводы:

- в результате преобразования связки будет получен наклонный снимок с иным углом наклона, высота центра фотографирования изменится прямо пропорционально коэффициенту преобразования связки лучей;
- в плоскости угла наклона снимка произойдет смещение главной точки и центра фотографирования;
- в направлении, перпендикулярном к плоскости наклона снимка, смещения главной точки и центра фотографирования будут отсутствовать.

Таким образом, для наклонного снимка плоской местности при изменении коэффициента преобразования связки лучей центры фотографирования будут лежать на кривой в плоскости угла наклона снимка, т. е. произойдет переход от неопределенности в трехмерном пространстве (в случае горизонтального снимка) к неопределенности в одномерном. С использованием зависимостей (4) определен вид этой кривой, который соответствует уравнению окружности радиусом $Z_S / \sin \alpha$, и установлено, что значение коэффициента преобразования связки лучей k изменяется в пределах от 0 до $1/\sin \alpha$. Угол наклона снимка

с центром фотографирования в верхней части кривой равен 90° , в нижней – 0° . Выводы об особенностях преобразованной связки лучей наклонного снимка были положены в основу усовершенствования методики калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта.

Из анализа зависимостей (4) сформулированы следующие свойства преобразованной связки лучей наклонного снимка плоской местности:

– фокусное расстояние f' и высота центра фотографирования Z'_S являются функциями от коэффициента преобразования k ;

– угол наклона снимка α' , изменения абсциссы главной точки снимка $\delta x'_0$ по оси x и абсциссы центра фотографирования $\delta X'_S$ являются функциями от коэффициента преобразования k и угла наклона снимка α ;

– в направлении, перпендикулярном к плоскости наклона снимка, изменения ординаты главной точки снимка $\delta y'_0$ и ординаты центра фотографирования $\delta Y'_S$ равны нулю.

На основе выводов из анализа зависимостей (4) предложены три методики калибровки НЦСК, позволяющие исключить неоднозначность решения задачи по снимкам плоской поверхности, вызванную влиянием преобразования связки лучей, путем использования дополнительных геометрических условий.

Методика 1 калибровки НЦСК предполагает использование одного наклонного снимка и независимое определение одного из параметров $f_{\text{ист}}$, $Z_{S_{\text{ист}}}$, $x_{0_{\text{ист}}}$, $X_{S_{\text{ист}}}$ или $\alpha_{\text{ист}}$, функционально связанных с параметрами преобразованной связки лучей через коэффициент преобразования k , например, с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) или инерциальной навигационной системы, что позволит найти решение в ходе уравнивания при калибровке по плоскому тест-объекту.

Методика 2 калибровки НЦСК предусматривает использование двух снимков с разными ненулевыми углами наклона ($\alpha_1 \neq \alpha_2$), лежащими в одной плоскости, полученных при выполнении одного из следующих условий съемки:

– в методике 2.1 абсциссы центров фотографирования равны: $X_{S_1} = X_{S_2}$, тогда

$$\varphi_{\delta X_s}(k, \alpha_1) = \varphi_{\delta X_s}(k, \alpha_2). \quad (5)$$

Условие (5) обеспечивается, когда коэффициент преобразования связи лучей равен единице. Методика позволяет одновременно определять параметры калибровки разных НЦСК и оптимальна для калибровки по снимкам наземной съемки и многообъективных камер, например, панорамных или сферических;

– в методике 2.2 координаты главных точек двух снимков равны, тогда:

$$\varphi_{\delta x_0}(k, \alpha_1) = \varphi_{\delta x_0}(k, \alpha_2). \quad (6)$$

Условие (6) выполняется при калибровке по снимкам, полученным одной камерой, когда $k = 1$. Данный вариант можно использовать для калибровки НЦСК по снимкам наземной съемки и аэрофотоснимкам.

Методика 3 калибровки НЦСК предполагает получение двух снимков с ненулевыми углами наклона, лежащими в разных плоскостях (предпочтительнее во взаимно-перпендикулярных). В этом случае в одной плоскости отсутствует децентрация снимка по оси x , а в другой плоскости – децентрация по оси y . При совместной обработке двух снимков параметры калибровки будут найдены при $k = 1$. Эта методика может использоваться при калибровке НЦСК по снимкам наземной съемки или для калибровки аэрофотосъемочных систем, оснащенных камерой с управляемым подвесом.

Таким образом, на основании выполненных теоретических исследований показана возможность калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта при использовании любой из трех разработанных методик.

Методика 2.1 предполагает в качестве обязательного условия съемку тест-объекта из одной точки пространства. Это же условие может быть использовано в качестве дополнительного в методиках 2.2 и 3, что приведет к уменьшению количества определяемых параметров и повышению точности определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии.

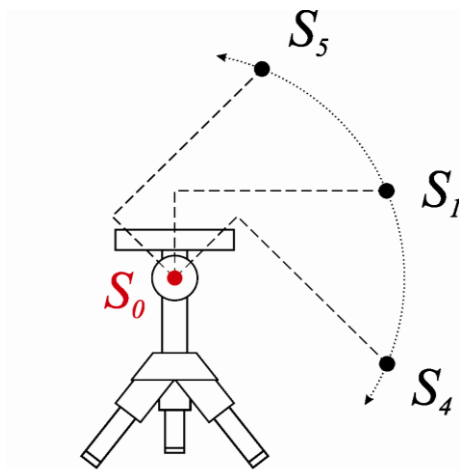


Рисунок 1 – Смещение центра фотографирования относительно центра вращения камеры на штативе

При калибровке НЦСК по снимкам наземной съемки фотографирование «с рук» не позволяет обеспечить неподвижность центра фотографирования. Использование штатива в качестве средства фиксации камеры не исключает смещения объектива (рисунок 1).

В работе предложено три варианта исключения систематических ошибок в параметрах калибровки, вносимых смещением объектива, а именно:

- использовать «эффект масштаба», так как влияние, оказываемое смещением центра фотографирования, линейно уменьшается при увеличении расстояния между тест-объектом и центром вращения штативной головки, на которую крепится камера. Однако в этом случае требуется пропорционально увеличить размер тест-объекта;

- использовать штатив с панорамной сферической головкой. Главным отличием таких головок является наличие трех направляющих, благодаря которым возможно установить камеру так, чтобы ее вращение совершалось вокруг передней узловой точки объектива. Недостатком использования штативов с панорамной сферической головкой является их сравнительно высокая стоимость (в 10–15 раз выше стоимости обычных штативов) и сложность центрирования съемочных камер;

- при обработке снимков использовать математическое описание смещения объектива, так как поверхность, по которой перемещается объектив, является сферой.

В общем виде математическая модель штатива может быть представлена следующей формулой:

$$S_i = S_0 + A_i l, \quad (7)$$

где S_i – координаты i -го центра фотографирования;

S_0 – координаты центра вращения штативной головки;

A_i – матрица перехода от пространственной системы координат точек снимка к внешней системе координат тест-объекта;

l – вектор смещений точки фотографирования относительно центра вращения штативной головки в пространственной системе координат точек снимка.

Для калибровки цифровых камер с использованием штатива разработаны следующие требования:

– использование математической модели штатива (7) в качестве дополнительного геометрического условия;

– наличие не менее четырех снимков для определения параметров сферы, по которой перемещается центр фотографирования.

С целью практической реализации методик калибровки НЦСК разработан тест-объект, состоящий из шаблонов стандартного формата А3 или А4 (рисунок 2).

Используемая на шаблонах форма марок обеспечивает измерение координат точек как в ручном, так и автоматическом режиме. Все листы, ряды и строки пронумерованы для достоверной идентификации марок на снимках. Радиальные миры и набор штриховых мир позволяют одновременно с калибровкой определять разрешение съемочной системы и его изменение по полю снимка.

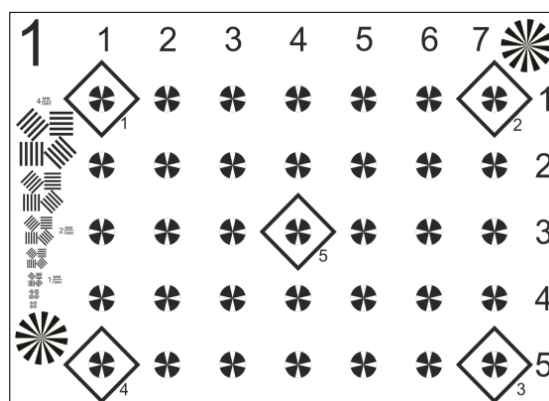


Рисунок 2 – Шаблон тест-объекта

В третьем разделе приведены результаты экспериментальной проверки предложенных методик калибровки НЦСК и математической модели учета смещения центра фотографирования в случае использования штативной головки при съемке тест-объекта.

Для проверки работоспособности методик калибровки по снимкам плоского тест-объекта выполнены эксперименты с использованием макетных снимков. Для этого в вычислительной среде программирования Equilibrium моделировались ситуации калибровки камеры Sony Alpha NEX-5 (объектив E 16mm F2.8) с разными параметрами съемки. Цифровой тест-объект представлял собой плоскую поверхность размером 2×2 км, на которую нанесены опорные точки с шагом 50 м. Координаты главной точки x_0, y_0 приняты равными 10 пикселям. Центры фотографирования S заданы в соответствии с таблицей 1, высота фотографирования Z_S принята 300 м. Для каждого варианта калибровки с использованием генератора случайных чисел сформировано 30 различных макетов. В рассчитанные координаты точек макетных снимков внесены случайные ошибки, имитирующие погрешности измерений со средней квадратической ошибкой (СКО) 0,5 пикселя. Для оценки результатов в качестве эталонного варианта принята калибровка по горизонтальному снимку с известными координатами центра фотографирования, полученными с помощью ГНСС. СКО определения плановых координат центров фотографирования задана 0,1 м, высот – 0,3 м.

Таблица 1 – Параметры макетных снимков

Номер варианта	Методика калибровки	Описание макетных снимков
0-1	эталонная методика	1 снимок, $\alpha = 0^\circ$, горизонтальный снимок; X_S, Y_S, Z_S известны из ГНСС-измерений
1-1	методика 1	1 снимок, $\alpha = 30^\circ$, X_S, Y_S, Z_S известны из ГНСС-измерений
1-2		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$, X_S и Y_S известны из ГНСС-измерений
1-3		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$, Z_S известно из ГНСС-измерений
1-4		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$, X_S известно из ГНСС-измерений
2-1	методика 2	1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = -30^\circ; S_1 = S_2$
2-2		1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = -30^\circ; S_1 \neq S_2$
2-3		2 камеры, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = -30^\circ; S_1 = S_2$
3-1	методика 3	1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ, \omega_2 = 30^\circ; S_1 = S_2$
3-2		1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ, \omega_2 = 30^\circ; S_1 \neq S_2$

После обработки макетных снимков выполнена оценка качества калибровки на основе погрешностей определения фокусного расстояния σf и координат главной точки σx_0 и σy_0 . На рисунке 3 представлены максимальное, минимальное и среднее значение погрешности, СКО элементов внутреннего ориентирования.

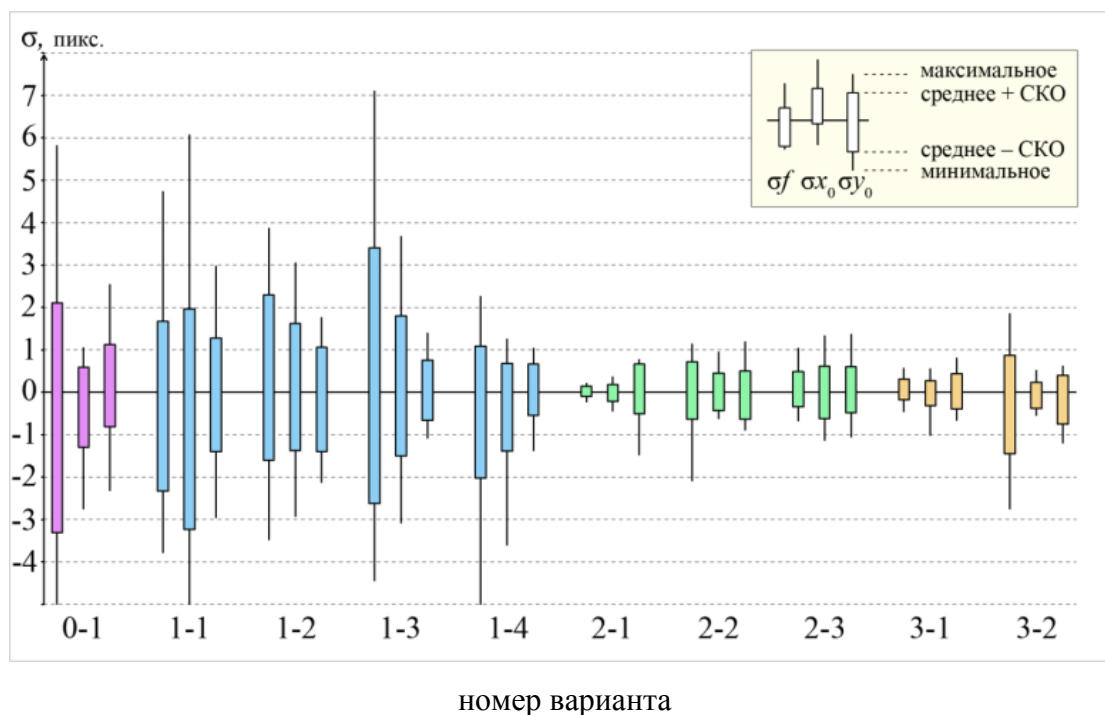


Рисунок 3 – Точность калибровки камеры по снимкам плоского тест-объекта

Результаты исследования показали, что все представленные в таблице 1 методики калибровки работоспособны.

Использование для калибровки даже одного наклонного снимка (варианты 1-1, 1-2, 1-3, 1-4) позволяет оценить точность определения координат центра фотографирования с помощью ГНСС благодаря избыточности измерений.

Варианты 2-1 и 3-1, соответствующие случаю калибровки НЦСК по двум снимкам из одной точки пространства, обеспечивают наиболее высокую точность определения элементов внутреннего ориентирования.

Использование для калибровки НЦСК пары наклонных снимков (варианты 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2) предпочтительнее использования одного снимка и коор-

динат центра фотографирования, полученных по данным ГНСС (варианты 0-1, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4), если точность измерения координат точек снимка (0,5 пикселя по осям x и y) выше точности ГНСС-измерений (приведенная СКО по осям X и Y – 1 пиксель, по оси Z – 3 пикселя).

При использовании методик 2 и 3, отличающихся положением плоскостей главного вертикала снимков, получены аналогичные по точности результаты, что дает основание объединить эти методики в одну, сняв ограничения на взаимное расположение плоскостей наклона двух снимков, и рекомендовать ее как усовершенствованную методику калибровки НЦСК.

Для калибровки НЦСК в соответствии с усовершенствованной методикой осуществляется фотографирование тест-объекта или испытательного полигона при наклонном положении оптической оси съемочной камеры для получения двух и более снимков. Углы наклона снимков относительно тест-объекта должны составлять не менее 30° , углы между главными лучами снимков – не менее 60° . В этом случае на тест-объект не накладываются ограничения, связанные с превышениями точек над его средней плоскостью. Выполнение дополнительного условия получения снимков из одной точки пространства позволяет повысить точность определения параметров калибровки.

Для оценки влияния нестрогого соблюдения условия получения снимков из одной точки пространства на точность определения элементов внутреннего ориентирования проведен ряд экспериментов по обработке пяти макетных снимков плоского тест-объекта, полученных при использовании штатива.

Исследования подтвердили линейную зависимость между величиной смещения центра фотографирования НЦСК относительно центра вращения штативной головки и ошибками определения элементов внутреннего ориентирования. На основе анализа результатов калибровки по макетным снимкам выполнен расчет допустимых значений смещения центра фотографирования для камеры Sony Alpha NEX-5 при использовании штатива с обычной штативной головкой, расположенного на расстоянии 20 м от снимаемого объекта. Установлено, что для обеспечения величин систематических погрешностей в парамет-

рах калибровки f , x_0 , y_0 , не превышающих случайные погрешности измерений координат точек снимков, допустимое смещение не должно превышать 2,2 мм, что практически невыполнимо при использовании штатива с обычной штативной головкой.

Для проверки возможности исключения систематических погрешностей в параметрах f , x_0 , y_0 , возникающих вследствие смещения центра фотографирования при изменении углов наклона снимков, проведены эксперименты с применением методики калибровки, предусматривающей использование математической модели штатива. При моделировании условий съемки камерой Sony Alpha NEX-5 с объективом E 16mm F2.8 смещения узловой точки объектива относительно центра вращения штативной головки Era ECSA-3110 заданы аналогичные реальным: 0,005 м по оси x , 0,065 м по оси y и $-0,04$ м по оси z . В экспериментах использовалась схема фотографирования, предусматривающая получение пяти снимков из одной точки пространства.

На основе результатов исследований установлено, что применение математической модели штатива позволяет исключить систематическую составляющую из погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования.

С целью подтверждения работоспособности усовершенствованной методики калибровки НЦСК по реальным снимкам разработанного тест-объекта, полученным камерой Sony Alpha NEX-5R с объективом E 16mm F2.8, проведено три эксперимента с использованием различных вариантов калибровки:

- по снимку звездного неба;
- по пространственному тест-объекту (классическая методика);
- по плоскому тест-объекту (усовершенствованная методика).

Обработка снимков выполнена в вычислительной среде Equilibrium. В качестве математической модели искажений связки лучей использована полиномиальная модель радиальной дисторсии, принятая в цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD.

Для сравнения разных вариантов калибровки разработана методика, предусматривающая сопоставление связок проектирующих лучей, восстановлен-

ных по снимку звездного неба и параметрам, полученным в различных вариантах калибровки, с эталонной связкой. В качестве лучей эталонной связки использованы направления на звезды, относительное положение которых отличается высокой стабильностью, вычисленные через склонение и прямое восхождение.

Для оценки точности совмещения двух связок лучей определено среднее квадратическое отклонение соответственных лучей $m_{\Delta\alpha}$ по формуле

$$m_{\Delta\alpha} = \sqrt{\frac{\sum \left\| \frac{\bar{X}_{2i}}{\|\bar{X}_{2i}\|} - \frac{\bar{X}_{1i}}{\|\bar{X}_{1i}\|} \right\|^2}{n}}, \quad (8)$$

где $\bar{X}_{1i}, \bar{X}_{2i}$ – векторы направления на точку i для сравниваемой и эталонной связки лучей соответственно; n – количество лучей в связке.

Результаты оценки точности различных вариантов калибровки НЦСК представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнения полученных связок лучей с эталонной

Вариант калибровки	Количество снимков	Количество точек на снимках	Ошибка единицы веса μ , пиксель	СКО совмещения двух связок лучей, $m_{\Delta\alpha}$
По снимку звездного неба	1	262	0,51	38,1"
По пространственному тест-объекту (классическая методика)	3	436	0,48	75,8"
По плоскому тест-объекту (усовершенствованная методика)	2	277	0,40	87,0"
Примечание – угловой размер центрального пикселя согласно расчетам составляет $\approx 62''$.				

Данные таблицы 2 свидетельствуют о равнозначности выполненных измерений по снимкам во всех вариантах калибровки. Разница в точности совмещения связок, восстановленных по результатам усовершенствованного варианта калибровки по плоскому тест-объекту и классического варианта по простран-

венному тест-объекту, с эталонной связкой, не превышает $1/5$ размера пикселя, что сопоставимо с точностью алгоритмов автоматической идентификации точек на цифровых снимках.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов с использованием реальных снимков свидетельствуют о работоспособности и возможности практического применения усовершенствованной методики калибровки с использованием дополнительных геометрических условий для определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии неметрических цифровых съемочных камер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

- выполнен анализ методик калибровки НЦСК, тест-объектов и испытательных полигонов, позволивший выявить их основные достоинства и недостатки и подтвердить актуальность исследований;
- теоретически исследованы свойства преобразованной связки лучей наклонного снимка плоской местности, что позволило выявить геометрические условия, учет которых дает возможность выполнять калибровку НЦСК по снимкам плоского тест-объекта;
- усовершенствована классическая методика калибровки камер по пространственному тест-объекту за счет использования дополнительных геометрических условий, применение которых позволило снять ограничения на взаимное превышение между опорными точками и выбор территории в качестве испытательного полигона, что обеспечивает сокращение затрат на выполнение калибровки;
- разработан тест-объект с использованием шаблонов, позволяющий оперативно выполнять калибровку НЦСК с применением усовершенствованной методики по плоскому тест-объекту и классической методики по пространственному тест-объекту;

– разработан вычислительный алгоритм усовершенствованной методики калибровки НЦСК, который реализован в программном комплексе на языке Object Pascal;

– выполнена апробация усовершенствованной методики калибровки цифровых съемочных камер с использованием дополнительных геометрических условий по макетным и реальным снимкам, подтвердившая ее работоспособность и гибкость в применении.

Таким образом, поставленная цель исследований достигнута. Предложена, обоснована и исследована методика калибровки НЦСК, основанная на использовании дополнительных геометрических условий, позволяющая снять с процесса калибровки такие существенные ограничения, как наличие стационарного тест-объекта и необходимость обеспечения перепада высот опорных точек, что приведет к сокращению стоимости и времени проведения калибровочных работ.

Усовершенствованная методика калибровки рекомендуется к использованию на предприятиях, выполняющих аэрофотосъемку и наземную съемку с применением НЦСК для определения координат точек и построения моделей объектов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются проведение калибровки съемочных камер с использованием усовершенствованной методики калибровки в производственных условиях, выработка практических рекомендаций по применению методики калибровки, изучение возможностей использования других типов геометрических условий с целью повышения эффективности калибровочного процесса.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Никитин, В. Н. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.

2 Семенцов, А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных [Текст] / А. В. Семенцов // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

3 Разработка стенда для определения характеристик шторно-щелевых затворов [Текст] / В. Н. Никитин, Д. Н. Раков, А. В. Семенцов, С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова // Вестник СГУГИТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 82–95.

4 Никитин, В. Н. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

5 Семенцов, А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер [Текст] / А. В. Семенцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

6 Никитин, В. Н. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 12–18.

7 Семенцов, А. В. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // 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. 1. – С. 73–81.

8 Семенцов, А. В. О возможности калибровки камер без использования координат опорных точек [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дис-

танционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 3–8.

9 Семенцов, А. В. Применение математической модели штатива в методике калибровки камер без использования координат опорных точек [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 8–17.

10 Семенцов, А. В. Сравнение результатов калибровки камер, полученных с использованием различных методик и моделей дисторсии [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 17–24.