

На правах рукописи

Червова Анастасия Евгеньевна

Математическое моделирование процессов построения цифровых битовых  
макетных аэроснимков для тестирования цифровых  
фотограмметрических станций

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
Коркин Вадим Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Журкин Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», заведующий кафедрой вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации;

Шевчук Станислав Олегович, кандидат технических наук, акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», и.о. начальника отдела геодезического обеспечения геолого-геофизических работ.

Ведущая организация – акционерное общество «Урало-Сибирская Гео-Информационная Компания» (г. Екатеринбург)

Защита состоится 15 декабря в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:  
<http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/chervova-anastasia-evgenyevna/>

Автореферат разослан 23 октября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Середович В. А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 14.10.2015. Формат 60×80 1/16.  
Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ.  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 10  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследований.* В течение многих десятилетий фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков выполнялась сначала на универсальных оптико-механических, а затем на аналитических универсальных приборах. Для исследования и тестирования инструментальной точности таких приборов были разработаны несколько видов специальных тест-объектов: контрольные сетки, контрольные снимки, снимки-макеты Ошуркова, а для проверки алгоритмов фототриангуляции использовали аналитические снимки-макеты Лобанова А. Н., Антипова И. Т.

В 80-е гг. XX в. появилась возможность получать цифровое изображение, начала активно развиваться цифровая фотограмметрия. Для фотограмметрической обработки цифровых снимков стали создавать специальные фотограмметрические приборы – цифровые стереоплоттеры, получившие в России название «цифровые фотограмметрические станции» (ЦФС), системы или комплексы. Основа ЦФС – программное обеспечение, выполняющее все фотограмметрические процессы. Однако большинство производителей не дают описания используемых алгоритмов вычисления. Конечно, разработчики выполняют тестирование программ для проверки правильности работы системы, но не предоставляют информации об этом. Кроме того, алгоритмы, применяемые в тех или иных программах, не всегда известны. Не у всех ЦФС имеется возможность получения промежуточных результатов вычислений, позволяющих оценить точность построения модели на всех этапах фотограмметрической обработки.

В настоящее время существует большое количество различных фотограмметрических систем, однако отсутствуют сертифицированные методики оценки точности приборов такого типа.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость независимого контроля за правильностью работы ЦФС, а также оценки точности выполнения как отдельных этапов фотограмметрических построений, так и точности обработки снимков в целом.

Одним из возможных вариантов выполнения такой оценки качества работы ЦФС является использование цифровых макетных снимков, т. е. использование исследований, аналогичных тестированию аналоговых и аналитических универсальных приборов.

Таким образом, разработка методики создания цифровых макетных аэро-снимков является актуальной задачей.

Такие макетные снимки позволят оценить точность работы фотограмметрических систем, решить задачу сравнения правильности и точности работы различных цифровых станций, произвести оценку точности полученных результатов, осуществить контроль за отдельными фотограмметрическими процессами, оценить качество работы оператора.

*Степень разработанности темы.* Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов цифровой фотограмметрии внесли работы Журкина И. Г., Пяткина В. П., Гука А. П., Аккермана Ф., Дэвиса Е. и многих других. Разработкой макетных материалов для тестирования инструментальной точности универсальных и аналитических приборов занимались такие известные ученые, как Лобанов А. Н., Дубиновский В. Б., Лысенко Ф. Ф., Калантаров Е. И., Ошурков Г. А., Антипов И. Т., Бобряшов А. М., Булушев М. Н. и др. В настоящее время исследования по вопросу создания цифровых макетных материалов проводят как отечественные, так и зарубежные разработчики ЦФС.

*Целью исследований* является разработка алгоритмов и методик формирования цифровых макетных снимков маршрута и блока на основе совершенствования существующей методики получения стереопары таких снимков с целью повышения точности и расширения сферы применения макетных снимков.

*Основные задачи исследований.* Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- выполнить анализ методик тестирования различных фотограмметрических приборов и алгоритмов современных ЦФС;

- разработать методики создания цифровых макетных аэроснимков, образующих маршрут и блок;
- разработать методику маркировки точек на цифровых макетных аэроснимках с подпиксельной точностью;
- выполнить исследования разработанных методик создания макетных снимков с использованием современных ЦФС.

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в следующем:

- предложена математическая модель построения макетных снимков, отличающаяся тем, что позволяет формировать непрерывные макетные снимки по цифровой модели рельефа методом обратного трассирования, исключает неоднозначность решений и позволяет работать с подпиксельной точностью, что обеспечивает возможность формировать цифровые макетные снимки для различных типов поверхностей и исследовать ЦФС различного класса точности;
- разработаны методики формирования высокоточных макетных цифровых снимков маршрутов и блоков, отличающиеся оригинальным алгоритмом моделирования, позволяющим маркировать любое количество точек на снимках.

*Теоретическая и практическая значимость* работы заключается в том, что предложенные математические модели можно использовать для формирования аналитических непрерывных макетных снимков высокой точности на основе использования метода обратного трассирования.

Разработанные методики моделирования макетных снимков позволяют создавать цифровые макеты с реальными параметрами аэрофотосъемки для различных типов поверхностей и могут быть использованы при тестировании любых ЦФС.

*Положения, выносимые на защиту:*

- разработанная математическая модель, основанная на использовании метода обратного трассирования модели местности, позволяет создавать высокоточные непрерывные макетные снимки;

- разработанная методика позволяет маркировать точки макетных снимков с подпиксельной точностью;
- разработанные методики создания цифровых макетных снимков маршрутов и блоков могут быть использованы для исследования различных современных ЦФС.

*Степень достоверности и апробация результатов.* Основные результаты работы внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» при изучении дисциплин профиля «Аэрокосмические съемки, фотограмметрия» бакалаврами направления «Геодезия и дистанционное зондирование».

Результаты работы были представлены на конкурс пользовательских проектов, проводимый ЗАО «Фирма Ракурс», и отмечены дипломом III степени.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь» (2011 г., Новосибирск), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2012–2015 гг., Новосибирск).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Во введении* раскрыта актуальность и степень разработанности темы исследования, определены цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, указана степень достоверности результатов исследований.

*В первом разделе* диссертации представлены общие сведения о современных цифровых фотограмметрических станциях. Приведены основные требования к качеству и точности математических алгоритмов при создании программного обеспечения для ЦФС. Отмечено, что во всех рассмотренных фотограмметрических комплексах могут быть обработаны одни и те же исходные материалы (аэроснимки), а в результате работы получены одни и те же резуль-

таты – построена цифровая модель рельефа и местности, созданы ортофотопланы и т. д. Однако алгоритмы, заложенные в ЦФС, могут существенно различаться, часто их реализация выполнена разными методами. Для ряда современных фотограмметрических систем нет описания заложенных в них алгоритмов, что не позволяет объективно оценить их правильность и точность. В связи с этим, необходимо проводить независимое тестирование всех ЦФС по надежным материалам с известными параметрами – цифровым макетным снимкам (с известными плоскими и пространственными координатами замаркированных точек).

Рассмотрены виды и методы создания макетов, применяемые ранее, при исследовании универсальных и аналитических приборов, и в настоящее время, при создании и отладке современных ЦФС. Сделан вывод об отсутствии информации об исследовании современных фотограмметрических станций с помощью макетных снимков, а также методик и программных средств для их создания разработчиками современного оборудования.

В связи с этим выявлена необходимость разработки методик и формирования по ним цифровых макетных снимков, которые возможно использовать при работе со всеми современными ЦФС.

*Второй раздел* диссертации посвящен разработке методик и математических моделей формирования цифровых макетных аэроснимков.

На первом этапе выполнена классификация цифровых макетных снимков в зависимости от их точности. Классификация опирается на руководящий документ «Приборы фотограмметрические. Термины и определения» и Инструкцию по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов. В соответствии с данной классификацией все цифровые макетные снимки в зависимости от точности можно разделить на два класса. К среднему классу точности отнесены макеты, при обработке которых на ЦФС получают результаты, ошибки которых не превышают 0,4–0,5 элемента сканирования при его величине 10–20 мкм. К высокому классу точности отнесены макеты, ошибки результатов

которых получают не более 0,1–0,2 пиксела при величине элемента сканирования 5–10 мкм.

Все разработанные методики представлены в виде блок-схем, в которых отражены основные процессы моделирования макетных снимков и последовательность их реализации в программной среде.

Исходными данными для создания макетных снимков при реализации любой из методик являются элементы внутреннего и внешнего ориентирования.

Элементы внутреннего ориентирования  $x_0, y_0, f$  и формат снимков задаются в зависимости от моделируемой камеры, которая должна соответствовать реально существующим цифровым или аналоговым аэрофотоаппаратом (АФА). Элементы внешнего ориентирования задаются в зависимости от решаемой задачи.

Необходимость использования реальных параметров при формировании макетов продиктована стремлением исследовать реальные проблемы, возникающие при обработке аэроснимков на ЦФС.

Методика моделирования стереопары непрерывных макетных снимков представлена на рисунке 1. Основы данной методики были заложены в 1997 г. на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования Сибирской государственной геодезической академии при разработке цифрового стереоплоттера SDS. Эта методика была усовершенствована, алгоритмы автоматизированы, в результате чего полученные макеты можно использовать при работе со всеми современными ЦФС.

Процесс формирования макетных стереопар осуществляется следующим образом:

- создаются файлы исходных данных: элементы внутреннего и внешнего ориентирования размеры снимков, продольное перекрытие снимков и цифровая модель рельефа;
- в соответствии с выбранным форматом снимков на аналитическом макете левого снимка создается сетка с равным шагом;

- для каждого узла сетки определяются пространственные координаты точек земной поверхности методом обратного трассирования;
- определяются плоские координаты точек на правом снимке.



Рисунок 1 – Принципиальная схема методики моделирования стереопары непрерывных макетных снимков

Процесс формирования макетных снимков маршрута имеет ряд особенностей, по сравнению с моделированием стереопары. Исходные данные при создании макетных снимков маршрута задаются так же, как и при создании стереопары. Дополнительным параметром является тройное продольное перекрытие снимков. Алгоритм формирования аналитических непрерывных макетных снимков маршрута представлен на рисунке 2.

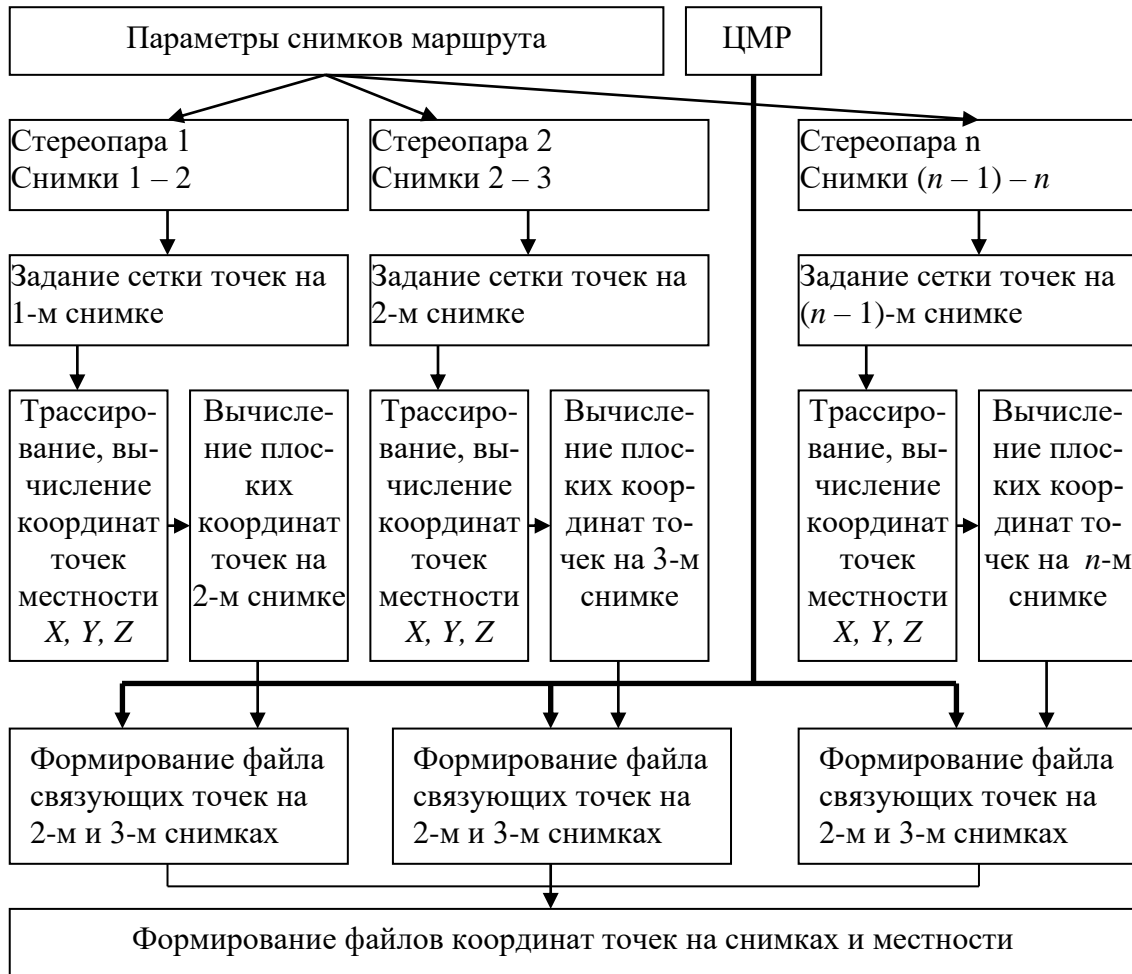


Рисунок 2 – Алгоритм формирования аналитических непрерывных макетных снимков маршрута

Из рисунка 2 видно, что для формирования аналитических непрерывных макетных снимков маршрута к алгоритму моделирования стереопары добавляется дополнительный процесс: для связующих точек, попадающих в зону тройного перекрытия снимков, вычисляются плоские координаты на третьем снимке. Этот процесс повторяется для каждой стереопары маршрута, кроме последней.

Для объединения маршрутов в блок необходимы межмаршрутные точки, расположенные в зонах поперечного перекрытия снимков. Поэтому основной задачей при разработке программы моделирования макетных снимков блока, по сравнению с программой моделирования снимков маршрута, является определение положения межмаршрутных точек на всех снимках блока. Алгоритм моделирования аналитических непрерывных макетных снимков блока представлен на рисунке 3.

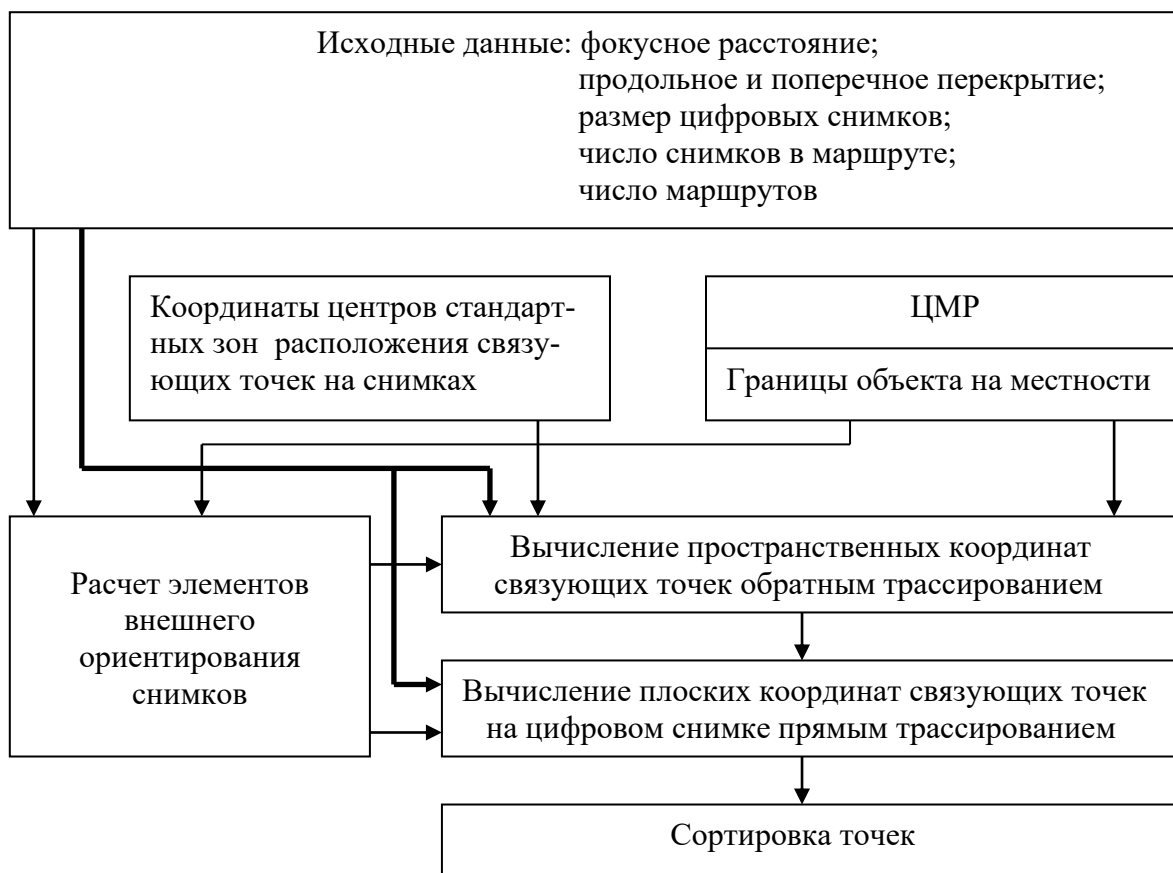


Рисунок 3 – Алгоритм формирования аналитических непрерывных макетных снимков блока

Из схем, представленных на рисунках 1–3, видно, что для программной реализации разработанных методик моделирования аналитических непрерывных макетных снимков необходимо создать несколько математических моделей.

*Математическая модель съёмочной системы.* При моделировании макетных снимков съёмочная система представляет собой одну идеальную камеру с заданными элементами внутреннего ориентирования. Если в макетные снимки необходимо внести искажения, то в общем виде съёмочная камера представляется системой двух сопряженных камер с общей оптической осью. Нижняя камера является идеальной (не вносит никаких искажений) и служит для определения положения точки местности, заданной на снимке. В системе координат этой камеры строится ЦМР, что позволяет обеспечить быструю идентификацию точек на снимках и местности. Верхняя камера служит для синтезирования

цифрового изображения. Она позволяет вводить любые виды искажений снимка (дисторсия, деформация, случайные ошибки и т. п.).

*Математическая модель объекта.* Под математической моделью объекта в данном случае понимается цифровая модель рельефа. ЦМР представляет собой математическое описание земной поверхности как совокупности расположенных на ней точек и связей между ними (дискретной информации), а также математических методов определения высот произвольных точек, принадлежащих области моделирования, по их плановым координатам. Для моделирования макетных снимков ЦМР создается по нерегулярной сетке исходных точек, с соблюдением непрерывности моделируемой поверхности. Вся область моделирования разбивается на фрагменты с учетом сложности рельефа, а каждый фрагмент – на элементарные участки прямоугольной формы. Информация о созданной ЦМР хранится в виде коэффициентов полиномов и координат точек границ области моделирования. Поверхность ЦМР аппроксимируется полиномом вида

$$P(X, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(X) T_j(Y). \quad (1)$$

Исходную информацию для создания ЦМР можно получать с карты или с геометрической модели местности, построенной по реальным аэрофотоснимкам.

*Модель проецирования.* Под моделью проецирования понимается способ получения плоских координат точек снимков (прямое трассирование) и пространственных координат соответствующих точек местности (обратное трассирование). При расчете координат точек снимков в стереопаре ведущим принимается левый снимок, на котором разбивается сетка с заданным шагом. Задача состоит в том, чтобы для любой точки левого снимка получить пространственные координаты точки на местности и плоские координаты на правом снимке. Для того, чтобы для любой точки  $a$  сетки с плоскими координатами  $x, y$  в системе координат левого снимка получить пространственные координаты на по-

верхности ЦМР, сначала определяются координаты точки  $A'$  – пересечение проецирующего луча  $S_1a$  со средней плоскостью рельефа (обратное трассирование) – по формулам:

$$\begin{aligned} X_{\check{A}\check{y}} - X_S &= (Z_{cp} - Z_S) \frac{a_1(x_a - x_0) + a_2(y_a - y_0) - a_3f}{c_1(x_a - x_0) + c_2(y_a - y_0) - c_3f} \\ Y_{\check{A}\check{y}} - Y_S &= (Z_{cp} - Z_S) \frac{b_1(x_a - x_0) + b_2(y_a - y_0) - b_3f}{c_1(x_a - x_0) + c_2(y_a - y_0) - c_3f} \end{aligned} \quad (2)$$

Затем в вертикальной плоскости  $S_1 N A\check{y}$  восстанавливается рельеф вдоль линии  $N A\check{y}$  с заданным шагом, обеспечивающим точность определения координат точки пересечения  $A$  на поверхности ЦМР (рисунок 4). Для сокращения времени вычисления необходимо ограничить зону нахождения точки  $A$ , используя формулу смещения точки снимка за рельеф:

$$\delta r_h = \frac{h}{H} r, \quad (3)$$

где  $r = N A'$ ;

$h$  – максимальное превышение точек ЦМР над средней горизонтальной плоскостью;

$H$  – высота фотографирования над средней плоскостью.

На следующем этапе определяются два ближайших узла, между которыми находится точка  $A$ . Данная задача решается путем перебора разности между вертикальными катетами  $h_k$  образованных треугольников и отметками рельефа  $Z_k$  в узлах сетки. Перебор начинается от точки надира  $N$ . Если полученная разность меняет знак при переходе от одного узла к другому, значит между этими смежными узлами и находится искомая точка  $A$  на поверхности ЦМР.

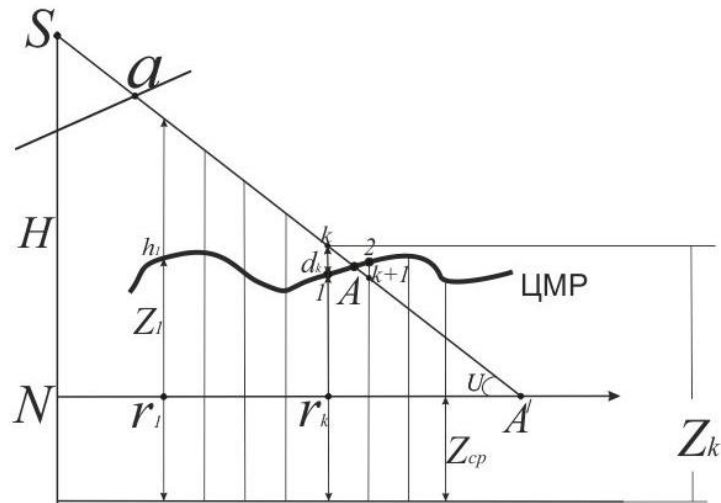


Рисунок 4 – Схема определения пространственных координат точки А способом обратного трассирования

Математически процесс обратного трассирования можно записать формулой

$$d_k = h_k - Z_k, \quad (4)$$

где  $h_k = (NA\check{y} - r_k) \text{tg}U + Z_{cp}$ ;

$$\text{tg}U = \frac{H}{NA\check{y}};$$

$$Z_k = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(r_k) T_j(r_k),$$

если  $d_k > 0$  и  $d_{k+1} < 0$ , то точка А лежит между  $k$  и  $k + 1$ .

В целях повышения точности определения координат точки А составляются уравнения двух прямых. Первая прямая проходит через две найденные точки ( $X_1, Z_1$  – координаты первой точки,  $X_2, Z_2$  – координаты второй точки), расположенные на поверхности рельефа (см. рисунок 4), а вторая – через центр

проекции  $S$  и  $A'$  ( $X_S, Z_S$  – координаты точки  $S$ ,  $X_{A'}, Z_{A'}$  – координаты точки  $A'$ ). В результате координаты точки  $A$  можно получить по формулам:

$$\begin{aligned} X_A &= \frac{Z_S - l_1}{m_1 - m_2} \\ Z_A &= Z_S + m_2 X_A \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l_1 = Z_1 - m_1 X_1$ ;

$$m_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{X_2 - X_1};$$

$$m_2 = \frac{Z_{A\ddot{y}} - Z_S}{X_{A\ddot{y}} - X_S}.$$

Вычисляются пространственные координаты  $X_A, Y_A$  точки  $A$  по формулам (2), в которых вместо  $Z_{cp}$  используется координата  $Z$  точки  $A$ .

Затем вычисляются плоские координаты точки  $a$  на правом снимке способом прямого трассирования по формулам:

$$\begin{aligned} x_a - x_0 &= -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \\ y_a - y_0 &= -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{aligned} \quad (6)$$

Разработанный алгоритм обратного трассирования свободен от неоднозначности решений и не требует учета мертвых зон.

Результатом работы программ, созданных по представленным алгоритмам, являются макетные снимки в аналитическом виде. Для получения цифровых макетных снимков производится маркировка точек в среде растровой графики, например Photoshop. Программный продукт Photoshop дает возможность

маркировки точек с точностью одного пикселя. Поэтому для создания высокоточных макетных снимков была разработана методика маркировки точек с подпиксельной точностью, которая заключается в следующем:

- выбирается точка снимка с известными плоскими координатами в пикселях, например  $x = 123,72$ ,  $y = 455,61$  (рисунок 5);

- в программном продукте Photoshop по целым значениям координат  $x$ ,  $y$  маркируется точка. Маркировка осуществляется в виде черного креста с толщиной линии, равной одному пикселю. Левый верхний угол пикселя, образованного пересечением черных линий, принимается за начало системы координат пикселя (рисунок 5, *a*);

- анализируется дробная часть координат точки снимка. В зависимости от того, в какую сторону округляется координата согласно дробной части, с той стороны от черного креста наносятся дополнительные линии серого цвета. Для данного примера  $x = 124$ ,  $y = 456$ ;

- как видно из рисунка 5, *b*, серые линии пересекаются, образуя дополнительный крест. Место пересечения указывает ту четверть черного пикселя, в которой реально находится точка с заданными координатами. Данному виду маркировки было дано название «двойной крест». При работе с маркировочными знаками в виде одинарного креста наведение измерительной марки осуществляется в центр черного креста. При наличии маркировки в виде «двойного креста» необходимо наводить марку в центр той четверти черного креста, на которую указывает дополнительный серый крест (рисунок 5, *b*). Для четкого визуального восприятия маркировочного знака при обработке макетных снимков рекомендуется убрать лишние серые линии в маркировке (рисунок 5, *в*);

- для более точного наведения на точки макетных снимков следует указывать численные значения дробной части координат. В данном примере у вертикальной линии рядом с маркировочным знаком указывается цифра «7», это означает, что вправо от начала системы координат пикселя необходимо переместить марку на седьмую часть пикселя. По аналогичному принципу указыва-

ется цифра «6» у горизонтальной линии. На рисунке 5, *г* показана окончательная точка наведения измерительной марки.

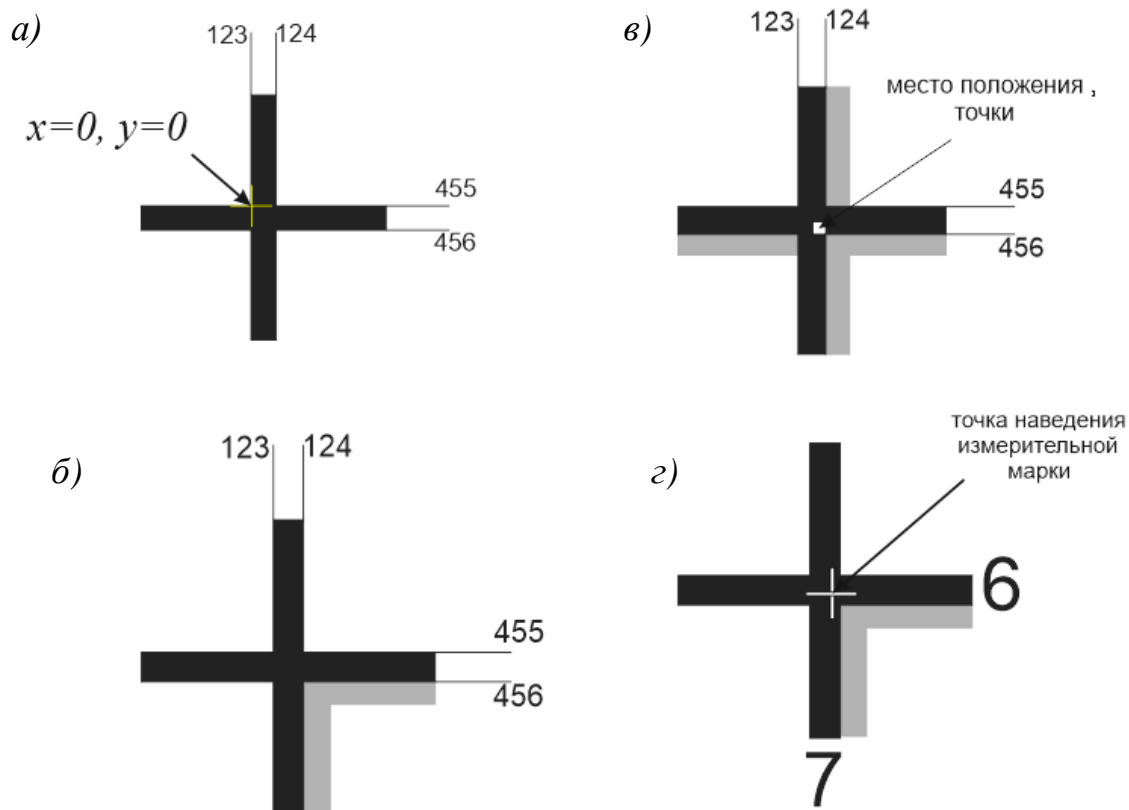


Рисунок 5 – Методика маркировки точек на снимках с подпиксельной точностью:

- а*) маркировка «крест»; *б*) маркировка «крест + дополнительные линии»;  
*в*) маркировка «двойной крест»; *г*) маркировка «двойной крест»  
 с числовым указанием на местоположение марки

*Третий раздел диссертации* посвящен экспериментальной проверке разработанных методик создания цифровых макетных снимков и маркировки точек с подпиксельной точностью.

В настоящее время самой используемой в России является ЦФС РНОТОМОД. Данная ЦФС показала себя как точная и надежная система, с по-

мощью которой проводится обработка производственных материалов. Поэтому на примере этой фотограмметрической станции были проведены исследования по проверке созданных макетных снимков.

Сформированные макетные снимки имели общие параметры моделирования:

- $x_0 = 0, y_0 = 0, f = 100$  мм;
- продольное перекрытие снимков 60 %;
- поперечное перекрытие снимков 33 %;
- формат цифрового снимка задавался в зависимости от разрешающей способности.

В соответствии с методикой формирования стереопары цифровых битовых макетных снимков было создано три стереопары с различными параметрами моделирования.

Данные стереопары применялись для исследования алгоритмов, реализованных в ЦФС PHOTOMOD для этапов внутреннего и взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели. В таблице 1 приведены максимальные ошибки, полученные при обработке сформированных макетных стереопар.

Таблица 1 – Максимальные ошибки, возникающие при обработке стереопар макетных снимков на ЦФС PHOTOMOD

Характеристики стереопары макетных снимков		Стереопара № 1	Стереопара № 2	Стереопара № 3
	Пространственное разрешение	10 мкм	5 мкм	5 мкм
	Формат снимка, пиксели	16 400 × 16 400	32 800 × 32 800	32 800 × 32 800
	Маркировка точек с подпиксельной точностью	–	–	+
<b>Внутреннее ориентирование снимков</b>				
Средние ошибки по модулю, пиксель		0,250	0,015	0,001
<b>Взаимное ориентирование снимков</b>				
Максимальный остаточный поперечный параллакс, пиксель		0,369	0,376	0,063

## Окончание таблицы 1

Характеристики стереопары макетных снимков		Стереопара № 1	Стереопара № 2	Стереопара № 3
	Пространственное разрешение	10 мкм	5 мкм	5 мкм
	Формат снимка, пиксели	16 400 × 16 400	32 800 × 32 800	32 800 × 32 800
	Маркировка точек с подпиксельной точностью	–	–	+
Внешнее ориентирование модели				
Максимальная ошибка пространственного положения опорных точек, м	$E_{xy}$	0,070	0,019	0,003
	$\Delta Z$	0,050	0,010	0,002
Максимальная ошибка пространственного положения контрольных точек, м	$E_{xy}$	0,029	0,020	0,004
	$\Delta Z$	0,086	0,052	0,021

Согласно классификации, представленной в диссертационной работе, видно, что стереопары № 1 и № 2 относятся к среднему классу точности, а стереопара № 3 – к высокому классу точности. В результате данного экспериментального исследования можно сделать вывод, что при тестировании алгоритмов современных ЦФС можно использовать все предложенные стереопары макетных снимков: стереопары № 1 и № 2 – на первичных этапах и при необходимости оперативного проведения исследования, стереопару № 3 – для выполнения высокоточных и детальных исследований на ЦФС.

В соответствии с разработанной методикой выполнено моделирование несколько маршрутов с различными параметрами по пять макетных изображений каждый. Маршруты снимков с пространственным разрешением 5 мкм и 10 мкм и обычной маркировкой точек при обработке на ЦФС PHOTOMOD показали низкую точность фотограмметрических построений на всех этапах и были отбракованы. Маршруты снимков с пространственным разрешением 5 мкм и маркировкой точек с подпиксельной точностью при обработке на ЦФС PHOTOMOD показали высокую точность результатов обработки. Такие макет-

ные снимки могут быть использованы при исследовании современных ЦФС без ограничений. Максимальные ошибки, полученные при обработке данных маршрутов на ЦФС PHOTOMOD, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Максимальные ошибки, возникающие при обработке высокоточных маршрутов на ЦФС PHOTOMOD

Характеристика макетных снимков маршрута	Пространственное разрешение	5 мкм	5 мкм
	Формат снимка, пиксели	32 800 × 32 800	32 800 × 32 800
	Углы наклона снимков	< 0,1°	> 3°
Внутреннее ориентирование снимков			
Средние ошибки по модулю, пиксель		0,001	0,001
Взаимное ориентирование снимков			
Максимальный остаточный поперечный параллакс, пиксель		0,149	0,101
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель	$E_{xy}$	0,100	0,156
	$E_z$	0,149	0,198
Внешнее ориентирование модели			
Максимальная ошибка пространственного положения опорных точек, м	$E_{xy}$	0,003	0,005
	$\Delta Z$	0,002	0,003
Максимальная ошибка пространственного положения контрольных точек, м	$E_{xy}$	0,006	0,004
	$\Delta Z$	0,067	0,058
Максимальная ошибка пространственного положения связующих точек, м	$E_{xy}$	0,002	0,006
	$\Delta Z$	0,004	0,007

В соответствии с разработанной методикой смоделируем два блока макетных снимков, каждый из которых состоит из двух маршрутов по три изображения. Оба блока имеют пространственное разрешение – 5 мкм, формат кадра 32 800 × 32 800 пикселя. Макетные снимки блока № 2 замаркированы с подпиксельной точностью. Максимальные ошибки, полученные при обработке этих блоков на ЦФС PHOTOMOD, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Максимальные ошибки, возникающие при обработке блоков макетных снимков на ЦФС PHOTOMOD

Характеристика макетных снимков блока		Блок № 1	Блок № 2
Внутреннее ориентирование снимков			
Средние ошибки по модулю, пиксель		0,000	0,000
Взаимное ориентирование снимков			
Максимальный остаточный поперечный параллакс, пиксель		0,635	0,150
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель	$E_{xy}$	1,936	0,175
	$E_z$	2,896	0,195
Внешнее ориентирование модели			
Максимальная ошибка пространственного положения опорных точек, м	$E_{xy}$	0,026	0,004
	$\Delta Z$	0,052	0,040
Максимальная ошибка пространственного положения контрольных точек, м	$E_{xy}$	0,032	0,005
	$\Delta Z$	0,048	0,013
Максимальная ошибка пространственного положения связующих точек, м	$E_{xy}$	0,046	0,013
	$\Delta Z$	0,078	0,007

Принимая во внимание результаты, приведенные в таблице 3, можно сделать вывод о том, что при анализе алгоритмов, заложенных в современных ЦФС, рекомендуется использовать блоки макетных снимков, созданных с использованием методики маркировки точек с подпиксельной точностью. Сформированные высокоточные макетные снимки маршрута и блока позволят исследовать процесс построения фототриангуляции, проверить работу алгоритмов фототриангуляции различными фотограмметрическими методами и сравнить их точность.

Проведенные исследования показали, что разработанные методики построения высокоточных макетных снимков работоспособны, сформированные макетные снимки являются надежными материалами при исследовании правильности и точности алгоритмов современных ЦФС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

- выполнен анализ методик создания макетных снимков, применяемых для тестирования различных фотограмметрических приборов;
- разработана математическая модель построения макетных снимков, позволяющая формировать непрерывные макетные снимки по цифровой модели рельефа методом обратного трассирования;
- разработанная модель исключает неоднозначность решений и позволяет работать с подпиксельной точностью, что обеспечивает возможность формировать цифровые макетные снимки для различных типов поверхностей и исследовать ЦФС различного класса точности;
- разработаны методики построения блочных и маршрутных макетных снимков, предназначенные для исследования ЦФС;
- разработанные методики моделирования макетных снимков позволяют создавать цифровые макеты с реальными параметрами аэрофотосъемки для различных типов поверхностей и могут быть использованы при тестировании любых ЦФС;
- созданные цифровые высокоточные макетные снимки апробированы при исследовании алгоритмов реальных ЦФС на примере ЦФС РНОТОМОД.

Выполненные исследования рекомендованы для дальнейшего совершенствования методик моделирования цифровых макетных снимков, предназначенных для решения различных фотограмметрических задач. Полученные в результате реализации разработанных методик макетные снимки рекомендованы к внедрению на специализированных предприятиях: их необходимо использовать при отладке работы ЦФС, при тестировании алгоритмов для подтверждения правильности их работы, для обучения операторов, при создании реальных моделей для расчета априорной оценки точности.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и методики создания маршрута макетных цифровых аэроснимков с подпиксельной точностью [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 51–56.

2 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и методики создания блока макетных цифровых аэроснимков высокого класса точности [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Инженерные изыскания. – 2015. – № 9. – С. 58–61.

3 Коркин, В. С. Проект создания комплекса цифровых макетных аэроснимков для исследования фотограмметрических систем [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Сидякина // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 4, ч. 1. – С. 77–79.

4 Никитин, В. Н. Методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков с использованием машинной графики [Текст] / В. Н. Никитин, А. Е. Сидякина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 33–38.

5 Сидякина, А. Е. Алгоритм формирования стереопары битовых макетных снимков для исследования точности работы ЦФС Photomod 5 [Текст] / А. Е. Сидякина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых ученых СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 71–76.

6 Никитин, В. Н. Создание макетных снимков площадной аэрофотосъемки с использованием ArcGIS [Текст] / В. Н. Никитин, А. Е. Червова, Е. Ю. Сахарова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фото-

грамметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 95–100.

7 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и программы формирования цифровых макетных снимков, образующих маршрут [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // 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. 88–91.

8 Коркин, В. С. Разработка методики моделирования псевдореалистичных тест-объектов [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // 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. 81–85.

9 Коркин, В. С. Сравнительный анализ результатов тестирования ЦФС РНОТОМОД с помощью маршрутов высокоточных цифровых макетных снимков [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 34–39.