

УДК 528 711 089 6

На правах рукописи

Быков Василий Леонидович



**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ
КАЛИБРОВКИ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СРЕДСТВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ**

25 00 34 – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Новосибирск – 2007

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Малявский Борис Кириллович


Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Антипов Иван Тимофеевич,
кандидат технических наук, доцент
Курков Владимир Михайлович

Ведущая организация – ФГУП «Уралгеоинформ», г Екатеринбург

Защита состоится «12» ноября 2007 г. в 14 00 час на заседании диссертационного совета Д 212 251 02 в Сибирской государственной геодезической академии по адресу 630108, Новосибирск, 108, ул Плахотного, 10, СГГА, аудитория 403

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА
Автореферат разослан «10» октября 2007 г

Ученый секретарь диссертационного совета



Середович В А

Изд лиц ЛР № 020461 от 04 03 1997 г

Подписано в печать 05 10 2007 Формат 60 × 84 1/16

Усл печ л 1,28 Уч -изд л 0,87 Тираж 100 экз Заказ 138

Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, ул Плахотного, 10

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, Плахотного, 8

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в области цифровых технологий привел к появлению на рынке высококачественной цифровой фотосъемочной аппаратуры. Малоформатные и среднеформатные цифровые камеры с успехом используются при наземной стереотопографической съемке, а также при аэрофотосъемке с беспилотных летательных аппаратов и средств малой авиации. Разрабатываются широкоформатные цифровые аэрофотосъемочные комплексы, способные конкурировать с лучшими образцами пленочных камер.

С появлением цифровой техники для аэрофотосъемки изменились подходы к определению элементов внутреннего ориентирования камер. На смену визуальным лабораторным способам калибровки, успешно применявшимся на протяжении многих лет, приходят лабораторные фотографические способы, основанные на использовании фотографий тест-объектов. Для широкоформатных цифровых камер остается актуальной задача калибровки снимков на испытательных полигонах. Для этих целей в горных условиях создаются дорогостоящие калибровочные полигоны.

Исследованиям в области калибровки фотокамер и снимков посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых: Коншина М.Д., Лобанова А.Н., Антипова И.Т., Гельмана Р.Н., Гука А.П., Дубиновского В.Б., Желтова С.Ю., Журкина И.Г., Малявского Б.К., Погорелова В.В., Тюфлина Ю.С., Чебуничева А.Г., Куркова В.М., Михайлова А.П., Ackerman F., Norton C.L. и др. Ими сформулированы основные принципы калибровки, разработаны способы и определены перспективные направления развития этих методов. Так, одним из перспективных направлений считается способ калибровки снимков при известных элементах внешнего ориентирования. Развитие этих способов сдерживалось отсутствием эффективных средств позиционирования в пространстве.

В настоящее время широкое распространение получили спутниковые системы позиционирования. Благодаря их внедрению в топографо-геодезическое производство, в корне изменилась технология геодезических, топографических, аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ. Использование спутниковых навигационных систем при калибровке снимков позволяет успешно реализовать и усовершенствовать известные принципы полевой калибровки. Так, независимое определение координат центров фотографирования одиночного снимка или разности высот фотографирования двух различного масштабных снимков позволяет выполнить полную калибровку в условиях равнинного полигона. Исследования способов калибровки, основанных на сочетании методов фотограмметрии и спутникового позиционирования, представляются актуальными.

Цель – разработка и исследование методики калибровки фотосъемочных камер и снимков по испытательному на основе обработки плоских тест-объектов с использованием данных спутникового позиционирования центров фотографирования.

Для реализации поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) выполнить анализ существующих способов калибровки,
- 2) разработать методику лабораторной калибровки малоформатных фотокамер, основанную на двухъярусном фотографировании плоского тест-объекта,
- 3) выполнить исследование способа полной калибровки снимков в условиях равнинного полигона, с определением разности высот фотографирования с помощью средств спутникового позиционирования,
- 4) разработать технологию спутниковых наблюдений при калибровке снимков на равнинном испытательном полигоне,
- 5) разработать технологию для внедрения в производство способа полной калибровки снимков

Научная новизна заключается в разработке

- методики калибровки малоформатных цифровых фотокамер, основанной на двухъярусном фотографировании плоского тест-объекта, что позволяет оперативно выполнять калибровку и обновлять калибровочные данные,
- способа полной калибровки снимков по равнинному полигону, с использованием средств спутникового позиционирования для определения разности высот фотографирования,
- технологии спутниковых наблюдений для калибровки снимков по равнинному испытательному полигону, включающей установление местной системы координат, выполнение синхронных спутниковых наблюдений во время съемки полигона

Положения, выносимые на защиту:

- методика калибровки малоформатных цифровых фотокамер, основанная на двухъярусном фотографировании плоского тест-объекта,
- способ полной калибровки снимков по равнинному полигону, с использованием средств спутникового позиционирования для определения разности высот фотографирования,
- технология спутниковых наблюдений, обеспечивающая калибровку снимков на равнинном испытательном полигоне,
- технология калибровки снимков по равнинному испытательному полигону

Практическая ценность работы заключается в том, что созданные методики позволяют выполнять исследования аэрофотосъемочной аппаратуры без отвлечения техники от производственного процесса. Полевая калибровка производится в условиях, приближенных к реальным условиям съемки. Таким образом осуществляется учет внешних факторов, влияющих на достоверность и точность результатов калибровки. Методика калибровки на равнинном полигоне позволяет калибровать камеры любых форматов с любыми фокусными расстояниями. Важной особенностью предложенных способов калибровки является их доступность для широкого круга пользователей, оперативность получения калибровочных данных и невысокая стоимость работ.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены на основе аналитической фотogramметрии с использованием теории вероятностей и математической статистики. Основными экспериментальными методами иссле-

дования служили методы математического моделирования и опытно-производственные работы на реальных объектах

Реализация работы В результате теоретических и экспериментальных исследований создана методика, позволяющая рассчитать параметры тест-объектов и калибровочных полигонов, предвычислить точность результатов калибровки Разработана программа научных исследований, принятая к внедрению в ФГУП «Госземкадастръемка» – ВИСХАГИ Создан калибровочный полигон на территории Омского аэроклуба РОСТО, подготовлено программное обеспечение, выполнены экспериментальные работы.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены на ЛП Международной научно-технической конференции «Современные проблемы геодезии и оптики», СГГА, международных научных конгрессах «Гео-Сибирь», СГГА (2005–2007), научных конференциях профессорско-преподавательского состава СибАДИ (2004–2005), научных конференциях профессорско-преподавательского состава ОмГАУ (2004–2005); научно-производственной конференции «Кадастр объектов недвижимости Современные технологии сбора, обработки и предоставления геоинформации» (2005).

Публикации. Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 8 научных работах (из них 7 – в соавторстве) Одна статья опубликована в журнале «Геодезия и картография», входящем в список рецензируемых научных журналов ВАК

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы Работа изложена на 176 страницах (из них 55 – приложения), содержит 20 таблиц, 17 рисунков Список литературы включает 100 наименований, в том числе 11 – на иностранных языках

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Идея способа, разработанного и исследованного в диссертации, принадлежит профессору Малявскому Б К и заключается в съемке плоского тест-объекта с двух высот фотографирования с фиксацией разности высот фотографирования с помощью отчетного приспособления. В способе предусмотрено раздельное определение элементов внутреннего ориентирования и параметров фотограмметрической дисторсии На первом этапе определяется фокусное расстояние камеры Для этого задается положение главной точки снимка, которую обычно совмещают с центральной точкой снимка Для определения фокусного расстояния используются отрезки, симметричные относительно точки нулевых искажений Как известно, отрезки, симметричные относительно точки нулевых искажений, не искажаются под влиянием углов наклона Фокусное расстояние камеры вычисляется по известной формуле

$$f = \frac{\Delta H}{\Delta m}, \quad (1)$$

где ΔH – разность высот фотографирования,

Δm – разность масштабов

Затем определяются параметры фотограмметрической дисторсии. Для этого решаются обратные фотограмметрические засечки, с учетом найденного фокусного расстояния снимка

$$\left. \begin{aligned} -f_k \frac{a_1(X_g - X_s) + b_1(Y_g - Y_s) + c_1(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (x - x_0) &= 0 \\ -f_k \frac{a_2(X_g - X_s) + b_2(Y_g - Y_s) + c_2(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (y - y_0) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где X_g, Y_g, Z_g – координаты опорных точек на местности,

X_s, Y_s, Z_s – координаты центра фотографирования,

x, y – координаты опорных точек на снимке,

f_k, x_0, y_0 – элементы внутреннего ориентирования

Неизвестными в этих выражениях являются элементы внешнего ориентирования снимка. Для их определения задаются приближенные значения элементов внешнего ориентирования (ЭВО), а выражения приводятся к линейному виду. В результате получается система линейных уравнений относительно поправок к приближенным значениям ЭВО, которая решается методом приближений по способу наименьших квадратов.

Далее вычисляются координаты опорных точек на снимках. Разности вычисленных и измеренных координат точек тест-объекта для идентичных зон на паре снимков несут в себе информацию об остаточных ошибках, отклоняющих реальный снимок от центральной проекции объекта. По результатам многократного фотографирования вычисляются средние значения расхождений координат опорных точек в каждой выбранной зоне снимка. Эти расхождения рассматриваются как результат суммарного систематического влияния дисторсии и неизвестных координат главной точки снимка.

Преимущество способа заключается в том, что разность высот фотографирования зафиксировать проще, чем координаты центра фотографирования. Для этого достаточно непосредственно измерить разность высот фотографирования по условно ориентированной шкале. Разность масштабов просто определяется по отрезкам, расположенным симметрично относительно начала координат на снимке.

В процессе исследования в представленный прототип были внесены следующие дополнения:

- Для более полного учета геометрических условий калибровки снимков уравнения коллинеарности составляются одновременно для обоих снимков, с учетом дополнительного уравнения, связывающего измеренную разность высот фотографирования с разностью вычисленных аппликат центров проекции.

$$Z_s - Z_s' - \Delta H = 0, \quad (3)$$

где ΔH – разность высот фотографирования

- Разработана методика выбора параметров фотографирования
- Выполнено обоснование выбора отрезков для определения фокусного расстояния

- Определены погрешности способа

В результате исследований установлено

1 На точность определения фокусного расстояния существенное влияние оказывает асимметрия отрезков относительно точки нулевых искажений. Теоретические расчеты показывают, что для малоформатной цифровой камеры допустимая асимметрия составляет 0,8 мм. При неизвестном положении точки нулевых искажений соблюдение такого допуска практически невозможно.

2 Определение фокусного расстояния точнее выполняется по отрезкам, составленным из накрестлежащих квазиопорных точек, которые представляют собой координаты центра тяжести опорных точек в каждой координатной четверти снимка.

3 По вычисленным элементам внутреннего ориентирования определяются элементы внешнего ориентирования, и выполняется трансформирование координат квазиопорных точек. Уточнение фокусного расстояния производится по трансформированным координатам квазиопорных точек.

4 Дополнительное уравнение, связывающее измеренную разность высот фотографирования с разностью вычисленных аппликат центров проекции, необходимо вводить в общую систему уравнений коллинеарности при определении элементов внешнего ориентирования с учетом весового коэффициента.

5 Для определения погрешности способа выведены формулы оценки точности определения фокусного расстояния в зависимости от ошибок определения разности высот фотографирования и разности масштабов.

$$m_f^2 = \frac{\Delta M^2 \cdot m_{\Delta H}^2 + \Delta H^2 \cdot m_{\Delta M}^2}{\Delta M^4}, \quad (4)$$

$$m_M^2 = \frac{b^2 \cdot m_B^2 + B^2 \cdot m_b^2}{b^4}, \quad (5)$$

$$m_{\Delta M} = m_M \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

На основании этих формул выполнен расчет ожидаемой ошибки фокусного расстояния в зависимости от отношения высот фотографирования используемых снимков. Результаты расчетов для малоформатной цифровой камеры показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение погрешности определения фокусного расстояния в зависимости от отношения высот фотографирования

Отношение высот фотографирования	Ошибка определения фокусного расстояния (мм)
1 1	0 036
1 2	0 018
1 3	0 012
1 4	0 009
1 5	0 007
2 0	0 003

Повышение точности определения фокусного расстояния в зависимости от изменения разности высот фотографирования объясняется уменьшением относительной ошибки разности высот. Из формулы следует прямая зависимость точности фокусного расстояния от относительной ошибки разности высот фотографирования. Формулы не учитывают погрешности идентификации точек на разномасштабных снимках

Для реализации усовершенствованного способа лабораторной калибровки была составлена исследовательская программа в среде программирования Delphi-7. Разработана имитационная модель, соответствующая калибровке малоформатной цифровой камеры на лабораторной установке.

Для исследования были приняты модели фотоснимков с фокусными расстояниями 8 и 10 мм. Отношения высот фотографирования мелкомасштабного и крупномасштабного снимков составляли 1,5 и 2. Высоты фотографирования выбирались с таким расчетом, чтобы они превышали гиперфокальные расстояния для заданных фокусных расстояний при допустимом кружке нерезкости, равном 0,02 мм. Значения случайных ошибок вводились по нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным 0, и со среднеквадратическим отклонением, равным 0,01мм в масштабе снимка. Систематические ошибки вводились по радиальному закону

$$\Delta_r = c_1 r + c_2 r^3, \quad (7)$$

где c_1 , c_2 – коэффициенты полинома,

r – удаление произвольной точки снимка от главной точки,

Δ_r – радиальное смещение точки

Коэффициенты c_1 и c_2 выбирались с таким расчетом, чтобы ошибки на краю снимка достигали 0,1 мм, что соответствует изменению отношения систематической ошибки к случайной – 10 1

В программе предусмотрена многократная реализация определения фокусного расстояния с введением случайных и систематических ошибок в каждой реализации. Оценка точности выполнена по отклонениям среднего значения фокусного расстояния от теоретического значения. Исследовались варианты спо-

соба, использующие для формирования отрезков как произвольные опорные точки, так и квазиопорные точки, без трансформирования и с трансформированием координат. В таблице 2 приведены результаты вычислений с предварительным трансформированием координат точек снимков.

Таблица 2 – Погрешности определения фокусного расстояния в различных комбинациях параметров

Погрешности определения фокусного расстояния				
Отношения высот фотографирования	Без влияния дисторсии		С преобладающим влиянием дисторсии (10 : 1)	
	Фокусное расстояние 8 мм			
	Трансформ. координаты	Трансформ. квазиточки	Трансформ. координаты	Трансформ. квазиточки
	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)
1,5	0,0005	0,0013	0,0048	0,0047
2,0	0,0006	0,0013	0,0063	0,0034
Фокусное расстояние 10 мм				
1,5	0,0006	0,0014	0,0065	0,0066
2,0	0,0013	0,0006	0,0065	0,0044

Анализ полученных результатов показал повышение точности определения фокусного расстояния по квазиопорным точкам. Такие закономерности объясняются тем, что при калибровке по квазиопорным точкам используются все опорные точки. Преимущество вычисления фокусного расстояния по квазиопорным точкам особенно заметно при преобладающем влиянии систематических ошибок. Кроме того, установлено, что трансформирование в процессе калибровки снимков приводит к значительному повышению точности определения фокусного расстояния.

Для калибровки малоформатных цифровых фотокамер разработана лабораторная установка, обеспечивающая оперативное обновление параметров внутреннего ориентирования камеры в процессе её эксплуатации (рисунок 1).

Установка представляет собой механизм подъема малоформатной цифровой фотокамеры на базе фотоувеличителя «Беларусь». Длина хода подъемного механизма – 2 м. Тест-объект может располагаться как на фото-столике, так и на полу, что дает дополнительную возможность регулирования высоты фотографирова-

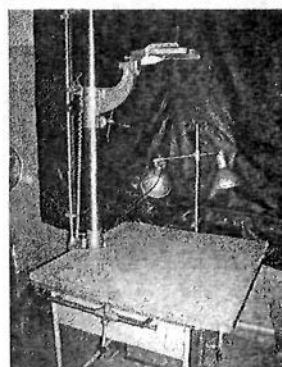


Рисунок 1 – Лабораторная установка для калибровки малоформатных камер

ния. Таким образом, с помощью такой установки можно производить съемку плоского тест-объекта с высоты от 0,5 до 3,5 м. Тест-объектом служит мраморная плита с нанесенной высокоточной сеткой крестов. Размер плиты – 1 100 × 900 мм. Сетка крестов координирована с точностью 0,1 мм. Кресты на сетке расположены с шагом 50 мм. Для эксперимента использовались две тестовые сетки, толщина линий крестов первой – 0,1 мм, а второй – 0,3 мм. В качестве отсчетного устройства, фиксирующего разность высот фотографирования, используется линейка с разметкой штрихов через 0,2 мм. Фиксирование фотоаппарата на подъемном механизме осуществляется с помощью винта, аналогичного винту штатива фотоаппарата. Универсальность такого крепления позволяет использовать установку для калибровки любых моделей малоформатных цифровых фотокамер.

Практическое исследование методики лабораторной калибровки малоформатных камер выполнялось на примере цифровой фотокамеры Sony DSC-P10 с фокусным расстоянием около 8 мм и размером кадра 2 500 × 2 000 пикселей. Фотографирование тест-объекта выполнено с двух высот при минимальной трансфокации. Мелкомасштабный снимок получен с высоты 1 650 мм. Разность высот фотографирования составила 550 мм. Измерение и вычислительная обработка выполнялись по специально разработанной программе. В результате вычислены фокусное расстояние и остаточные расхождения координат опорных точек на снимке. С помощью программы ScanCorrect, являющейся модулем ЦФС «Фотомод», по остаточным расхождениям на опорных точках построено поле искажений и трансформированы снимки. График искажений представлен на рисунке 2.

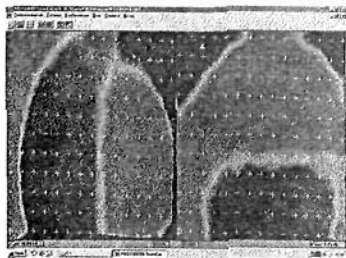


Рисунок 2 – Остаточные искажения по полю снимка

Эффективность калибровки оценивалась по результатам фотограмметрических построений, которые выполнялись без учета результатов калибровки по приближенным элементам внутреннего ориентирования и с учетом калибровочных данных. Обработка выполнялась в программном комплексе «Роскад». В результате построения фототриангуляционной сети и монтажа ортофотопланов масштаба 1 : 2 000 погрешность положения контурной точки уменьшилась с 2,5 до 0,7 м.

Представленный способ не является строгим, так как координаты главной точки снимка явным образом не определяются. Их влияние учитывается совместно с влиянием фотограмметрической дисторсии. Кроме того, фокусное расстояние и параметры дисторсии определяются раздельно.

Достоинствами способа являются простота его реализации, оперативность получения калибровочных данных, достаточная точность калибровки

для большинства практических задач, решаемых с помощью бытовых малоформатных камер

В результате исследований построена установка и разработана методика для лабораторной калибровки малоформатных цифровых фотокамер В Западно-Сибирском филиале ФГУП «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ проводятся исследования фотокамер, которые используются в составе беспилотного аэрофотосъемочного комплекса «Эльф» Этот комплекс хорошо зарекомендовал себя при съемке небольших населенных пунктов Читинской, Омской областей, Хабаровского края для создания ортофотопланов

Для калибровки широкоформатных камер актуальными остаются вопросы совершенствования способов полевой калибровки на испытательных полигонах Идея способа калибровки широкоформатных камер на равнинном испытательном полигоне во многом похожа на рассмотренный выше способ лабораторной калибровки Современные средства спутникового позиционирования позволяют с высокой точностью определить как разности высот фотографирования, так и координаты центров фотографирования. Если известны разности высот, то по аналогии с лабораторным способом для определения элементов внутреннего ориентирования требуется пара разномасштабных снимков.

В теоретической части работы получены формулы предвычисления требуемой точности определения разности высот фотографирования.

$$m_{\Delta H}^2 = f^2 \frac{b^2 m_B^2 + B^2 m_b^2}{b^4} \sqrt{2} \quad (8)$$

Результаты расчетов по формуле (8) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Точность определения разности высот фотографирования

Фокусное расстояние (мм)	Точность определения разности высот фотографирования (м)
88	0 09
100	0 10
150	0 15
300	0 30

Современные средства спутникового позиционирования позволяют получить разности высот фотографирования с требуемой точностью

Алгоритм решения задачи калибровки заключается в совместном решении уравнений коллинеарности, составленных для пары разномасштабных снимков, в сочетании с уравнением равенства разности высот фотографирования относительно элементов внутреннего и внешнего ориентирования

$$\left. \begin{aligned}
 & -f_k \frac{a_1(X_g - X_s) + b_1(Y_g - Y_s) + c_1(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (x - x_0) = 0 \\
 & -f_k \frac{a_2(X_g - X_s) + b_2(Y_g - Y_s) + c_2(Z_g - Z_s)}{a_3(X_g - X_s) + b_3(Y_g - Y_s) + c_3(Z_g - Z_s)} - (y - y_0) = 0 \\
 & -f_k \frac{a'_1(X_g - X'_s) + b'_1(Y_g - Y'_s) + c'_1(Z_g - Z'_s)}{a'_3(X_g - X'_s) + b'_3(Y_g - Y'_s) + c'_3(Z_g - Z'_s)} - (x' - x_0) = 0 \\
 & -f_k \frac{a'_2(X_g - X'_s) + b'_2(Y_g - Y'_s) + c'_2(Z_g - Z'_s)}{a'_3(X_g - X'_s) + b'_3(Y_g - Y'_s) + c'_3(Z_g - Z'_s)} - (y' - y_0) = 0 \\
 & Z_s - Z'_s - \Delta H = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где X_g, Y_g, Z_g – координаты опорных точек на местности,

$X_s, Y_s, Z_s, X'_s, Y'_s, Z'_s$ – координаты центров фографирования,

x, y, x', y' – координаты опорных точек на снимках,

f_k, x_0, y_0 – элементы внутреннего ориентирования снимка,

ΔH – разность высот фографирования, полученная по показаниям GPS

Необходимо отметить, что использование двух разномасштабных снимков и измеренной разности высот фографирования снимает лишь одно противоречие, возникающее при калибровке снимков на равнинном полигоне. Эти данные позволяют устранить пропорциональность коэффициентов лишь при поправках к фокусному расстоянию и аппликате центра проекции. В условиях равнинного рельефа при минимальных углах наклона также возникает пропорциональность коэффициентов при плановых координатах центров фографирования и соответственных координатах главной точки снимка. Это противоречие в рамках представленного способа не снимается. Для обеспечения калибровки приходится переходить к нестроганому решению, которое заключается в исключении координат главной точки из состава неизвестных в выражениях (9), а влияние этих элементов придется учитывать совместно с дисторсией на втором этапе решения задачи.

Влияние фототриграмметрической дисторсии и неизвестных координат главной точки снимка определяется по разностям вычисленных и измеренных координат точек на снимке с учетом уравненных элементов пары разномасштабных снимков и фокусного расстояния. Параметры систематических искажений могут быть представлены в виде таблицы остаточных расхождений координат или коэффициентами степенного полинома.

$$\left. \begin{aligned} x' &= \bar{x} + K_1 \bar{x}r^2 + K_2 \bar{x}r^4 + K_3 \bar{x}r^6 + P_1(2\bar{x}^2 + r^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} \\ y' &= \bar{y} + K_1 \bar{y}r^2 + K_2 \bar{y}r^4 + K_3 \bar{y}r^6 + P_2(2\bar{y}^2 + r^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где x', y' – исправленные координаты точек снимка,

\bar{x}, \bar{y} – измеренные координаты точек снимка,

K_1, K_2, K_3 – коэффициенты радиальной дисторсии,

P_1, P_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии

Нестрогость представленного способа заключается в том, что элементы внутреннего ориентирования и параметры фотограмметрической дисторсии определяются раздельно, а влияние неизвестных координат главной точки учитывается совместно с влиянием дисторсии. Известно, что эти величины взаимосвязаны и должны определяться совместно. В условиях равнинного полигона это невозможно.

Раздельное решение упрощает вычислительную обработку, так как позволяет обрабатывать неограниченное количество пар разномасштабных снимков, накапливать данные об остаточных расхождениях координат опорных точек на снимках и совместно обрабатывать их с целью получения достоверной модели систематических искажений за дисторсию и неизвестные координаты главной точки снимка. Представляется, что данный способ позволит калибровать снимки с точностью, достаточной для практического применения.

Исследования алгоритма были выполнены с помощью имитационной модели аэрофотосъемки, которая может быть выполнена с помощью аэрофотоаппарата RC-30. Формат кадра 230×230 мм. Исследования проводились для объективов с фокусными расстояниями 88, 150 и 300 мм, входящих в комплекс RC-30. Моделировалась съемка с двух высот.

Для достоверного моделирования тест-объект был создан в виде набора точек равнинной местности. Координаты точек были определены по карте масштаба 1 : 10 000 с высотой сечения рельефа 2,5 м. Для эксперимента были выбраны 16 опорных и 9 контрольных точек на территории примерно в 5 км^2 . При моделировании создавались снимки масштаба 1 : 12 000.

Модель предусматривала расчет положения опорных точек на двух снимках. При моделировании было предусмотрено изменение отношения высот фотографирования крупномасштабного и мелкомасштабного снимков. Значения коэффициента увеличения высоты фотографирования составляли 1,5 и 2,0.

Высота фотографирования выбиралась в соответствии с гиперфокальным расстоянием для каждого фокусного расстояния при допустимом кружке нерезкости, равном 0,02 мм.

Условия эксперимента

В процессе эксперимента устанавливалась зависимость точности определения фокусного расстояния при изменении отношения случайных и систематических ошибок, вводимых в имитационные модели, а также влияние погрешностей определения разности высот фотографирования и отношения высот фотографирования. Значения случайных ошибок вводились по нормальному зако-

ну распределения с математическим ожиданием, равным 0, и со среднеквадратическим отклонением, равным 0,01 мм. Систематические ошибки моделировались с помощью формулы (7). Коэффициенты выбирались с таким расчетом, чтобы смещения на краю снимка достигали 0,1 мм, что соответствует изменению отношения систематической ошибки к случайной – 10 : 1.

Фокусное расстояние определялось по моделям с введенными случайными и систематическими ошибками. Разность высот считалась известной, так как в условиях калибровки она определялась по координатам центров фотографирования, полученным по GPS-технологии. Погрешность определения высот фотографирования изменялась от 0,1 до 1,0 м.

Оценка точности полученного решения производилась по отклонениям вычисленного значения фокусного расстояния от среднего фокусного расстояния, полученного в 100 реализациях. Средняя квадратическая ошибка определения фокусного расстояния вычислялась по формуле

$$m_f = \sqrt{\frac{\sum \delta_f^2}{n-1}} \quad (11)$$

Результаты оценки точности приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка точности определения фокусного расстояния

Отношение высот фотографирования	Ошибка разности высот (м)	Фокусное расстояние 150 мм	
		Ошибки определения фокусного расстояния (мм)	
		Отношение систематических ошибок к случайным	
		1 : 1	10 : 1
		m_{f_1}	$m_{f_{10}}$
1,5	0,1	0,047	0,043
	0,3	0,071	0,076
	0,5	0,113	0,121
	1,0	0,228	0,238
2,0	0,1	0,036	0,034
	0,3	0,044	0,045
	0,5	0,061	0,064
	1,0	0,124	0,123

Суммарное влияние дисторсии и неизвестных координат главной точки учитывается в соответствии с формулами (10). Модель строится по средним значениям остаточных расхождений координат опорных точек на снимке, полученным в нескольких реализациях. Поправки в опорные и контрольные точки рассчитываются в соответствии с параметрами построенной модели. По исправленным координатам опорных точек с учетом вычисленного среднего значения фокусного расстояния решаются обратные засечки. Находятся элементы внешнего ориентирования. Вновь вычисляются остаточные расхождения коор-

динат опорных точек на снимке Результаты оценки точности по остаточным смещениям координат опорных точек до и после учета суммарных систематических ошибок приведены в таблице 5

Таблица 5 – Оценка точности калибровки снимков по опорным точкам

Ошибка высоты фотографирования (м)	Остаточные смещения координат опорных точек на снимке (мм)			
	соотношение систематических и случайных ошибок			
	1 1		10 1	
	до учета дисторсии	после учета дисторсии	до учета дисторсии	после учета дисторсии
0,1	0,013	0,013	0,034	0,017
0,3	0,013	0,013	0,034	0,019
0,5	0,013	0,012	0,034	0,017
1,0	0,013	0,013	0,034	0,018

Координаты контрольных точек также исправлены по модели суммарных систематических искажений, и вычислены остаточные смещения опорных точек на местности Результаты оценки точности по остаточным смещениям координат контрольных точек до и после учета дисторсии приведены в таблице 6

Таблица 6 – Оценка точности калибровки снимков по контрольным точкам

Ошибка высоты фотографирования (м)	Остаточные смещения координат опорных точек на снимке (мм)			
	Соотношение систематических и случайных ошибок			
	1 1		10 1	
	до учета дисторсии	после учета дисторсии	до учета дисторсии	после учета дисторсии
0,1	0,013	0,013	0,037	0,017
0,3	0,014	0,014	0,037	0,017
0,5	0,014	0,014	0,037	0,017
1,0	0,015	0,014	0,037	0,017

Независимое определение разности высот фотографирования и исключение из состава неизвестных координат главной точки позволяет получить решение задачи калибровки снимков на равнинном полигоне Результаты контроля по остаточным смещениям опорных и контрольных точек позволяют судить об эффективности учета суммарных систематических искажений при преимущественном влиянии систематических ошибок. Все это позволяет рекомендовать данный способ для производственных испытаний Для надежного определения параметров калибровки рекомендуется совместная обработка 2–3 пар снимков

В качестве возможной альтернативы способу калибровки, основанному на двухъярусном фотографировании, в работе проанализирован способ калиб-

ровки с использованием одиночных снимков с известными координатами центров фотографирования. Задача калибровки по одиночным снимкам с известными координатами центров фотографирования сводится к совместному определению угловых элементов внешнего ориентирования и элементов внутреннего ориентирования в процессе решения обратной фотограмметрической засечки. Теоретические исследования приводят к выводу, что точность определения фокусного расстояния в этом случае в основном зависит от относительной ошибки определения высоты фотографирования. Следующая формула позволяет определить необходимую высоту фотографирования с учетом заданных погрешностей определения высоты фотографирования и фиксированной точности фокусного расстояния

$$H = f \frac{m_H}{m_f \sqrt{n}} \quad (12)$$

Формула (12) может привести к парадоксальному выводу о том, что чем больше высота фотографирования, тем точнее определяется фокусное расстояние. Это объясняется тем, что ошибка определения высоты фотографирования с помощью спутниковых приемников мало зависит от абсолютного значения высоты фотографирования. В целом точность определения фокусного расстояния зависит в основном от точности определения координат центра фотографирования и погрешности идентификации опорных точек на снимках.

Экспериментальные исследования способа выполнялись по той же имитационной модели, что и способа, основанного на двухъярусном фотографировании местности. Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования по одиночному снимку

Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования						
δ/M m_H	1			10		
	m_{x_0} (мм)	m_{y_0} (мм)	m_f (мм)	m_{x_0} (мм)	m_{y_0} (мм)	m_f (мм)
<i>$f = 88$ мм</i>						
0,2	0,0084	0,0080	0,0027	0,0092	0,0110	0,0363
0,5	0,0093	0,0085	0,0061	0,0099	0,0099	0,0331
<i>$f = 100$ мм</i>						
0,2	0,0100	0,0102	0,0038	0,0120	0,0129	0,0397
0,5	0,0111	0,0106	0,0033	0,0110	0,0137	0,0405
<i>$f = 150$ мм</i>						
0,2	0,0217	0,0225	0,0051	0,0244	0,0249	0,0580
0,5	0,0242	0,0200	0,0102	0,0252	0,0248	0,0583
<i>$f = 300$ мм</i>						
0,2	0,0886	0,0709	0,0105	0,0869	0,0965	0,1132
0,5	0,0811	0,0806	0,0127	0,1017	0,0987	0,1073

Дисторсия учитывается в соответствии с формулами (10) аналогично тому, как это делается в способе, основанном на двухъярусном фотографировании. Результаты оценки точности по остаточным смещениям координат опорных точек до и после учета дисторсии приведены в таблице 8

Таблица 8 – Оценка точности калибровки снимков по остаточным смещениям координат опорных точек на снимке

Ошибка высоты фотографирования (м)	Остаточные смещения координат опорных точек на снимке (мм)			
	Соотношение систематических и случайных ошибок			
	1 · 1		10 · 1	
	до учета дисторсии	после учета дисторсии	до учета дисторсии	после учета дисторсии
0,1	0,009	0,012	0,025	0,017
0,3	0,009	0,012	0,025	0,017
0,5	0,009	0,013	0,025	0,017
1,0	0,009	0,013	0,025	0,017

Координаты контрольных точек также исправлены по модели дисторсии, и вычислены остаточные смещения опорных точек на местности. Результаты оценки точности по остаточным смещениям координат контрольных точек до и после учета дисторсии приведены в таблице 9

Таблица 9 – Оценка точности калибровки снимков по остаточным смещениям контрольных точек на местности

Ошибка высоты фотографирования (м)	Остаточные смещения координат опорных точек на снимке (мм)			
	Соотношение систематических и случайных ошибок			
	1 · 1		10 · 1	
	до учета дисторсии	после учета дисторсии	до учета дисторсии	после учета дисторсии
0,1	0,014	0,014	0,037	0,017
0,3	0,014	0,014	0,037	0,017
0,5	0,014	0,014	0,037	0,017
1,0	0,014	0,014	0,037	0,016

Независимое определение координат центра фотографирования и исключение их из состава неизвестных позволяет получить решение задачи калибровки снимков на равнинном полигоне. Результаты контроля по остаточным смещениям опорных и контрольных точек позволяют судить об эффективности учета искажений за дисторсию при преимущественном влиянии систематических ошибок этого рода. Все это позволяет рекомендовать данный способ для

производственных испытаний как наиболее простой и достаточно эффективный. Для надежного определения параметров калибровки рекомендуется совместная обработка 5–6 снимков.

Таким образом, основными способами калибровки на равнинном испытательном полигоне являются способы, основанные на использовании одиночных снимков с зафиксированными в полете координатами центров фотографирования, и способы, основанные на двухъярусном фотографировании местности с определением разности высот фотографирования с помощью спутниковых систем позиционирования.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в представленной работе, легли в основу разработки программы научных исследований, принятой в ФГУП «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ в 2005 г. Программой предусмотрено создание калибровочного полигона на базе Западно-Сибирского филиала. В соответствии с методикой, предложенной в данной работе, рассчитаны параметры и создан калибровочный полигон. Полигон расположен в Марьяновском районе Омской области на аэродроме аэроклуба РОСТО. Полигон построен в виде 441 точки в узлах регулярной сетки. Размер полигона – 1 000 × 1 000 м, шаг сетки – 50 м. Превышение точек – около 2 м. Каждая точка закреплена металлическим штырем длиной 1 м и круглой бетонной площадкой диаметром 25 см (рисунок 3).



Рисунок 3 – Закрепление точек полигона

полигона из 5 точек, 4 из которых расположены в углах полигона. Пятой опорной точкой является центральная точка полигона. Дополнительно определялись координаты центральной точки в каждой четверти полигона. Координаты опорных точек определены от базовых станций с помощью односторонних GPS-приемников в режиме «статика». Программа GPS-наблюдений предусматривала создание замкнутых фигур. Такие наблюдения обеспечивают миллиметровую точность определения координат опорных точек полигона относительно координат базовых станций. Схема сети представлена на рисунке 4.

В качестве исходных пунктов для определения координат точек полигона использованы две базовые GPS-станции. Базовые станции вставлены в сеть опорных пунктов ГГС, созданную вокруг города Омска. Таким образом, координаты базовых станций определены в системе координат 1995 г. Точность определения координат базовых станций – 10 мм в плане и 30 мм по высоте.

От двух базовых станций полигона создана сеть опорных точек

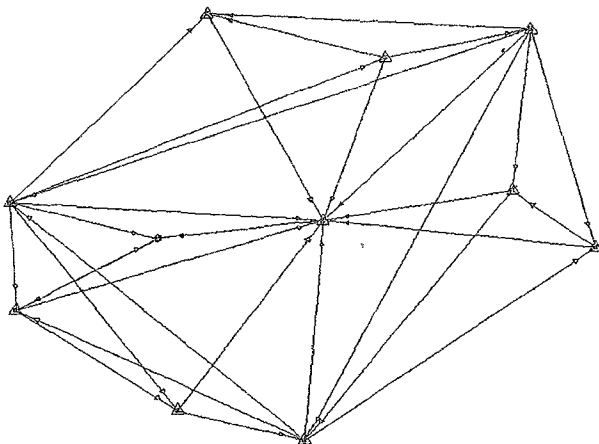


Рисунок 4 – Схема опорной сети полигона

Координаты остальных точек полигона были определены с помощью электронного тахеометра полярным способом. Съёмка производилась из центральной точки каждой четверти полигона. Контрольные измерения проводились тахеометром из точек, расположенных вблизи центральной точки каждой четверти полигона. Оценка точности производилась по разностям полученных координат на соответственных точках полигона.

Для исключения влияния ошибок, связанных с искажениями, вносимыми системой координат 1995 г., на краю зоны была создана местная система координат, основанная на эллипсоиде WGS-84 и приведенная на плоскость в проекции Гаусса – Крюгера. При этом осевой меридиан проходит через центр полигона с точностью до 1". Схема размещения точек полигона представлена на рисунке 5.

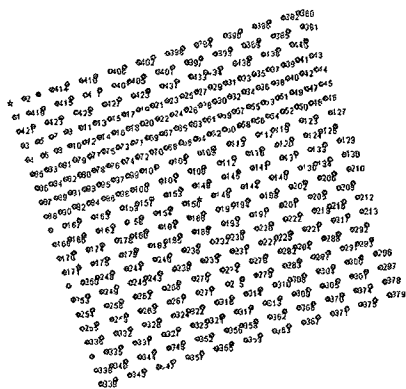


Рисунок 5 – Схема размещения точек полигона

Оценка точности координат точек полигона производилась по разностям двойных равноточных измерений, выполненных из центральной и боковой точек полигона. Средняя квадратичная погрешность вычислена по формуле (13)

$$m = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{2n}} \quad (13)$$

Средняя квадратичная ошибка взаимного положения точек полигона в плане составила 20 мм, а по высоте – 50 мм. Полигон должен обеспечить калибровку снимков при съемке в масштабе 1 : 5 000 – 1 : 25 000.

Экономические расчеты показывают, что создание, содержание и эксплуатация полигона на равнинной местности обходится значительно дешевле, чем калибровка аппаратуры за границей. Полевая калибровка выполняется без отвлечения аппаратуры от производственного процесса. Калибровочные параметры, полученные таким образом, соответствуют реальным условиям эксплуатации камеры.

Основные результаты исследований, изложенных в диссертационной работе, следующие:

1 Выполнен анализ существующих способов калибровки снимков. В результате установлено, что существующие способы полевой калибровки не позволяют эффективно выполнять полную калибровку снимков по равнинному полигону, а создание полигона в горной местности связано с большими затратами. В настоящее время в России нет действующих полигонов для калибровки снимков. Таким образом, требуется методика калибровки снимков по плоскому испытательному полигону, который возможно создать сравнительно недорого и в доступном месте.

2 Предложена методика лабораторной калибровки малоформатных цифровых фотокамер, основанная на двухъярусном фотографировании плоских тест-объектов с определением разности высот с помощью отсчетного приспособления, позволяющая оперативно обновлять данные калибровки реальных камер. Исследования методики показали, что бытовые цифровые камеры, калиброванные по этой методике, могут использоваться для создания ортофотопланов масштабов 1 : 2 000 – 1 : 1 000.

3 Разработан способ полевой калибровки снимков по равнинному полигону, предусматривающий фотографирование равнинного полигона с двух высот и использование разности высот фотографирования при калибровке камер. Способ пригоден для калибровки снимков с любыми фокусными расстояниями, полученными из независимых определений координат центров фотографирования с помощью средств спутникового позиционирования.

4 Разработана технология спутниковых наблюдений при калибровке снимков на равнинном испытательном полигоне, предусматривающая установление местной системы координат и выполнение синхронных спутниковых наблюдений как при создании полигона (определении координат точек полигона), так и при аэрофотосъемке местности для калибровки камер.

5 В результате теоретических и экспериментальных исследований получены рекомендации, которые были использованы при создании калибровочного полигона на территории Омской области. В настоящее время это действующий полигон, на котором маркированы и закреплены пункты, заложены базовые станции, построена высокоточная геодезическая сеть. Полигон может быть использован для калибровки аэрофотоаппаратов любых типов и цифровых съемочных камер.

6 Методики лабораторной и полевой калибровки снимков внедрены в ФГУП «Госземкадастрсъёмка» – ВИСХАГИ Западно-Сибирский филиал и используются для калибровки цифровых фотокамер.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу инструктивного документа «Программа калибровочных испытаний», который принят в ФГУП «Госземкадастрсъёмка» – ВИСХАГИ.

Основные положения диссертации отражены в публикациях и доложены на региональных и международных конференциях.

В диссертации изложена научно обоснованная технологическая разработка, имеющая существенное значение для топографо-геодезического производства и экономики страны.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1 Быков, В Л. Обработка изображений с использованием цифровых фотограмметрических систем / В Л. Быков, М А. Куприянов // Современные проблемы геодезии и оптики сб материалов ЛIII международной научно-техн. конф, посвящ 70-летию СГГА (11–21 марта 2003 г) Ч II / СГГА – Новосибирск, 2003 – С 78–79

2 Быков, В Л. Разработка и исследование алгоритма построения свободной проективной модели местности по четырем перекрывающимся фотоснимкам / В Л. Быков, А А. Макаров // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов – Омск, 2004 – Вып 1, ч 1 – С 220–225

3 Быков, В Л. Технология передачи координат пунктов ГГС на вспомогательные пункты с помощью спутниковых приемников и оценка точности полученных результатов/ В Л. Быков, А В. Войтенко, А А. Макаров // Кадастр объектов недвижимости. Современные технологии сбора, обработки и представления геоинформации материалы научно-производственного совещания – Омск, 2005 – С 25–29

4 Калибровка снимков по плоскому испытательному полигону / Б К. Маявский и др // Сборник материалов международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006» Т. 3 «Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фоторадиометрия», ч 1 – Новосибирск, 2006 – С 68 – 73

5 Быков, В Л. Результаты калибровки снимков на испытательном полигоне / В Л. Быков, Л В. Быко, А П. Макаров // Сборник материалов III Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007» Т 3 «Дистанционные методы

зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск СГГА, 2007 – С. 60–63

6 Быков, В Л Калибровка цифровых камер по снимкам тест-объекта / В Л Быков, Л В. Быков // Сборник материалов одиннадцатой научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов ФГОУ ВПО ОмГАУ – Омск, 2005 – С 16–19

7 Быков, В Л Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования/ В Л. Быков // Геодезия и картография – 2007 – № 9. – С 39–43

8 Способ фотограмметрической калибровки снимков/ Б К Малявский и др Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2006101424/28(001532) от 29.03 2007, отдел № 28 ФГУ ФИПС.