



С.И. Герасимов, В.И. Костин

**«Калибровка неметрических цифровых фото- и
видеокамер для фотограмметрических измерений»**

Курс «Оптика и фотоэлектронные приборы»

Саров 2015

УДК 535.2, 535.8

**«Калибровка неметрических цифровых фото- и видеокамер
для фотограмметрических измерений»**

Пособие для студентов вузов

С.И. Герасимов, В.И. Костин

Пособие предназначено для студентов и аспирантов высших учебных заведений.

Пособие состоит из 64 страниц и содержит технические и методические аспекты решения задачи метрологической аттестации (калибровки) цифровых неметрических фотокамер с целью производства высокоточных фотограмметрических измерений.

В пособии рассмотрены основные принципы цифровой фотограмметрии. Приведены характеристики современных цифровых снимков, технические средства их получения и способы фотограмметрической обработки в компьютерных системах. Дано краткое описание функционирующей технологии и метода фотограмметрической калибровки цифровых неметрических фотокамер бытового назначения, пространственного калибровочного стенда для выполнения калибровки. Рассмотрено фотограмметрическое ПО компьютерной обработки снимков калибруемой фотокамеры, функциональность применяемого ПО и результаты фотограмметрической калибровки параметров внутреннего ориентирования и дисторсии цифровой неметрической фотокамеры.

Материалы пособия входят в курс лекций, читаемых в СарФТИ НИЯУ МИФИ по дисциплине «Оптика и фотоэлектронные приборы», кафедра «Специальное приборостроение».

Рекомендовано к печати на заседании кафедры «Специальное приборостроение» СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Содержание

1 Введение	4
1.1 История развития фотограмметрии	5
2 Основные принципы цифровой фотограмметрии	7
2.1 Цифровые и аналоговые снимки, их основные характеристики и способы представления	7
2.2 Получение цифровых (растровых) изображений	12
2.3 Преобразование цифровых изображений	17
3 Измерение цифровых изображений	21
3.1 Элементы центральной проекции кадрового фотоснимка.....	21
3.2 Системы координат, применяемые при фотограмметрической обработке снимков	24
3.3 Система координат фотограмметрического сканера	25
3.4 Система координат и элементы внутреннего ориентирования снимка.....	26
3.5 Система координат пространства объекта. Элементы внешнего ориентирования снимка	29
3.6 Особенности измерения координат на цифровых снимках.....	31
4 Технические средства для цифровой фотограмметрии	37
4.1 Цифровая фотограмметрическая камера	37
4.2 Цифровые неметрические камеры	40
4.3 Адаптация цифровых камер для фотограмметрических измерений	46
5 Теория метода фотограмметрической калибровки.....	50
5.1 Математическое описание задачи калибровки	50
5.2 Определение физического размера пикселя	55
5.3 Использование процедур метода наименьших квадратов (МНК)	56
6 Фотограмметрическая калибровка.....	59
6.1 Технология фотограмметрической калибровки	59
6.2 Калибровочный стенд	60
6.3 Функциональность ПО фотограмметрической калибровки камер 62	
6.4 Результаты калибровки цифровых камер	64
Заключение	68
Список использованной литературы	69

1 Введение

По мере совершенствования боевого оснащения баллистических ракет повышаются требования к точности и надёжности получения внешнетраекторных измерений при аэробаллистической отработке перспективного боевого оснащения. Следует отметить, что в настоящее время и в ближайшей перспективе наиболее точными средствами внешнетраекторных измерений (ВТИ) являются и будут оптико-фотограмметрические средства. При этом нередко возникают обстоятельства использования для ВТИ фотоаппаратуры, не обладающей достаточными измерительными характеристиками. К такой аппаратуре относятся неметрические полу- и профессиональные бытовые фотокамеры и видеокамеры, в то время как отработка перспективных моделей боевых блоков с необходимостью требует проведения высокоточных ВТИ на участке свободного полёта моделей в каждом аэробаллистическом эксперименте. В этой связи необходимо уделять значительное внимание адаптации и метрологической аттестации (фотограмметрической калибровке) данной аппаратуры, как перспективных средств дистанционного зондирования при фотограмметрическом решении задач ВТИ.

При разработке и подготовке данного пособия не ставилась задача приведения конкретных алгоритмов, используемых цифровыми фотограмметрическими технологиями для решения различных прикладных научно-технических задач. Цель - показать основные принципы цифровой фотограмметрической обработки снимков, включая калибровку неметрических цифровых фотокамер, основные формулы фотограмметрической калибровки, приемы и средства, с помощью которых могут быть решены основные задачи цифровой фотограмметрии.

Рассмотренные в пособии материалы ориентированы на специалистов, занимающихся выполнением фотограмметрических работ, как при постановке высокоточных внешнетраекторных измерений в аэробаллистических экспериментах, так и при решении различных прикладных инженерно-технических задач.

1.1 История развития фотограмметрии

Фотограмметрия¹ - научная дисциплина, изучающая способы определения формы, размеров и пространственного положения объектов в заданной координатной системе по их фотографическим и иным изображениям. Фотограмметрия выделилась из геодезии в начале прошлого столетия благодаря применению новых начал измерительной техники, основанных на способности объектива строить изображения объектов, возможности регистрации этого изображения фотохимическими методами и измерения его с помощью оптических, механических или электронных приборов и инструментов. Начав свою историю с решения топографических задач, фотограмметрия на протяжении полутора веков развивалась, главным образом, под влиянием требований *картографии*, являющейся и в настоящее время основной отраслью науки и техники, в которой снимки используются в огромном количестве и с наибольшей полнотой.

Зарождение фотограмметрии связывается с открытием фотографии в 1839 году изобретением парижского художника Луи Жака Манде Дагера способа получения изображения на слое галоидного серебра. На возможность применения таких фотоснимков для целей топографии в 1852 году первым указал французский военный инженер Эмэ Лосседа, сконструировавший специальный прибор для получения фотоснимков (пробораз фототеодолита) и разработал приемы составления планов по наземным фотоснимкам.

Отсутствие эффективных технических средств получения фотоснимков и несовершенство применяемой в то время технологии получения светочувствительных слоев не способствовали развитию этой науки.

В России методы фотограмметрии начали применять в 1886 году при производстве изысканий для строительства железных дорог. Появление авиации, и ее практическое применение для получения фотоснимков, имело подлинно революционное значение для развития фотограмметрии. За сравнительно короткий, по историческим меркам, период усилиями крупнейших ученых - фотограмметристов были выполнены основополагающие разработки и принципы фотограмметрии, которые применяются и поныне.

¹ Термин *Photogrammetrie* является производным от греческих слов *photos* - свет, *gramma* - запись и *metreo* - измерение; дословно - измерение светозаписи. Этот термин был введен в середине XIX века.

Практическое применение методов фотограмметрии при выполнении задач как топографического, так и нетопографического (инженерного) характера опиралось на *аналоговые фотограмметрические приборы* - фототрансформаторы, стереокомпараторы, стереометры, в которых обработка фотоснимков выполнялась оптическим, механическим или оптико-механическим путем. Только с появлением микропроцессорной техники стало возможным создание *аналитических фотограмметрических приборов*. В этих приборах обработка фотоснимков выполнялась уже аналитическим путем, на основе соответствующих математических зависимостей.

Фотограмметрия синтезировала в своих методах и приборах достижения физики и химии, оптики и электроники, математики и точной механики, геодезии и картографии, авиации и космонавтики. Как следствие этого, в первой половине 1980-х годов появилась цифровая фотограмметрия, которая основывалась на обработке цифрового растрового изображения снимков, введенного в компьютер и полученного либо путем сканирования аналоговых снимков, либо непосредственно в процессе съемки.

Современные способы цифровой фотограмметрии, реализованные в компьютерных программах и базирующиеся как на фундаменте на аналитических методах, используют достижения теории компьютерного зрения и машинной графики, вычислительной геометрии и теории информации, теории вероятностей и математической статистики, и др., оставаясь при этом невидимыми для пользователя.

В настоящее время цифровая фотограмметрия утвердилась как производственная технология. Практически завершили свое техническое перевооружение производственные организации соответствующего профиля, демонстрировав дорогостоящие универсальные стереофотограмметрические приборы отечественного и зарубежного производства, заменив их цифровыми фотограмметрическими станциями и системами. Расширилась номенклатура цифровых метрических камер. Однако техническая документация на эти средства цифровой фотограмметрии не содержит описания необходимых алгоритмов фотограмметрической обработки снимков, поскольку зачастую они являются «ноу-хау» разработчиков. Данное обстоятельство и почти повсеместное отсутствие современной научной, технической и учебной литературы привело к необходимости изложения в доступной форме основных принципов цифровой фотограмметрии.

Одной из проблем цифровой фотограмметрии является проблема *фотограмметрической калибровки камер*. И если калибровка цифровых метрических камер выполняется согласно утвержденным меж-

дународным стандартам, сертификаты о калибровке унифицированы, то, что касается калибровки цифровых неметрических камер, для них в настоящее время нет установленного стандарта и каждая организация выполняет калибровку собственным способом.

2 Основные принципы цифровой фотограмметрии

2.1 Цифровые и аналоговые снимки, их основные характеристики и способы представления

В зависимости от способа получения изображений, принятой модели и структуры данных, изображения при обработке методами фотограмметрии могут быть представлены в аналоговой или цифровой форме.

Аналоговая форма представления изображения объектов используется с незапамятных времен и предполагает получение его каким-либо образом на физическом носителе - на фотопленке, бумаге, фотобумаге, и др. В отдельных случаях аналоговая форма и сегодня является основной, особенно там, где важна юридическая значимость изображения, либо если оно необходимо для использования в нестандартных условиях. Фотографируя местность, получают изображение в виде аэронегатива или обратного ему позитивного отпечатка, полученного с аэронегатива фотографическим путем. И негативное и позитивное изображения (далее - снимок) строятся по законам центрального проектирования, причем центр проекции совмещен с передней узловой точкой объектива (оптической системы, см. раздел 3.1), а картинная плоскость - с плоскостью прикладной рамки аэрофотокамеры.

Положение точек снимка определяется в системе координат oxy (рисунок 2.1) с началом в точке o пересечения главной оптической оси объектива с плоскостью прикладной рамки аэрокамеры. Направления координатных осей ox и oy задаются в процессе калибровки аэрокамеры и фиксируются на снимках четырьмя механическими или четырьмя-восьмью оптическими координатными метками.

Аналоговое изображение характеризуется форматом кадра, величиной фокусного расстояния объектива аэрофотокамеры, а также погрешностями, возникающими как при его построении с помощью объектива, так и при фиксации на светочувствительном слое. Основными из них, не без оснований, считают разрешающую способность системы объектив-негатив и величину некомпенсируемой дисторсии.

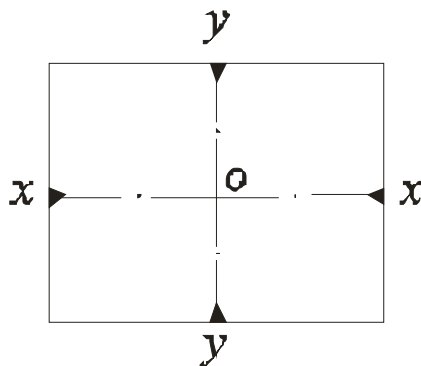


Рисунок 2.1 - Система координат снимка

Аналоговое изображение характеризуется форматом кадра, величиной фокусного расстояния объектива аэрофотокамеры, а также погрешностями, возникающими как при его построении с помощью объектива, так и при фиксации на светочувствительном слое. Основными из них, не без оснований, считают разрешающую способность системы объектив-негатив и величину некомпенсируемой дисторсии.

Современные *аналоговые* аэрофотоаппараты имеют формат кадра 23х23, 30х30 или 18х18, см. Они оснащены специальными устройствами, обеспечивающими высокую надёжность и автоматизацию производственных процессов при эксплуатации. Основные технические характеристики некоторых современных аэрофотоаппаратов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Тип АФА, страна-изготовитель	Фокусное расстояние, мм	Разрешающая способность линий, мм	Остаточная дисторсия, мкм
АФА ТЭС-10М (РФ)	100	33	10
АФА ТЭ-50 (РФ)	500	35	10
ТК-350 (РФ)	350	35-80	20
АТ-204 (РБ)	150, 300	50-100	3
RC Wild/Leica (Швейцария)	153, 305	120-107	2
АФА-41 (РФ)	100, 200	10-37	25

Цифровая форма представления изображения объектов возникла вместе с электронными вычислительными машинами и используется для отображения изображения в памяти ЭВМ и размещения на магнитных носителях. При обработке цифровое изображение может быть представлено в векторной или растровой форме.

Векторная форма цифрового изображения предполагает представление его с помощью набора примитивов и их комбинаций - точек, векторов, граней, ребер и т. п. Эта форма цифрового представления в фотограмметрии не является основной, а используется для представления конечных результатов. Она широко используется в цифровой картографии и предполагает, что положение точек изображения задано в некоторой координатной системе, выбираемой пользователем в зависимости от характера решаемых задач.

Растровая форма цифрового изображения - растровая модель данных - применяется для представления непрерывных изображений с помощью элементов упорядоченного массива цифровых сигналов, интерпретирующих яркости соответствующих им элементов исходного объекта или изображения. При визуализации этот массив преобразуется в двумерную матрицу, соответствующую плоскости исходного изображения, а элементы массива - в квадратные ячейки одинакового размера, являющиеся наименьшими адресуемыми элементами. Каждый такой элемент, называемый пикселом (пикселем), соответствует определенному участку исходного объекта (изображения) и характеризуется цветом, яркостью и иными параметрами. Пиксель цифрового изображения является оптически однородным, и внутри его отдельные элементы изображения не выделяются. Экспериментально установлено, что для воспроизведения на цифровом снимке компактного объекта его размер должен быть не менее четырех пикселей.

В фотограмметрии *растровая форма* цифрового изображения формируется непосредственно в процессе съемки с помощью цифровой камеры, либо путем сканирования соответствующего аналогового изображения (негатива, реже - диапозитива).

Пиксели (квадратные ячейки одинакового размера), формирующие плоскость исходного изображения, размещаются построчно слева направо и сверху вниз. Доступ к какому-либо из них осуществляется по номеру соответствующего столбца и строки. Эти величины и используются в качестве координат пикселя в системе с началом в левом верхнем углу и осями, совмещенными с его внешними границами (рисунок 2.2).

Плоскую прямоугольную систему координат с осями x_p , y_p , на-

зывают пиксельной системой координат в отличие от плоской прямоугольной системы координат снимка x, y .

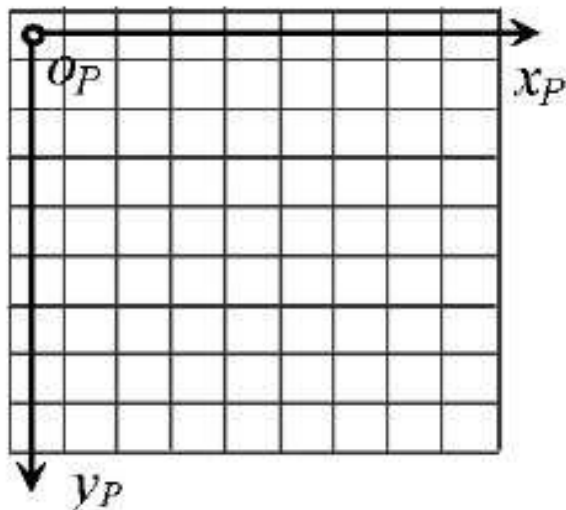


Рисунок 2.2 - Система координат растра

Начало O_P пиксельной системой координат совмещено с первым элементом первой строки изображения, ось абсцисс x_P - с первой строкой, а ось ординат y_P - с первым столбцом. Никакой информации о размещении матрицы в пространстве в растровом файле, за редким исключением, нет.

Растровые координаты пикселя относятся к его центру, хотя с помощью математического аппарата они могут быть найдены с точностью до доли пикселя (субпиксельная точность). В этих случаях для доступа к пикселю используется целая часть его растровых координат.

При фотограмметрической обработке цифрового изображения необходимо знать физические координаты избранной точки в линейной форме (в мм или мкм). Расчет таких координат выполняется по растровым координатам и известному размеру пикселя.

Растровое изображение характеризует его геометрическое и радиометрическое разрешение.

Геометрическое разрешение цифрового изображения определяет линейный размер пиксела и представляется либо его линейной величиной (в метрах, если размер отнесен к пространству объектов, или в мкм, если речь идет о снимке), или числом точек на дюйм (*dpi*).

Величина геометрического разрешения определяет качество изображения, точность вычислительной обработки, возможности увеличения и др. В частности, в соответствии с требованиями действующих инструкций по проведению фотограмметрических работ в фототопографии его размер определяют в зависимости от назначения цифровых снимков с учетом нескольких критериев:

- требуемой точности определения плановых и высотных координат точек фотограмметрического сгущения;
- сохранения разрешающей способности исходного снимка (изображения);
- обеспечения требуемого разрешения графических фотопланов (ортофотопланов).

Так, например, если цифровые снимки создаются для фотограмметрического сгущения в плане и по высоте изготовления ортофотопланов и при этом нужно сохранить разрешающую способность исходных материалов, то сканировать нужно с разрешением 10 мкм, или $25600/10 = 2600 \text{ dpi}$.

Следует заметить, что теоретически возможная разрешающая способность аэронегативов и объективов достигает 350-400 линий на миллиметр (порядка 1,5-2,0 мкм), что соответствует суммарной разрешающей способности изображения порядка 4-5 мкм. Практически она в два - три и более раза ниже (см. таблицу 2.1).

Радиометрическая характеристика определяет число уровней квантования яркости исходного изображения (бинарное, многоградиентное), фотометрическое содержание элемента изображения (одноцветное, полутоновое, цветное, спектральнозональное) и обозначаются числом бит на пиксель. Для обозначения плотности (степени потемнения) элемента изображения весь диапазон полутонов от белого до черного делится на 2^n частей (2, 4, 8, ..., 256, ...), называемых *уровнями квантования*.

При формировании бинарного (черно-белого) изображения используется всего два уровня квантования, и в нем представлены только белый и черный цвета. В полутоновом изображении используется 256 уровней квантования, для представления которых в описании элемента изображения резервируется 8 бит (1 байт). Черному цвету все-

гда соответствует уровень 0, а белому - уровень 1 бинарного изображения и уровень 255 полутонового.

Цветное изображение формируется с использованием той или иной палитры (RGB, CMYK, и др.), в которых цвета и их оттенки создаются путем смешивания трех основных цветов в пропорциях, соответствующих уровням их квантования.

Палитра RGB - наиболее распространенная, предполагающая использование трех основных цветов: красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue). Так, сочетание красного цвета с зеленым одинаковой интенсивности дает желтый цвет; зеленого с синим - голубой; синего с красным - оранжевый, а всех трех цветов - белый.

Палитра CMYK обеспечивает более качественную передачу оттенков при смешивании четырех цветов: голубого (Cyan), сиреневого (Magenta), желтого (Yellow) и черного (Black). Палитра CMYK находит широкое применение в издательских системах.

В связи с этим для представления одного элемента бинарного изображения необходим 1 бит; полутонового с 256 уровнями квантования - 8 бит (1 байт), а цветного с тем же числом уровней квантования по каждому каналу - 24 бита (3 байта) при использовании палитры RGB или 32 бита (4 байта) палитры CMYK.

2.2 Получение цифровых (растровых) изображений

В фотограмметрии цифровые изображения в растровой форме получают с помощью цифровых камер (сенсоров), непосредственно в процессе съемки, либо путем сканирования аналоговых фотоснимков (негативов). В обоих случаях цифровое изображение формируется с помощью либо фотодиодов, либо приемников с зарядовой связью (ПЗС) в форме ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки с примерно одинаковыми техническими возможностями. Применение ПЗС-матрицы предполагает формирование всего кадра изображения по схеме, аналогичной фотокамере, где в фокальной плоскости вместо фотопленки располагается ПЗС-матрица. Применение ПЗС-линейки предполагает сканирование местности или изображения параллельными маршрутами с шагом, равным размеру элемента геометрического разрешения.

Сканирование фотоснимков выполняется с помощью оптико-электронных приборов-сканеров различных конструкций, из которых в топографо-геодезическом производстве применяются только фотограмметрические сканеры планшетного (рисунок 2.3) или барабанного типа.



Рисунок 2.3 - Фотограмметрический сканер «Дельта» (Украина)

Фотограмметрические сканеры характеризуются высоким геометрическим разрешением (менее 10 мкм) и высокой геометрической точностью, которая определяется величиной ошибки сканирования и повторяемостью (изменением ошибки в десяти сканированиях). Технические характеристики некоторых наиболее распространенных фотограмметрических сканеров приведены в таблице 2.2; наличие 24-х уровней квантования обеспечивает получение цветного изображения (3 канала по 8 бит).

Таблица 2.2

Наименование/ характеристики	Характеристика фотограмметрического сканера			
	ОАО «Пеленг», РБ	«Дель- та», Ук- раина	СКФ- 11, Рос- сия	DSW500 LH System
Размер снимка, мм	300x400	300x450	300x300	260x260
Размер пикселя, мкм	5	8 - 128	8	9
Ошибка сканиро- вания, мкм	± 2	± 3	± 3	± 2
Число уровней квантования, бит	3x8 = 24	3x8 = 24	3x8 = 24	1x10

Важнейшим процессом формирования цифрового изображения является эталонирование сканера, особенно в случае, если он не является фотограмметрическим. Сущность эталонирования заключается в сканировании контрольной сетки с нанесенными на нее горизонтальными и вертикальными штрихами, расстояния между которыми известны с точностью 1-2 мкм. На полученном изображении измеряют «пиксельные» координаты x_p, y_p крестов контрольной сетки в системе $o_px_p y_p$ (рисунок 2.2), преобразуют их в линейную меру с учетом заданного геометрического разрешения и сравнивают полученные значения с точными координатами, отсчитанными по контрольной сетке. По найденным разностям координат соответствующих точек строят поле искажений, характеризующее все виды геометрических искажений, вносимых сканером в той или иной точке поля сканирования.

В последующем полученные этим сканером изображения могут быть исправлены в соответствии с параметрами поля искажений. Как свидетельствуют публикации, таким способом искажения фотограмметрического сканера можно уменьшить до 1 мкм.

Цифровые съемочные системы (сенсоры) появились только на рубеже веков. К этому времени было достигнуто сопоставимое с фотоснимками геометрическое разрешение (5-6 мкм), появились средства хранения громадных объемов информации (порядка 1 Гб на каждый снимок), создана аппаратура стабилизации съемочной камеры в полете и высокоточного определения координат центров фотографирования.

В настоящее время успешно эксплуатируются несколько цифровых камер, в частности: ADS40 (фирм LH-System, Швейцария), DMC2001 (фирма ZH Imaging (США, Германия), HRSC (центр космических исследований Германии DLR), Российские цифровые съемочные комплексы ЦТК-140 и ЦТК-70 и другие, обеспечивающие возможность получения изображений как в видимой части спектра, так и в инфракрасном диапазоне. Некоторые характеристики этих камер приведены в таблице 2.3.

С точки зрения фотограмметрической обработки цифровых изображений, получаемых с помощью цифровых съемочных систем на ПЗС-линейках, важны два существенных обстоятельства:

1. Изображения формируются в результате сканирования местности в направлении, перпендикулярном направлению полета (рисунков 2.4, а). Поэтому результатом съемки являются не однокадровые снимки, а полосы изображений.

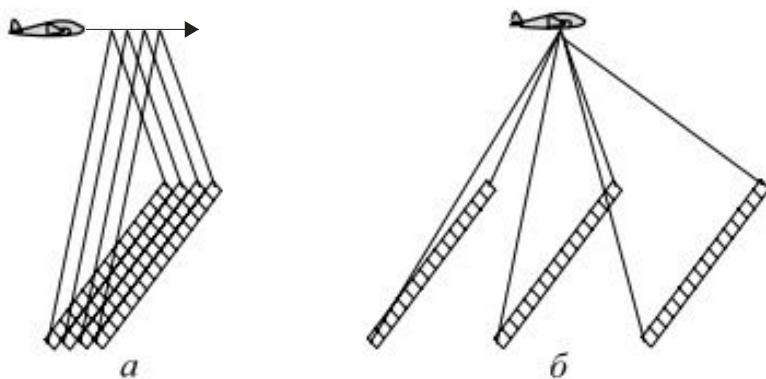


Рисунок 2.4 - Сканирование местности с записью результатов:
а – на одну, б – три ПЗС-линейки

Таблица 2.3

Наименование/ характеристики	Характеристика камеры				
	ADS40	DMC	HRSC	ЦТК-140	ЦТК-70
Фокусное расстояние, мм	62,5	1120	47÷175	140	70
Размер пикселя, мкм	66,5	66	6÷7	7	7
	66	112			
Число спектральных каналов			5	1	4
Радиометрическое разрешение, бит	88	88	8÷12	8	10/8
Светочувствительный ПЗС-элемент: линейка (Л), матрица (М)	Л	М	Л	Л	Л

2. Геометрия сканерных снимков не соответствует, центральной проекции, поскольку каждая их строка формируется из собственного центра. Фотограмметрической обработке таких изображений предшествует преобразование их в форму, соответствующую законам построения изображений при центральном проектировании.

Невозможность создания стереопар, и отсутствие продольных перекрытий сканерных снимков существенно снижают точность их фотограмметрической обработки, поэтому современные съемочные системы предусматривают одновременное применение нескольких ПЗС-линеек, каждая из которых формирует изображение по определенному направлению.

Так, цифровая система ASD40 имеет в фокальной плоскости три ПЗС-линейки (рисунок 2.4, б), одна из которых обеспечивает съемку полосы по направлению «вперед», вторая - полосы в направлении «вниз», а третья - полосы «назад». Совместная обработка трех полос изображений позволяет получить продольные перекрытия и выполнить стереоскопические наблюдения.

Цифровая съемочная система HRSC (High Resolution Stereo Camera) с помощью девяти линеек ПЗС в фокальной плоскости объек-

тива выполняет съемку одновременно девяти перекрывающихся полюсов, пять из которых используется для стереообработки, а остальные четыре обеспечивают получение изображения в том или ином оптическом диапазоне.

2.3 Преобразование цифровых изображений

В ходе фотограмметрической обработки снимков возникает необходимость различного рода их преобразований, связанных как с улучшением читаемости, так и с изменением размеров изображения (например, при уменьшении или увеличении снимков в процессе их обработки). В первом случае говорят о фотометрической коррекции (оптических преобразованиях) цифрового изображения, а во втором – об изменении его геометрического разрешения, или о геометрических преобразованиях.

1. *Фотометрическая коррекция* изображения, или оптические его преобразования, основаны на использовании связи между его компонентами, описываемой уравнением

$$p_i = a p_{i,исх} + b, \quad (2.1)$$

где $p_{i,исх}$, p_i – оптические плотности элемента изображения до и после фотометрической коррекции; a – функция, определяющая соотношение между оптическими плотностями исходного и преобразованного изображений; b – параметр яркости.

Преобразования, описываемые уравнением (2.1), можно представить в виде графика (рисунка 2.5), отражающего связь оптических плотностей элементов изображения до их коррекции (вертикальная ось) и после коррекции (горизонтальная ось).

Фотометрическая коррекция выполняется путем изменения яркости изображения, его контрастности, либо изменением характера соотношений между оптическими плотностями до и после их преобразования.

Изменение яркости выполняется путем уменьшения или увеличения параметра b каждого пикселя на одну и ту же величину, это приводит к тому, что все элементы корректируемого изображения становятся более светлыми или более темными. Изменение яркости группирует плотности к какому-либо одному (светлому или темному) краю спектра. На графике (рисунок 2.5) это иллюстрируется смещением прямой 1 (или кривой 2) вдоль горизонтальной оси.

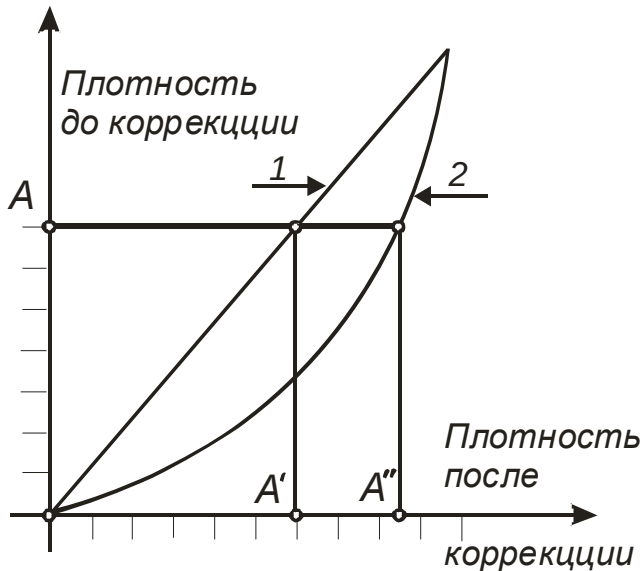


Рисунок 2.5 - График фотометрической коррекции изображения

Изменение контрастности изображения выполняется с целью изменения различий между плотностями смежных элементов и улучшения таким образом читаемости границы между ними. Увеличение контрастности изображения выполняется следующим образом. Если оптическая плотность $\rho_{\text{исх}}$ некоторого элемента превышает среднее значение, то она увеличивается пропорционально уровню квантования, а если она менее среднего, то уменьшается. При этом значения плотностей пикселей как бы смещаются к краям спектра: темные тона становятся еще темнее, светлые - светлее, некоторые их значения исчезают, но границы между элементами изображения становятся более четкими. При уменьшении контрастности большие плотности уменьшаются, а малые - увеличиваются; при этом плотности группируются вблизи центра. Чрезмерное увеличение контрастности преобразует полутоновое изображение в бинарное, а чрезмерное уменьшение - ведет к его исчезновению.

На графике (рисунка 2.5) рассмотренные преобразования соответствуют вращению прямой 1 (кривой 2) вокруг центральной точки.

Гамма-коррекция (тональная коррекция) изображения выполняется с целью увеличения или уменьшения его детальности, что достигается изменением передаточной функции a уравнения (2.1), определяющей характер преобразования. На графике (рисунка 2.5) гамма-коррекция соответствует изменению кривизны и общего наклона линии 1 (или 2).

При равномерной передаче оптической плотности (прямая 1 под углом 45° к координатным осям) их значения, соответствующие точкам A и A' , одинаковы. Изменим передаточную функцию a уравнения (2.1) так, чтобы ей соответствовало уравнение кривой 2. Теперь плотности исходного изображения (точка A) будет соответствовать плотность скорректированного изображения A'' , причем, $A \neq A''$.

Заметим, что неправильное использование гамма-коррекции может привести к уменьшению числа полутонов и преобладанию областей одного тона.

При обработке цветных изображений можно выполнить не только изменение яркости, контрастности или гамма-коррекцию, но и, меняя соотношение цветов, получить нужные оттенки.

2. *Геометрические преобразования* растрового изображения изменяют его геометрическое разрешение и корректируют радиометрические характеристики. Необходимость таких преобразований возникает, например, при трансформировании цифрового снимка по элементам внешнего ориентирования, в процессе которого изменяется масштаб изображения и положение его элементов относительно координатных осей. Сходная по характеру задача возникает при внутреннем ориентировании цифрового изображения.

В общем случае геометрические преобразования можно условно разделить на простые, требующие изменения только геометрического разрешения, и сложные, в результате которых выполняется изменение масштаба и поворот изображения.

Простые преобразования выполняются при изменении масштаба изображения путем соответствующего изменения геометрического разрешения, когда каждому пикселю исходного изображения соответствует пиксель преобразованного с тем же или иным геометрическим разрешением. При этом формируется новая матрица, элементам которой присваивается радиометрическое разрешение соответствующего ему исходного изображения (рисунок 2.6).

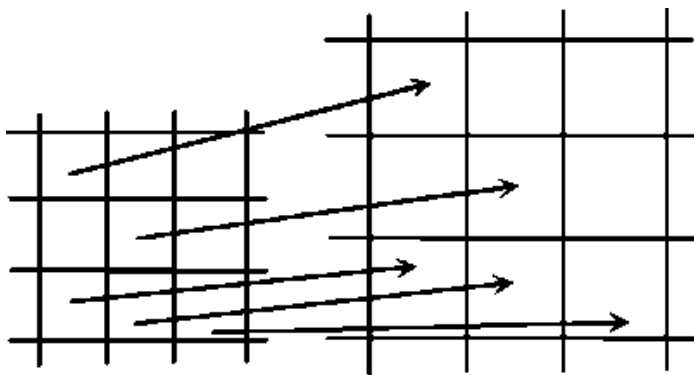


Рисунок 2.6 - Простые геометрические преобразования

Сложные преобразования выполняются при трансформировании изображения, когда коэффициент увеличения различных его частей неодинаков, или когда выполняется разворот на некоторый угол. Первая ситуация возникает при восстановлении, например, сетки квадратов по ее перспективе, а вторая - при внутреннем ориентировании снимка. В обоих случаях (рисунок 2.7) каждому пикселю формируемого изображения соответствует несколько пикселей или их частей исходного изображения, или наоборот.

Сущность выполняемых при этом геометрических и оптических преобразований показана рисунке 2.7, где элементы строк и столбцов исходного изображения обозначены цифрами 1, 2, 3 и буквами a , b , c . Соответствующие элементы формируемого изображения обозначены - цифрами 1', 2', 3' и буквами a' , b' , c' . Совместим левые нижние углы изображений и положим, что элементу 1а соответствуют фрагменты четырех элементов исходного раstra: 1а (45 %), 1b (35 %), 2а (15 %) и 2b (5 %). В этом случае оптическая плотность p' формируемого элемента 1'а' зависит от оптических плотностей p_{1a} , p_{1b} , p_{2a} , p_{2b} элементов 1а, 1b, 2а и 2b, причем:

$$p' = 0,45p_{1a} + 0,35p_{1b} + 0,15p_{2a} + 0,05p_{2b}.$$

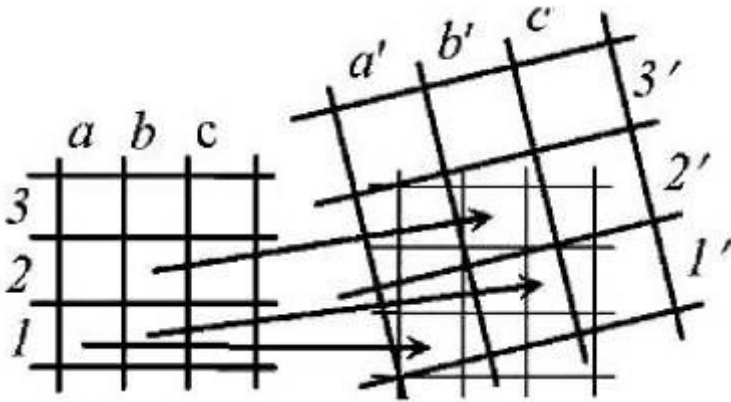


Рисунок 2.7 - Сложные геометрические преобразования

Координаты элемента формируемого изображения находятся по координатам соответствующего ему элемента исходного изображения, подставляя их в нужную формулу преобразования - трансформирования координат точек наклонного снимка, связи координат точек снимка и местности, внутреннего ориентирования снимка, или иную.

3 Измерение цифровых изображений

3.1 Основные элементы центральной проекции кадрового фотоснимка

Кадровый фотоснимок представляет собой изображение объекта на плоскости в центральной перспективной проекции (рисунок 3.1). Согласно законам построения изображения в этой проекции оптические лучи, идущие от точек объекта (точки O , K , M) сходятся в передней узловой точке S_{Π} , расположенной в передней главной плоскости НП объектива на главном оптическом луче $OS_{\Pi}S_3O$. Точка S_{Π} является центром проекции в пространстве объекта.

Оптические лучи выходят из задней узловой точки S_3 объектива, расположенной на главном оптическом луче $OS_{\Pi}S_3O$ в задней главной плоскости H_3 объектива. Точка S_3 является центром проекции в пространстве изображения. Выйдя из точки S_3 оптические лучи строят изображение точек (точки o , k , m) объекта на фокальной поверхности объектива Φ , которая представляет собой

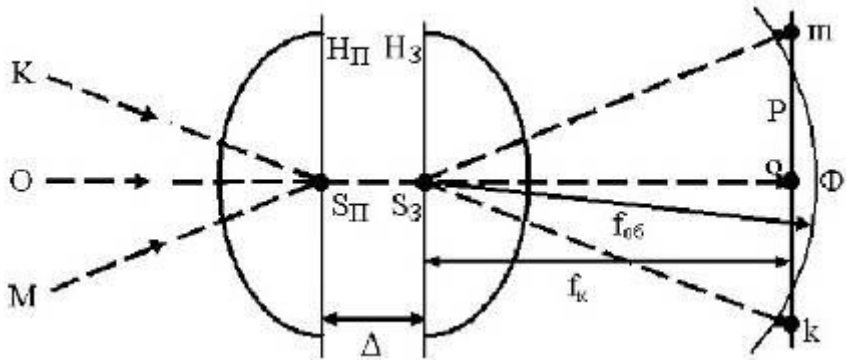


Рисунок 3.1 - Построения изображения в центральной проекции сферическую поверхность.

расстояние от точки S_3 до фокальной поверхности называется *фокусным расстоянием объектива* $f_{об}$. В пределах фокальной поверхности устанавливается плоскость P (плоскость снимка), в качестве которой может быть фотоплёнка или матрица, фиксирующие изображение объекта. Плоскость P отстоит от точки S_3 на расстоянии, являющемся фокусным расстоянием фотокамеры $f_κ$.

Центры проекций $S_Π$ и S_3 у объективов измерительных фотокамер отстоят друг от друга на расстоянии Δ , которое не учитывают при съёмке объектов, расположенных на большом расстоянии от фотокамеры, и обязательно учитывают при съёмке объектов с близких расстояний.

Основные точки и линии центральной перспективной проекции, используемые далее в тексте, показаны на рисунке 3.2:

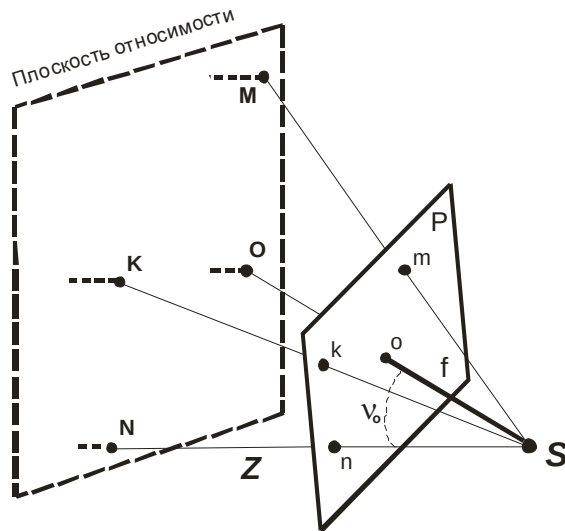


Рисунок 3.2 - Центральная перспективная проекция снимка P - плоскость наклонного снимка.

S – центр проекции. Из него получен наклонный снимок P .

SO - главный оптический луч наклонного снимка - перпендикуляр к плоскости снимка P .

o - главная точка наклонного снимка - точка пересечения плоскости снимка главным оптическим лучом S_o .

$So - f$ - фокусное расстояние снимка или фотокамеры f_k .

SN - горизонтальная линия, перпендикуляр к плоскости относимости.

$oSn - v_0$ - угол наклона снимка, определяет отклонение главного оптического луча SO от горизонтальной линии SN .

$Z = SN$ - отстояние фотографирования.

n - точка пересечения снимка горизонтальной линией SN

3.2 Системы координат, применяемые при фотограмметрической обработке снимков

При фотограмметрической обработке снимков используются следующие основные системы координат:

Система координат пространства объекта OXYZ, применяется для определения положения точек фотографирования и точек снимаемого объекта.

Фотограмметрические (пространственные, прямоугольные):

- *система координат снимка $o'xyz$* (аналогового и цифрового), применяется для измерений плоских координат (x, y) точек на снимке;

- *система пространственных координат $Sxyz$* (вспомогательная, координаты точки m снимка в этой системе равны x, y, f), применяется для перехода от плоских координат снимка к пространственным.

Фотограмметрическая обработка снимков, заключается в преобразовании координат из одной системы в другую. Для последующего описания процессов перехода из одной системы координат в другую задаётся положение каждой из указанных систем и их взаимное положение. В большинстве случаев используются приведённые в справочниках по математике формулы преобразования пространственных координат.

На рисунке 3.3 приведена технологическая схема преобразований координат при обработке одиночного снимка.

Так, координаты точек одиночного аналогового снимка вначале переводят из системы координат $c'x'y'z'$ сканера в систему координат $o'xyz$ снимка, а затем во вторую (вспомогательную) систему координат с началом в центре проекции S . Если снимок получен с помощью цифровой фотокамеры, то сразу выполняется переход из системы координат $c'x'y'z'$ матрицы ПЗС в систему координат $Sxyz$ для одиночного снимка.

Координаты точек снимка можно преобразовать сразу в систему координат OXYZ объекта, если известны с достаточной точностью элементы внешнего ориентирования снимков, определяющие их положения в пространстве координат объекта.

Если элементы внешнего ориентирования одиночного снимка неизвестны или известны с недостаточной точностью, то с помощью опорных точек, координаты которых известны в системе координат пространства объекта, вычисляют элементы внешнего ориентирования снимка, а затем осуществляют переход в систему координат OXYZ пространства объекта.



Рисунок 3.3 - Схема преобразований координат при обработке одиночного снимка

3.3 Система координат фотограмметрического сканера

Для того чтобы аналоговый снимок можно было обработать с помощью компьютера, его нужно преобразовать на фотограмметрическом сканере в цифровую форму. Система координат сканера $c'x'y'$ (рисунок 3.4) задаётся направляющей (y') и перемещающейся по ней кареткой x' , расположенной под углом 90° к направляющей.

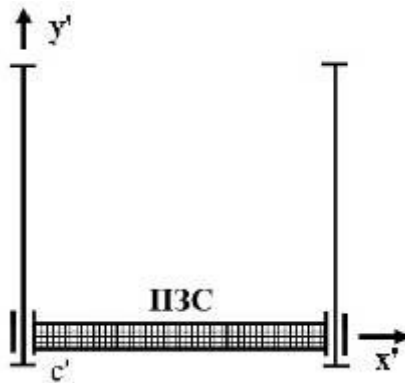


Рисунок 3.4

На каретке закреплена светочувствительная линейка ПЗС (прибор с зарядовой связью). ПЗС состоит из квадратов-пикселей, содержащих информацию об оптической плотности и цвете (три основных цвета: красный, зелёный, синий) данного участка изображения. Изменение оптической плотности от белого до чёрного цвета задаётся цифрами от 0 до 256, 512 или 1024. Также задаются три основных цвета.

Чтобы устранить геометрические искажения, вносимые фотограмметрическим сканером, его тщательно калибруют и юстируют перед выполнением сканирования фотофильма. Для фотограмметрического сканера точность позиционирования каждого пикселя изображения должна быть не больше 2-3 мкм, а минимальный размер пикселя оптического разрешения равен 5-8 мкм. Для сравнения скажем, что точность позиционирования пикселя для обычного планшетного полиграфического сканера в десятки раз хуже.

Калибровку сканера периодически выполняют по контрольной сетке, представляющей собой стеклянную пластинку с выгравированными на ней взаимно перпендикулярными линиями, отстоящими друг от друга на расстоянии 10 или 5 мм. Точность нанесения линий равна 1 мкм. Инструментальные погрешности (разномасштабность, неперпендикулярность и др.) записываются в память сканера и при сканировании снимков их используют для введения в координаты точек снимков.

При сканировании аналогового изображения следует правильно выбрать размер пикселя сканирования, и он должен соответствовать разрешающей способности снимка. Если интегральная разрешающая способность фотоснимка (плёнка + объектив) $R = 50$ лин/мм, размер пикселя должен быть $\Delta = 1/2R = 0,01$ мм. Сканирование с меньшим разрешением нерационально, поскольку это никак не повышает точность измерений, а лишь только увеличивает размер снимка и приводит к расходу ресурсов памяти и времени на обработку.

В результате сканирования получается цифровой снимок, координаты точек которого записаны в системе координат сканера. При дальнейшей обработке их преобразуют в систему координат снимка.

3.4 Система координат-снимка и элементы внутреннего ориентирования

Началом пространственной прямоугольной системы координат *кадрового* снимка является центр проекции S (см. рисунок 3.1 и 3.2). Измерения координат точек объекта на кадровом снимке выполняются в системе координат снимка, которая задается либо координатными метками на аналоговом снимке, либо системой координат матрицы

цифровой фотокамеры.

На аналоговом снимке (рисунок 3.5) четыре координатные метки располагаются либо посередине каждой стороны снимка, либо в его углах. Координатные метки имеют вид креста или крестообразных штрихов с точкой посередине. Ось x снимка проходит через метки 1 и 2 и направлена вдоль полета носителя. Началом системы координат служит точка o' пересечения оси x с линией, соединяющей метки 3 и 4. Ось y проходит через точку o' перпендикулярно к оси x , а ось z - через точку o' перпендикулярно к плоскости xu . Положительное направление оси x задают от метки 1 к метке 2, оси y - от метки 4 к метке 3, а оси z - вверх от плоскости xu .

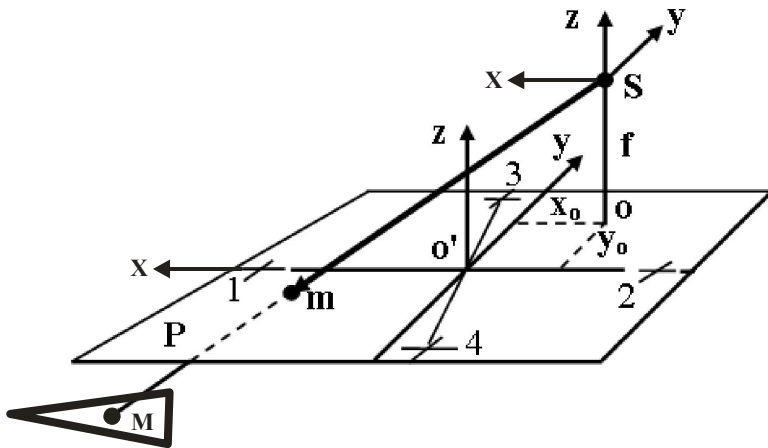


Рисунок 3.5 - Аналоговый (кадровый) снимок

Для *цифрового* изображения метки не нужны, поскольку положение каждого пикселя определено в ортогональной системе координат матрицы $o'xyz$ (рисунок 3.6).

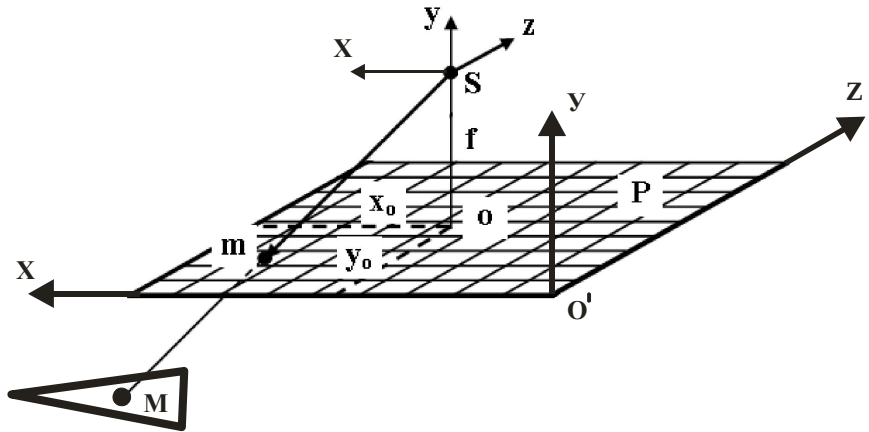


Рисунок 3.6 - Цифровой снимок

Две системы координат снимка $Sxyz$ и $o'xyz$ параллельны и имеют параметры смещения относительно друг друга: x_0, y_0, f , где x_0 и y_0 координаты главной точки o в системе координат $o'xyz$, а f - фокусное расстояние фотокамеры. Параметры x_0, y_0, f называют элементами внутреннего ориентирования снимка.

Элементы внутреннего ориентирования определяют в процессе калибровки фотокамеры. Также в процессе калибровки определяют параметры дисторсии фотокамеры, которая характеризует нарушение ортоскопии при построении изображения. Дисторсия может быть задана в виде поправок или коэффициентов полинома.

Поскольку элементы внутреннего ориентирования определяют в системе координат снимка $o'xyz$ положение центра проекции S , т. е. положение точки через которую проходят все проектирующие лучи, то говорят, что элементы внутреннего ориентирования позволяют восстановить связку проектирующих лучей. Поскольку дисторсия описывает свойства проектирующих лучей, то и её также относят к элементам внутреннего ориентирования фотокамеры.

3.5 Система координат пространства объекта. Элементы внешнего ориентирования снимка

Положение снимка в пространстве в момент фотографирования определяют *элементы внешнего ориентирования*. Под понятием снимков надо подразумевать связку проектирующих лучей, восстановленную на этапе внутреннего ориентирования, когда были заданы элементы внутреннего ориентирования снимка x_0, y_0, f и определено положение центра проекции S относительно системы координат снимка P . Если рассмотреть связку проектирующих лучей как «твердое тело», то положение твердого тела в пространстве в декартовой системе координат определяют шесть параметров. Поскольку связка построена в системе координат снимка, то эти параметры, суть параметры связи двух пространственных прямоугольных систем координат. Таким образом, для ориентирования системы координат снимка относительно системы координат пространства объекта необходимо знать шесть элементов внешнего ориентирования снимка.

На рисунке 3.7 показана система координат объекта $OXYZ$, система координат снимка $oxyz$. Вектор R_s определяет положение центра проекции S в системе координат объекта. Вектор R_m определяет положение точки объекта M в системе координат объекта. Вектор R определяет положение точки объекта M относительно системы координат снимка. Вектор r определяет в системе координат снимка положение на снимке изображения m точки объекта M .

Элементами внешнего ориентирования снимка являются координаты X_s, Y_s, Z_s центра проекции S в системе координат объекта $OXYZ$ и углы поворота ν, φ, γ системы координат снимка $oxyz$ относительно системы координат объекта $OXYZ$. Угол поворота ν называется наклоном (тангаж для самолета) и определяет вращение вокруг оси ox , угол поворота φ называется разворотом (рысканье для самолета) и определяет вращение вокруг оси oy , угол поворота γ называется креном и определяет вращение вокруг оси oz .

Координаты точек объекта и их изображений на снимке связаны векторным уравнением, которое называется *уравнением коллинеарности*:

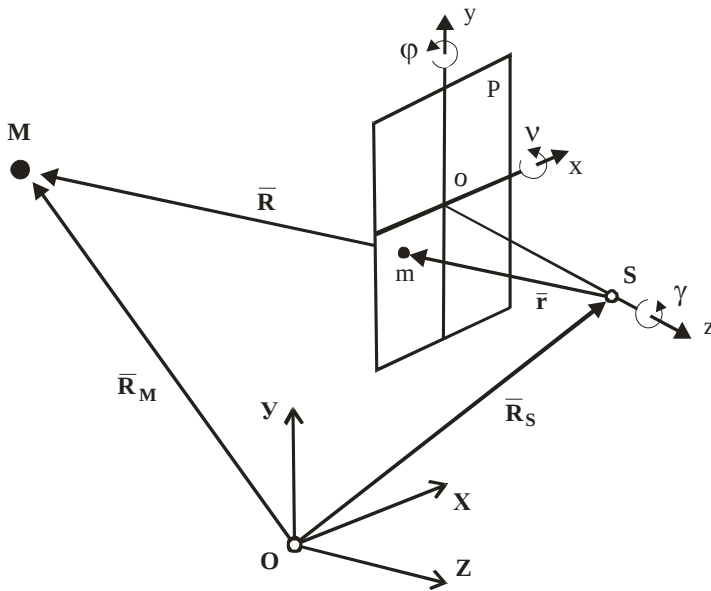


Рисунок 3.7

$$\bar{R}_M = \bar{R} + \bar{R}_S, \quad (3.1)$$

или в координатной форме:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'} \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'} \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$

где: X, Y, Z - координаты точки M в системе координат объекта;
 X_S, Y_S, Z_S - координаты центра проекции S в системе координат объекта;

X', Y', Z' - координаты вектора r в системе координат объекта, которые определяются по формуле:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ f \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

где A - матрица преобразования координат (матрица направляющих косинусов c_{ij}), элементы c_{ij} которой определяются по значениям угловых элементов внешнего ориентирования снимка ν, φ, γ .

С учетом последнего выражения уравнение коллинеарности примет вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{c_{11}(X - X_0) + c_{12}(Y - Y_0) - c_{13}f}{c_{31}(X - X_0) + c_{32}(Y - Y_0) - c_{33}f} \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{c_{21}(X - X_0) + c_{22}(Y - Y_0) - c_{23}f}{c_{31}(X - X_0) + c_{32}(Y - Y_0) - c_{33}f} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Если известны элементы внешнего ориентирования снимка $X_S, Y_S, Z_S, \nu, \varphi, \gamma$ и отстояния точек Z , то по формуле (3.4) можно определить координаты точек объекта.

Элементы внешнего ориентирования могут быть определены в результате фотограмметрической обработки снимков по опорным точкам.

3.6 Особенности измерения координат на цифровых снимках

Цифровое изображение представляет собой прямоугольную матрицу, каждый элемент которой – *пиксель* - имеет свое определенное положение, заданное номером столбца j и строки i , которые в силу своей прямоугольной структуры и задают систему координат цифрового изображения (рисунок 3.8, а).

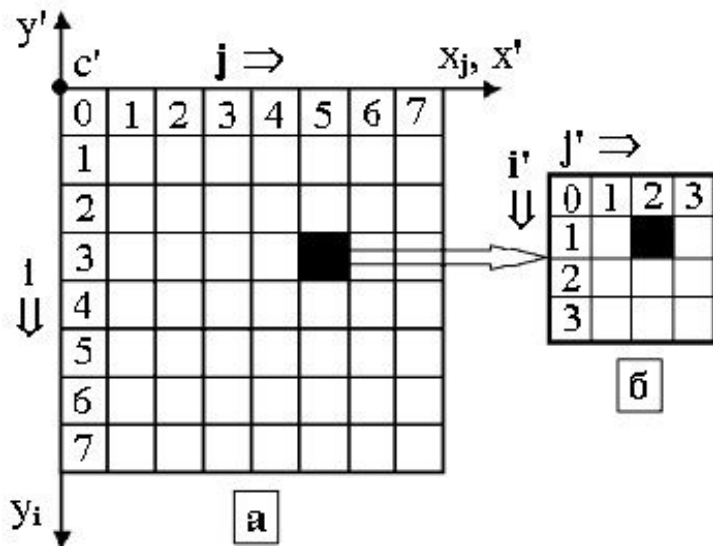


Рисунок 3.8 - Система координат цифрового изображения

Эта система координат - левая. Начало координат находится в левом верхнем углу (точка c'), где расположен нулевой пиксель. Ось x_j направлена вправо и вдоль неё идёт счёт столбцов j . Ось y_i направлена вниз и вдоль неё идёт счёт строк i . Координаты центра любого пикселя определяются так:

$$x_j = j + 0,5, y_i = i + 0,5,$$

где j и i – номера столбца и строки матрицы цифрового изображения. Для закрашенного пикселя ($j = 5, i = 3$) координаты будут $x_j = 5,5$ и $y_i = 3,5$.

Для перехода от пиксельных координат к метрическим координатам нужно умножить пиксельные координаты на метрический размер пикселя D , заданный при сканировании снимка или при изготовлении матрицы цифровой фотокамеры, т. е. $x' = D'x_j$ и $y' = D'y_i$.

Если $D = 10$ мкм, то метрические координаты закрашенного пикселя будут $x' = 5,5'10 = 55$ мкм и $y' = 3,5'10 = 35$ мкм.

Часто систему координат исходной матрицы цифрового изображения пересчитывают из левой системы в правую, перенося начало системы координат из левого верхнего в левый нижний угол. В результате оси метрических координат будут иметь направления: ось x_j -

вправо, а ось y_i - вверх.

В компьютерной программе-измерения цифрового изображения выполняются на экране монитора путём позиционирования измерительной марки на точку изображения. При выводе на экран цифрового изображения в масштабе 1:1, который называется истинным размером, пиксель исходного изображения совпадает с пикселем экрана монитора. В этом случае, если размер пикселя исходного изображения, например, равен 12 мкм, а размер пикселя экрана монитора - 240 мкм, то отображение изображения на экране монитора соответствует оптическому увеличению 20 крат. При таком увеличении дискретность перемещения измерительной марки равна пикселю и, соответственно, измеренные координаты будут зафиксированы до одного пикселя.

Увеличение точности измерения координат можно достичь за счет увеличения исходного изображения в n раз. В этом случае *один пиксель* исходного изображения *отображается в нескольких пикселях экрана монитора*, например, при увеличении 2:1 на 4 пикселях монитора, 3:1 на 9 пикселях и т. д. Пропорционально увеличению увеличивается дискретность перемещения измерительной марки, а значит и точность фиксирования координат. Координаты увеличенного изображения определяются по формулам:

$$x_j = j + \frac{j' + 0,5}{n}, \quad y_i = i + \frac{i' + 0,5}{n}.$$

На рисунке 3.8, б показано, как при увеличении в 4 раза пиксель исходного изображения отображается на 16 пикселях монитора. На исходной матрице закрашенный пиксель имеет нумерацию $j = 5, i = 3$. На подматрице закрашенный пиксель имеет нумерацию $j' = 2, i' = 1$. Следовательно, пиксельные координаты центра затенённого пикселя подматрицы будут:

$$x_j = 5 + (2 + 0,5)/4 = 5,625,$$

$$y_i = 3 + (1 + 0,5)/4 = 3,375,$$

а метрические координаты при $D = 10$ мкм будут $x' = 56,25$ мкм, $y' = 33,75$ мкм.

Однако за счет увеличения изображения увеличивать точность измерений до бесконечности нельзя. Максимально разумные увеличения 2-3 *крат*. Дальнейшее увеличение приводит к потере измеряемых объектов (точек), т. к. на экране появляются изображения пикселей, а изображение объекта размывается. Однако оператору необходимо измерять не пиксели, а объект (некий образ), который складывается из

множества пикселей.

Достижение субпиксельной точности возможно не только за счет увеличения изображения. В настоящее время существуют алгоритмы, позволяющие выполнять виртуальный пересчет матрицы исходного изображения относительно положения измерительной марки, и таким образом увеличивать точность измерений.

4 Технические средства для цифровой фотограмметрии

4.1 Цифровая фотограмметрическая камера

Цифровые технологии, ставшие одной из примет современности не могли не затронуть и фотограмметрию. Цифровые съемочные системы (сенсоры) представляют собой кадровые аэрокамеры или линейные сканеры, ориентированные на получение снимков местности. Несмотря на высокую стоимость аэрокамер, многие организации и частные компании становятся владельцами таких камер.

При цифровой обработке изображений только снимки, получаемые с цифровых фотограмметрических камер, в отличие от сканированных цифровых снимков, обеспечивают возможность полного сохранения точности и качества полученной исходной информации.

К особенностям таких камер относится то, что каждый пиксель формируемого изображения занимает строго определенное положение, а их последовательность определяет положение координатных осей измерительной системы, что исключает необходимость «впечатывания» координатных меток и внутреннего ориентирования полученных снимков, как это имеет место при использовании аналоговых аэрокамер.

Наибольший интерес представляют так называемые крупноформатные (широкоформатные) камеры такие как, например, UltraCam-X Prime (рисунок 4.1), Microsoft-Vexcel Imaging GmbH, Австрия), DMC (Intergraph Corp., США), ADS80 (Leica Geosystems AG, Швейцария), которые позиционируются производителями в качестве замены аналоговых аэрофотокамер. Однако, для съемки линейных и небольших площадных объектов экономически эффективными признаны среднеформатные камеры (рисунок 4.2).

Аналоговые камеры ведут съемку на специальную лавсановую пленку. Размер одного кадра при этом составляет 230x230 мм. После сканирования пленки на специальном фотограмметрическом сканере с типичным разрешением



Рисунок 4.1 – Широкоформатная цифровая аэрокамера UltraCam

(размер полного кадра 136 Мегапиксел, размер пикселя 7.2 – 9.0 мкм,

15 мкм получают цифровые изображения размером 15х15 тыс. пикселей, т. е. больше 200 мегапикселей.

В настоящее время технология производства светочувствительных матриц (CMOS или CCD) такого размера пока не позволяет выпускать такие габаритные матрицы. Поэтому для получения цифровых изображений сравнимого размера в камерах UltraCam-X и DMC осуществляется «сшивка» фрагментов изображений, полученных несколькими матрицами. В камере UltraCam-X Prime таких матриц девять. Съемка ведется четырьмя объективами, ее синхронизация выполняется за счет движения летательного аппарата таким образом, чтобы совместить центры проекции объективов. Размер результирующего кадра составляет 14 430х9420 пикселей (136 мегапикселей). В камере DMC применяется другой подход — съемка четырьмя объективами ведется синхронно с точностью 0,01 миллисекунды. Размер результирующего кадра — 13 500х8000 пикселей (108 мегапикселей).

Крупноформатные камеры UltraCam и DMC используют черно-белые (grayscale) матрицы для получения изображения с высоким разрешением. Одновременно ведется съемка на матрицы с меньшим разрешением, чувствительные в красном, синем, зеленом и инфракрасном диапазонах спектра.

Среднеформатные камеры устроены существенно проще. При изготовлении среднеформатных цифровых аэрокамер используют матрицы небольших размеров. Наиболее известными являются камеры: RMK-D (Intergraph Z/I Imaging, США), DSS (Applanix Corp., Канада), RCD100 (Leica Geosystems, Швейцария), Rollei AIC (рисунок 4.2, Trimble Navigation, США), DiMAC Lite (DIMAC Systems, Люксембург). Как правило, эта аппаратура имеет разрешение 60-80 мегапикселей, оснащена светочувствительной матрицей Байера, одним объективом и сразу формирует цветное или инфракрасное изображение.



Рисунок 4.2 - Среднеформатная цифровая аэрокамера Rollei AIC
(размер матрицы камеры 49x37 мм
(5440x4080 пикс, размер полного кадра 39
Мегапиксел, размер пикселя 6.8 мкм)

Важной характеристикой цифровых аэрокамер является физический размер пикселя матрицы. Чем он больше, тем больше фотонов регистрируется в единицу времени, что при прочих равных параметрах позволяет проводить съемку при худших условиях освещенности. Большинство цифровых аэрокамер создают изображения глубиной цвета более 8 бит на пиксель, что позволяет разглядеть детали в тених, недоступные при аналоговой съемке.

Фотограмметрическая обработка снимков, получаемых цифровыми аэрокамерами, аналогична обработке аналоговых снимков. Более того, процедура внутреннего ориентирования цифровых аэроснимков значительно упрощается и заключается в вводе данных из паспорта

камеры. Все поставляемые в комплекте объективы имеют сертификаты фотограмметрической калибровки, предоставляемые организацией производителем цифровой фотограмметрической камеры.

4.2 Цифровая неметрическая камера

Цифровые бытовые полу- и профессиональные неметрические камеры выпускают многие производители (рисунок 4.3, 4.4). Их использование в фотограмметрии обусловлено двумя причинами. С одной стороны, низкая стоимость, а с другой – постоянное улучшение технических характеристик, что при соответствующей тщательной фотограмметрической калибровке позволяет превратить их в точное измерительное устройство для решения возникающих фотограмметрических задач.



Рисунок 4.3 – Профессиональная неметрическая цифровая фотокамера EOS 5D Mark II

Камера EOS 5D Mark II (рисунок 4.3) содержит полнокадровый 21,1-мегапиксельный CMOS-датчик (светочувствительную матрицу). Физические размеры (габариты) полноформатного датчика соответствуют размерам кадра 35-миллиметровой плёнки. Квадратные пиксели размером 6,4х6,4 мкм обеспечивают захват большего количества света и низкий уровень шума во всем диапазоне светочувствительности матрицы.

Характеристики камеры Kodak DCS Pro SLR/n (рисунок 4.3): - тип сенсора – 14,0-мегапиксельная матрица КМОП; физический размер сенсора - полноформатный 36 x 24 мм; размер снимка 4500х3000 пикселей; размер пикселя 7.9 x 7.9 мкм; получение снимков в форматах RAW/tif.



Рисунок 4.4 – Профессиональная неметрическая цифровая фотокамера Kodak DCS Pro SLR/n и используемый объектив

Используемый объектив - Nikkor 50 мм f/1:1,8D (фокусное расстояние 50 мм; светосила 1:1,4). Основные компоненты цифровой неметрической камеры приведены на рисунке 4.5.

Любая фотокамера имеет объектив, от свойств которого во многом зависит качество получаемых фотографий. Объективы современных фотоаппаратов состоят из множества линз. Последние имеют определенные уровни аберраций (искажений). Чтобы их минимизировать, формируется оптическая система, в которой линзы подобраны таким образом, что результирующие искажения оказываются много меньше, чем в какой-либо отдельной линзе. Искажения разделяются на геометрические и хроматические.

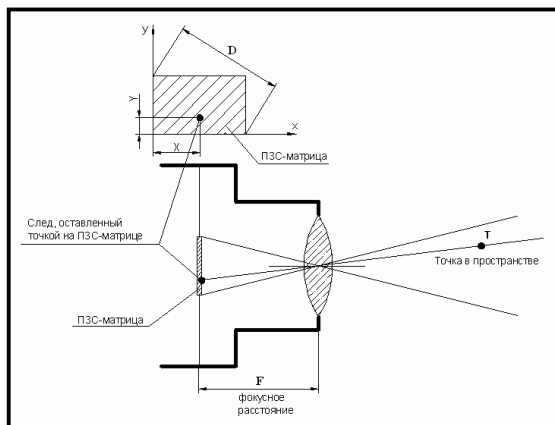


Рисунок 4.5

В определённой мере уровнем аберраций, как и количеством света, проходящего через линзы объектива, можно управлять. Это осуществляется заданием диафрагмы. По мере закрывания диафрагмы (уменьшения отверстия), падает количество света, проходящее через объектив, и снижаются искажения. По мере открывания (увеличения отверстия) - наоборот. Степень диафрагмирования измеряют безразмерным числом диафрагмы, равным отношению фокусного расстояния к диаметру отверстия. Диафрагму маркируют по степеням корня из двух (так называемые «деления» или «стопы») - 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16 и т.д. Количество света, пропускаемого диафрагмой, обратно пропорционально квадрату диафрагменного числа. Таким образом, каждое последующее деление еще более закрывает диафрагму и уменьшает количество пропускаемого света вдвое. Значение максимально открытой диафрагмы называется светосилой. Например, если фотоаппарат имеет диапазон диафрагмирования 2,8 - 8, то светосила будет равна 2,8.

Стандартные объективы неметрической цифровой камеры имеют фокусное расстояние около 50 мм (примерно соответствует охвату человеческого глаза), широкоугольные – 28-35 мм, более короткофокусные называются сверхширокоугольными. Длиннофокусные объективы («телевики») имеют фокусное расстояние 100—400 мм.

Угол зрения цифровой камеры с полноформатным размером матрицы, соответствующим размерам кадра 35-миллиметровой плёнки, остаётся таким же, как у аналоговой камеры. В моделях с матрицами меньшего размера он приблизительно соответствует углу зрения аналоговых камер с фокусным расстоянием 300 мм. Поэтому такие цифровые камеры являются длиннофокусными.

ПЗС²-матрица (светочувствительный сенсор). Проходящий через объектив свет попадает на светочувствительный сенсор камеры, который фиксирует монохромное изображение: каждый его пиксель имеет лишь одну координату (яркости). В большинстве современных цифровых камер каждый пиксель светочувствительного сенсора может воспринимать яркостный сигнал только по одному из трех цветовых каналов (красному, зеленому или синему) - в зависимости от цвета

² ПЗС ("*приборы с зарядовой связью*") - твердотельный электронный компонент, состоящий из множества крошечных датчиков, которые регистрируют аналоговый электрический заряд, пропорциональный интенсивности падающего на них света).

фильтра, находящегося над данным элементом. Светофильтры располагаются по так называемой байеровской схеме, структура которой построена с учетом особенностей зрительного восприятия человека.

Для преобразования монохромного изображения в цветное, используется специальная операция demosaic.

Физический размер ПЗС-матрицы – его геометрическая длина и ширина в миллиметрах - одна из важнейших характеристик в современных цифровых камерах, влияющих на качество получаемых снимков. В спецификациях к цифровым камерам этот размер диагонали матрицы D указывается не в миллиметрах, а в обратном количестве дюймов, который выглядит, например, так 1/3.2, что соответствует 3.4 x 4.5 мм. Не следует пытаться вычислять диагональ матрицы из дюймов (так сложилось, что это «нестандартные» дюймы, хотя если поделить их на 1,7, то получим приблизительно нужное число). Но, даже размер в дюймах найти в характеристиках фотокамеры обычно не представляется возможным. Поэтому для выяснения физического размера матрицы приходится прибегать к расчетам. Для этого обратимся к следующей таблице:

В мм.	В дюймах	K_f
3.4 x 4.5	1/3.2 "	7.6
4.0 x 5.4	1/2.7 "	6.4
4,3 x 5,8	1/2,5"	6.0
5,3 x 7,2	1/1,8"	4.9
6,6 x 8,8	2/3"	4.0
15 x 23	APS-C	1.6
36 x 24	Полнокадровая	1.0

В первой колонке таблицы находится физический размер, который требуется определить, во второй, размер в дюймах, принятый в спецификации, а в третьей коэффициент, показывающий во сколько раз диагональ матрицы меньше диагонали кадра 35мм пленки обычной аналоговой камеры (для пленочных фотокамер $K_f = 1$). В таблице показаны типичные значения коэффициента K_f для матриц различных размеров.

Для расчета требуются две величины, которые, как правило, присутствуют в характеристиках любой цифровой камеры. Это истинное фокусное расстояние (f_u) и эквивалентное фокусное расстояние

($f_{эке}$). Оба эти параметра приводятся в технических характеристиках, а на оправе объектива часто пишут через дробь, например 7-21/2,0-2,8.

Зная фокусное расстояние и эквивалентное фокусное расстояние можно вычислить коэффициент K_f , разделив второе на первое (такое соотношение часто называют «кроп-фактором»).

К примеру, если $f_u = 7 - 21$ мм, а $f_{эке} = 35 - 105$ мм, то делить нужно, либо 35/7, либо 105/21. В результате получится коэффициент $K_f = 5$. Теперь по вышеприведенной таблице находим K_f равный или приблизительно равный 5, и получаем в результате, что матрица имеет физический размер 1/1,8" или 5,3 x 7,2 мм.

При нетопографическом применении фотограмметрии следует ориентироваться на прогрессивную съемку цифровыми фото- и видеокамерами, которые постоянно совершенствуются. Увеличивается размер регистрирующей матрицы, пиксель стремится к предельной величине - стал меньше 10 мкм. Выпускаются отдельные блоки для модернизации обычных фотокамер, так называемые "задние стенки" - цифровые кассеты с светочувствительной матрицей.

Наиболее предпочтительные типоразмеры матриц для решения прикладных задач фотограмметрии, которыми снабжаются полупрофессиональные и профессиональные модели неметрических цифровых камер:

- *матрица формата DX*, APS-C, соотношение сторон 3:2, размер около 24x18 мм, соответствует «полукадру» 35 мм кадра;
- *полнокадровая* матрица размера 36 x 24 мм, соотношение сторон 3:2, по размерам соответствующая классическому 35 мм кадру;
- *среднеформатная* матрица формата 60x 45 мм, соотношение сторон 3:2. Матрицы таких размеров «сшиваются» из матриц меньшего размера.

Физические размеры фотосенсоров определяются размером отдельных пикселей матрицы, которые в современных фотосенсорах имеют величину 5-6 мкм. Чем крупнее пиксель, тем больше его площадь и количество собираемого им света, поэтому тем выше его светочувствительность и лучше отношение сигнал/шум, тем качественней снимки, получаемые в условиях плохой освещенности. Необходимое разрешение деталей фотоснимка определяет общее количество пикселей, которое в современных фотоматрицах достигает десятков миллионов пикселей, и тем задаёт физические размеры фотоматрицы.

Матрицы выпускаются с тремя различными пропорциями пикселя:

- *квадратный* пиксель - обычно снабжается фотографическое, рентгенографическое и астрономическое оборудование, а также HDTV видеооборудование;

- сенсоры с пропорцией пикселя 4:3, или 3:4 применяются для видеоаппаратуры.

Фотоматрица оцифровывает то изображение, которое формируется объективом фотокамеры. Возможность получаемого цифрового снимка передавать *объекты минимальных размеров* характеризуется разрешающей способностью, резкостью изображения и разрешением в пространстве объектов.

Разрешающая способность выражается числом раздельно изображаемых линий (штрихов) абсолютного контраста на 1 мм изображения. Этот критерий позволяет оценить возможности снимка по раздельной передаче близко расположенных объектов минимальных размеров и обеспечивает сравнение различных снимков применительно к стандартным условиям.

Если, например, объектив в силу недостаточно высокой разрешающей способности передаёт 2 светящиеся точки объекта, разделённые третьей чёрной, как одну светящуюся точку на 3 подряд расположенных пикселя, то говорить о точном разрешении изображения фотокамеры не приходится.

В фотографической оптике существует приблизительное соотношение: если разрешающую способность M фотоприемника выразить в линиях на миллиметр и так же выразить разрешающую способность N объектива, то результирующее разрешение K системы объектив+фотоприемник, можно найти по формуле:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{N} + \frac{1}{M} \quad \text{или} \quad K = NM / (N + M)$$

Это соотношение максимально при $N = M$, когда разрешение равно $N/2$, поэтому желательно, чтобы разрешающая способность объектива соответствовала разрешающей способности фотоприемника.

У современных цифровых фотоматриц разрешающая способность определяется размером пикселя, который варьируется у разных фотоматриц в пределах от 2.5 мкм до 8.0 мкм, а у большинства современных фотоматриц он равен 6.0 мкм. Поскольку две точки будут различаться если между ними находится третья точка, то разрешающая способность соответствует расстоянию в два пикселя, то есть:

$$M = \frac{1}{2p}, \quad \text{где } p - \text{размер пикселя.}$$

У цифровых фотоматриц разрешающая способность составляет от 200 линий на миллиметр до 70 линий на миллиметр у крупноформатных цифровых фотокамер.

Для определения разрешающей способности применяются различные способы. Наиболее точный из них - определение разрешающей способности съемкой специальных тест-объектов, называемых мирами, располагаемыми непосредственно в пространстве объекта, причем в условиях получения снимков.

4.3 Адаптация цифровых неметрических камер для фотограмметрических измерений

Чтобы обеспечить возможность фотограмметрических измерений с использованием неметрической цифровой камеры, требуется решить следующие проблемы:

- создать координатную систему снимка;
- создать специальное программное обеспечение для фотограмметрической калибровки;
- выполнить фотограмметрическую калибровку: определить неизвестные элементы внутреннего ориентирования, определить дисторсию объектива;
- сохранить элементы внутреннего ориентирования.

Основная отличительная черта неметрических полу- и профессиональных бытовых цифровых камер от фотограмметрических в том, что элементы внутреннего ориентирования и дисторсия объектива полностью неизвестны. При фотограмметрической обработке этот недостаток камер компенсируется предварительной фотограмметрической калибровкой неизвестных элементов внутреннего ориентирования и дисторсии объектива в условиях, близких к условиям проведения фотосъемки. Это позволяет добиться высокой точности определения неизвестных параметров. Проблема остается в том, что параметры калибровки неустойчивы во времени и требуется сохранение элементов внутреннего ориентирования.

В силу конструктивной невозможности фиксации объектива калибровка цифровых неметрических камер, снабжаемых объективами с переменным фокусным расстоянием, возможна только на предельных значениях фокусного расстояния. При фокусировке объектива на промежуточных значениях фокуса для фиксации объектива требуется конструктивная доработка съёмочной аппаратуры: снабжение объектива специальной насадкой для сохранения постоянства фокусировки в заданном положении, а также платформой-ложементом (рисунок 4) для жёсткой фиксации камеры при выполнении фотосъёмки. Данные

меры обеспечивают неизменность (сохранение) фотограмметрических параметров цифровой камеры не только при выполнении калибровки, но и в процессе фотосъёмки наблюдаемых объектов.



а)

б)



в)



Рисунок 4.6 – Варианты фиксации объектива камеры для сохранения фокусировки: а, б) РЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров); в) V-Stars (США)

5 Теория метода фотограмметрической калибровки.

5.1 Математическое описание задачи калибровки

Поскольку при фотограмметрической обработке снимков источником систематических ошибок является неопределенность характеристик съёмочной аппаратуры, введено понятие *калибровка камер*. Под калибровкой камер понимается определение величин, характеризующих центральную проекцию получаемых снимков, соответствующую условиям съёмки, и уклонение точек фотоизображения от этой проекции. Эти величины, содержащие только систематические части ошибок снимков и названные параметрами калибровки, характеризуют качество снимков в процессе фотограмметрической обработки. К ним отнесены элементы внутреннего ориентирования: эквивалентное фокусное расстояние f_k , соответствующее наилучшей фокусировке фотокамеры, зафиксированной при её юстировке на заданное отстояние до объекта съёмки и координаты главной точки снимка x_0, y_0 . (точка нулевой дисторсии), а также радиальная дисторсия Δr - источник отклонения проекции снимка от центральной проекции.

Существуют различные способы решения задачи калибровки. Наиболее эффективным из них является фотографический способ определения параметров калибровки, что обусловлено стремлением проводить измерения в условиях, приближённых к условиям эксплуатации фотокамеры.

В основу рассматриваемого фотографического способа положен принцип совместного определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования камеры, а также коэффициентов полиномов, описывающих отклонения проекции снимка от центральной проекции (дисторсию). Калибровка выполняется по снимкам опорных точек, трёхмерные координаты которых известны в прямоугольной системе координат и могут быть заданы в пространстве объектов.

Согласно условиям коллинеарности (главное уравнение фотограмметрии) каждая точка объекта, ее образ на снимке и центр проекции снимка должны находиться на единой прямой, которая называется лучом. Совокупность всех лучей, которые проходят через один центр проектирования, называют связкой. Таким образом, условия коллинеарности выражают связь между измеренными (координаты снимка) и определяемыми величинами (параметры калибровки). Процесс калибровки предполагает, что получаемые калибровочные снимки строго соответствуют внутренним связкам лучей камеры.

Когда фотосъёмка выполнена с помощью *метрической* камеры (элементы внутреннего ориентирования известны), каждая связка содержит шесть неизвестных: три угла ротации ν, φ, γ и координаты цен-

тра проекции (X_s, Y_s, Z_s). Для однозначного решения связки необходимо три опорные точки, потому что каждая из них дает два уравнения или всего шесть уравнений для определения шести неизвестных.

Если камера *неметрическая*, элементы внутреннего ориентирования x_o, y_o и f_k неопределенны, поэтому количество неизвестных для каждой связки увеличивается на три и становится равным девяти. Тогда для однозначного решения девяти уравнений необходимо наличие пяти опорных точек.

Так как количество уравнений обычно получается больше, чем минимально необходимое, а измеренные координаты точек изображения содержат случайные ошибки, то эти уравнения решаются методом наименьших квадратов (МНК). Дисторсия, являясь источником систематических ошибок в координатах точек изображения может иметь значительные величины и таким образом влиять на процесс обработки по МНК, добавляет ещё минимум 3 неизвестных.

Применяя МНК к условиям фотограмметрии, всего будет определяться 12 неизвестных параметров: элементы внутреннего ориентирования f_k, x_o, y_o , и коэффициенты дисторсии k_1, k_2, k_3 ; параметры внешнего ориентирования $X_s, Y_s, Z_s, v, \varphi$ и γ камеры). Задача решается последовательными приближениями.

Условные уравнения, используемые при калибровке и связывающие между собой точные значения измеряемой информации с определяемыми параметрами, имеют вид

$$\begin{vmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ f \end{vmatrix} = K \cdot \begin{vmatrix} X_\phi \\ Y_\phi \\ Z_\phi \end{vmatrix}, \quad (5.1)$$

где $\bar{x}, \bar{y}$ – неискажённые координаты изображений опорных точек на снимке;

f_k – калиброванное фокусное расстояние камеры;

K – коэффициент пропорциональности;

$$\begin{vmatrix} X_\phi \\ Y_\phi \\ Z_\phi \end{vmatrix} = A \cdot \begin{vmatrix} X_\Gamma - X_s \\ Y_\Gamma - Y_s \\ Z_\Gamma - Z_s \end{vmatrix} \quad (5.2)$$

X_ϕ, Y_ϕ, Z_ϕ – фотограмметрические координаты опорных точек в пространственной системе координат камеры (снимка);

X_G, Y_G, Z_G – геодезические координаты опорных точек в системе координат пространства объекта;

X_s, Y_s, Z_s – координаты центра проектирования (точки фотографирования) в системе координат пространства объекта;

A – матрица направляющих косинусов, устанавливающая угловую связь между координатами X_ϕ, Y_ϕ, Z_ϕ и x, y ;

Исключив из (5.1) коэффициент пропорциональности K , получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} x &= f_\kappa \frac{X_\phi}{Z_\phi} \\ y &= f_\kappa \frac{Y_\phi}{Z_\phi} \end{aligned} \right\}, \quad (5.3)$$

которые представляют собой используемые в фотограмметрии уравнения коллинеарности.

Поскольку измерения по снимку отнесены к началу координат, а не к главной точке, то

$$\begin{aligned} x' &= x - x_0 \\ y' &= y - y_0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

где x', y' – координаты, отнесённые к главной точке, но не исправленные за дисторсию;

x, y – измеренные и осреднённые координаты в системе координат снимка;

x_0, y_0 – неизвестные или приближённо известные координаты главной точки.

Радиальная дисторсия Δr может быть представлена относительно неизвестного значения фокусного расстояния в виде

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots, \quad (5.5)$$

где r – радиальное расстояние от точки изображения до главной точки. Это расстояние выражается формулой

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

При этом

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2} = \sqrt{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]}. \quad (5.6)$$

Поскольку $\Delta x' = \frac{x'}{r} \Delta r$ и $\Delta y' = \frac{y'}{r} \Delta r$, где $\Delta x'$ и $\Delta y'$ – поправки к x' и y' , то

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= x' + \Delta x' = x' + \frac{x'}{r} \Delta r = x' \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right) \\ \bar{y} &= y' + \Delta y' = y' + \frac{y'}{r} \Delta r = y' \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

После подстановки (5.4) и (5.5) в (5.7) получаем

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= (x - x_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) \\ \bar{y} &= (y - y_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

Уравнения (5.8) могут быть подставлены в (5.1), после чего получим

$$\left. \begin{aligned} (x_i - x_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) &= f_k \frac{X_{\phi}}{Z_{\phi}} \\ (y_i - y_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) &= f_k \frac{Y_{\phi}}{Z_{\phi}} \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

Эти уравнения могут быть записаны в форме условных уравнений для i -й опорной точки

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{G}_{x_i} &= (x_i - x_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) - f_k \frac{X_{\phi_i}}{Z_{\phi_i}} = 0 \\ \mathcal{G}_{y_i} &= (y_i - y_0) \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots \right) - f_k \frac{Y_{\phi_i}}{Z_{\phi_i}} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

и решены относительно фокусного расстояния f_k , координат главной точки x_0 , y_0 , коэффициентов дисторсии k_1 , k_2 , k_3 ... и параметров внешнего ориентирования X_s , Y_s , Z_s , v , φ и γ камеры.

Уравнения (5.10) должны быть линеаризованы, для чего полагаем

$$\left. \begin{aligned} f_k &= f_k^0 + \delta f_k, \quad k_1 = k_1^0 + \delta k_1, \quad X_s = X_s^0 + \delta X_s, \quad v = v^0 + \delta v \\ x_0 &= x_0^0 + \delta x_0, \quad k_2 = k_2^0 + \delta k_2, \quad Y_s = Y_s^0 + \delta Y_s, \quad \varphi = \varphi^0 + \delta \varphi \\ y_0 &= y_0^0 + \delta y_0, \quad k_3 = k_3^0 + \delta k_3, \quad Z_s = Z_s^0 + \delta Z_s, \quad \gamma = \gamma^0 + \delta \gamma \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

а также

$$x_i = x_i^0 + \vartheta x_i,$$

$$y_i = y_i^0 + \vartheta y_i,$$

где верхний значок «нуль» указывает на измеренные или приближённые значения величин; через δ обозначены поправки к приближённым значениям, а через ϑ – поправки к измеренным значениям координат изображений опорных точек.

После подстановки (5.10) в (5.9) и разложения в ряд Тейлора получают уравнения, которые для упрощения, ввиду громоздкости напи-

$$\vartheta + B\delta = \varepsilon,$$

сания, приводятся в матричной форме. Эти уравнения для всех m опорных точек имеют вид

где

$$\vartheta = \begin{pmatrix} \delta f_k \\ \delta x_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta \gamma \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_m \end{pmatrix} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_m \end{pmatrix}$$

Уравнения составляются для каждой опорной точки, координаты которой были измерены на фотоснимке. Эти уравнения решаются относительно дифференциальных поправок $(\delta f_k, \delta x_0, \dots, \delta \gamma_0)$, которые придаются к приближённым значениям $(f_k^0, x_k^0, \dots, \gamma_k^0)$, в результате чего получается следующее приближение. Необходимо отметить, что начальное и каждое последующее приближенное значение коэффициентов $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ удовлетворяет уравнениям, а окончательные значения коэффициентов эквивалентны последним дифференциальным поправкам к ним. Решение последовательными приближениями продолжается до тех пор, пока поправки δ (за исключением коэффициентов k) не станут достаточно малы или пока весовая сумма квадратов остаточных невязок s (5.12) не стабилизируется.

Поскольку всегда будут иметься избыточные данные, т.е. число уравнений будет больше числа неизвестных, применяется строгое решение по способу МНК, под условием минимума суммы квадратов величин

$$S = \vartheta^T \sigma^{-1} \vartheta, \quad (5.12)$$

где σ – ковариационная матрица для m опорных точек.

Грубые ошибки в измерении координат изображений опорных точек являются обычным источником затруднений при уравнивании. Поэтому все измерения с большими остаточными невязками должны

быть исключены, после чего уравнивание следует повторить.

Таким образом, в результате калибровки функция дисторсии для калиброванного значения f_k будет иметь вид

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots$$

Может возникнуть необходимость определения дисторсии для другого значения f_k или определение нового значения f_k и функции дисторсии под другим условием (например, чтобы абсолютные величины максимальной положительной и отрицательной поправок были равны; в этом случае величина дисторсии будет равной или близкой к нулю для некоторого значения r).

При изменении значения фокусного расстояния на величину Δf_k новые значения коэффициентов k_i определяются выражениями

$$k'_0 = f_k \frac{\Delta f_k}{f_k}; \quad k'_1 = (1 + k'_0)k_1; \quad k'_2 = (1 + k'_0)k_2; \quad k'_3 = (1 + k'_0)k_3 \quad (5.13)$$

и функция дисторсии приобретает вид

$$\Delta r = k'_0 r + k'_1 r^3 + k'_2 r^5 + k'_3 r^7 + \dots \quad (5.14)$$

Для того, чтобы определить фокусное расстояние и функцию дисторсии для некоторого желательного распределения (например, чтобы абсолютные величины максимальной положительной и отрицательной поправок были равны) следует найти расстояние r , при котором поправки равны нулю. Наиболее просто это делается графически. Затем вычисляются

$$f_k = f_k \left(\frac{r'}{r' + \Delta r'} \right) \quad \text{и} \quad \Delta f_k = \left(\frac{-\Delta r'}{r' + \Delta r'} \right) \approx f_k \left(\frac{-\Delta r}{r} \right),$$

где $\Delta r'$ – ранее полученное значение дисторсии для расстояния r' .

Коэффициенты дисторсии затем вычисляют по (5.13), что приводит к выражению дисторсии согласно (5.14).

5.2 Определение физического размера пикселя

При определении размеров пикселя по цифровым снимкам измеренные значения координат точек удобно представлять в пикселях. Также в пикселях должно быть выражено и фокусное расстояние камеры f_k .

По приведенной ниже формуле можно вычислить физический размер пикселя, измеряя реальные размеры объекта и его изображения на снимке:

$$p_x = (f_k \times L_x) / (Z \times l_x);$$

$$p_y = (f_k \times L_y) / (Z \times l_y).$$

5.2 Использование процедур метода наименьших квадратов (МНК)

Большое значение как средства фотограмметрической калибровки для оценки параметров внутреннего ориентирования, дисторсии объектива и параметров внешней ориентации камеры, имеет использование МНК процедур.

Процесс МНК применим к множеству нелинейных уравнений, поэтому, начальные значения задаются для всех неизвестных параметров (даже при нулевых начальных значениях). Для сжатия этого процесса, чтобы он сходил к глобальному минимуму, может быть необходимо внесение стандартных ошибок в параметры. В этом случае можно отметить существующие различия в методах калибровки МНК между ПЗС и плёночными камерами. Косвенное предположение, что центр оптической оси будет находиться очень близко к центру снимка, не требуется для ПЗС камер. В действительности, значения x_0 и y_0 могут быть настолько велики, насколько позволяет аппроксимация первого порядка для параллельных вычислений. Единичное решение МНК процесса калибровки может не дать результатов, которые строго предъявляются к последующему использованию в прикладной фотограмметрии. Поэтому рекомендуется проводить итерационный процесс более одного раза, для того, чтобы быть уверенным, что начальные значения координирования снимка, которые влияют на получение параметров радиальной дисторсии, были пересчитаны, основываясь на успешно полученных значениях x_0 и y_0 .

Так как все параметры находятся (решаются) одновременно, рассматривается корреляция, которая существует между элементами внутреннего и внешнего ориентирования.

6. Фотограмметрическая калибровка

6.1 Технология фотограмметрической калибровки

В эпоху цифровых технологий фотограмметристы и многие другие используют цифровые неметрические камеры, которые не были специально разработаны или собраны для фотограмметрии. Для этих камер не существует требований к производителям для установки объективов в predetermined положение по отношению к блоку формирования изображения или к производителям объективов для точного размещения элементов объективов с целью коррекции различных искажений изображения. Фотограмметрические проблемы далеки от задач производителей ПЗС камер. Фактически, отклонение от центра блока формирования изображения может быть значительным по отношению к размеру блока формирования изображения (до 10% для фокусируемых объективов). Таким образом, не следует полагать, например, что главная точка снимка расположена точно в центре плоскости снимка или, что плоскость снимка корректно сориентирована. Дисторсия и некоторые другие дефекты камеры, являются источником систематических ошибок в координатах точек изображения. У неметрических камер эти недостатки могут иметь значительные величины и таким образом нарушают процесс фотограмметрической обработки снимков.

Следовательно, если предполагается использовать цифровые неметрические камеры для решения фотограмметрических задач или близких к ним, требуется знать все измерительные характеристики, которые определяются тщательной калибровкой съёмочной аппаратуры.

В основу технологии калибровки положен принцип совместного определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования камеры и поправок отступления от ортоскопии (дисторсия) оптической системы за несовпадение проекции изображения, полученного камерой и центральной проекции. Основными компонентами данной технологии являются:

1. Пространственный *калибровочный стенд* по снимкам которого выполняется калибровка цифровых съёмочных камер.

2. *Программное обеспечение*, основные особенности которого:

- решение обратной фотограмметрической засечки и уравнивание результатов измерений снимков по МНК с совместным определением коэффициентов полиномов, описывающих отклонения проекции снимка от центральной проекции (дисторсию);
- набор полиномов, описывающих дисторсию;

- возможность калибровки самых сложных объективов.
- измерение координат точек снимка с субпиксельной (0.02 pix) точностью;

6.2 Калибровочный стенд

Полная паспортизация камеры может быть выполнена только по снимкам специальной калибровочной тест-площадки, имеющей густую сеть замаркированных точек с известными геодезическими координатами. Таким идеальным тестовым объектом для метрологической аттестации цифровых камер является *трехмерный фотограмметрический калибровочный стенд* (рисунок 6.1), содержащий более 200 замаркированных опорных точек. Взаимное положение опорных точек определяется в пространстве со среднеквадратической погрешностью 0.1 – 0.3 мм, а конструкция калибровочного стенда выполняется таким образом, чтобы обеспечить качественную калибровку по всем параметрам для любой цифровой камеры.



Рисунок 6.1

В данном проекте в качестве инструмента для осуществления процесса калибровки использовался рабочий макет фотограмметрического калибровочного стенда, созданного специалистами ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ на отвесной стене помещения для юстировки и калибровки фотокамер, сфокусированных для съёмки с близкого расстояния.

По площади настенного калибровочного стенда размещены и определены с помощью электронного тахеометра Leica TDRA 6000 пространственные координаты 90 замаркированных опорных точек, со среднеквадратической погрешностью $\pm 0,3$ мм.

При калибровке камеры фотосъёмка опорных точек стенда производится независимо с 3-4 точек пространства. Оптическая ось камеры при съёмке в каждой точке стояния ориентируется по-разному, с взаимным наклоном в вертикальной плоскости и с отклонением в горизонтальной плоскости (рисунок 6.2).

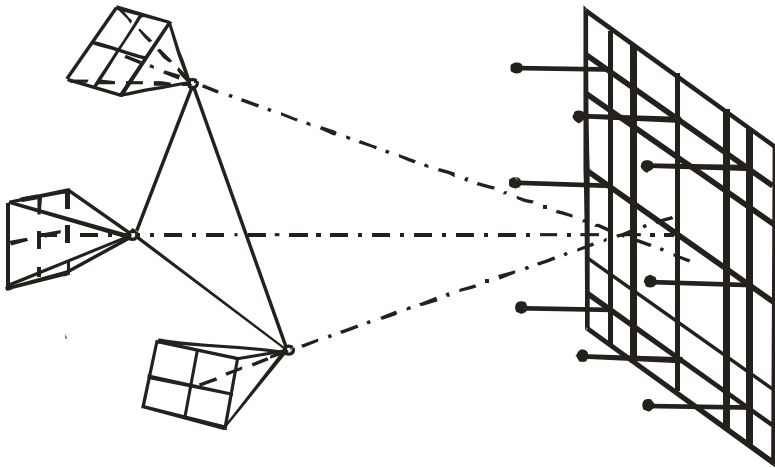


Рисунок 6.2 – Схема фотосъёмки калибровочного стенда с 3-х точек стояния

Согласно разработанному принципу калибровки производится совместная математической обработка получаемых калибровочных снимков по МНК, что позволяет определять метрически достоверные фотограмметрические параметры внутреннего ориентирования камеры и дисторсии объектива с возможностью их дальнейшего использования для высокоточных фотограмметрических измерений.

6.3 Функциональность применяемого ПО фотограмметрической калибровки камер

Программное обеспечение включает специальную фотограмметрическую программу измерения координат снимков «Photomod ВТ ФГИ» и программу «Argon» математической обработки и вычисления фотограмметрических параметров калибровки – фокусного расстояния и радиальной составляющей дисторсии объектива аттестуемой цифровой фотокамеры.

Функциональные возможности ПО «Argon» определяются его программной составляющей, которая для решения задачи фотограмметрической обработки калибровочных снимков должна обеспечивать выполнение следующих процессов: вычисление параметров внешнего и внутреннего ориентирования снимков; вычисление коэффициентов полиномов, описывающих радиальную составляющую дисторсии из решения обратных фотограмметрических засечек на основании выражения (3.4).

При решении задачи в программе варьируется до 30 неизвестных параметров для максимальной серии из 4-х обрабатываемых калибровочных снимков.

Для удовлетворительного решения геометрическая схема метода калибровки должна быть жёсткой. Это означает широкий диапазон ориентации камеры, обычно до 3-4 положений камеры, т.е. включать серию до 3-4 снимков при 200-300 опорных точках на них, которые должны быть видны со всех положений (точек стояния) калибруемой камеры.

Алгоритм обработки информации по калибруемой фотокамере использует при расчётах картинных координат опорных точек кроме общепринятых параметров внутреннего ориентирования - фокусного расстояния f и координат главной точки x_0, y_0 , математическую модель радиальной составляющей дисторсии:

$$x_p = x \cdot (1 + \Delta d_1) + x_0 \cdot \Delta d_1; \quad (6.1)$$

$$y_p = y \cdot (1 + \Delta d_1) + y_0 \cdot \Delta d_1; \quad (6.2)$$

где

$$\Delta d_1 = k_1 \cdot r^{n1} + k_2 \cdot r^{n2} + k_3 \cdot r^{n3}; \quad (6.3)$$

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2} = \sqrt{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]}. \quad (6.4)$$

Здесь x_p, y_p – расчётные координаты изображений опорных точек на снимке;

x_0, y_0 – координаты главной точки;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной составляющей дисторсии;

n_1, n_2, n_3 – показатели степени.

Процесс расчёта параметров калибровки проводится в несколько этапов.

В решении задачи одновременно могут участвовать от одного до четырёх снимков. На первом этапе каждый из калибровочных снимков обрабатывается в отдельности, как полученный фотокамерой со своей точки стояния. Каждый из этих снимков имеет свои начальные значения параметров пространственного положения (шесть параметров): три пространственные линейные координаты X_s, Y_s, Z_s центра проектирования (точка фотографирования) и три угла ориентации ν, φ, γ оптической оси в точке фотографирования, а также одинаковые для всех полученных с разных точек стояния снимков начальные значения шести фотограмметрических параметра, присущие калибруемой камере ($f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3$). Все 12 названных параметров объявляются варьируемыми, т.е. их начальные значения и среднеквадратические погрешности, как характеристики знания их истинных значений, подлежат уточнению.

Уточнение проводится по методу наименьших квадратов (МНК) с итерационным приближением к минимуму целевой функции (функционала).

Функционал состоит из двух частей, первая из которых представляет собой сумму квадратов взвешенных невязок как разности картинных координат опорных точек, измеренных на снимке и новых картинных координат, вычисленных в представлении коэффициентов модели с дисторсией. Вторая (необязательная) - учитывает отход решения на очередном шаге поиска от начальных значений варьируемых параметров.

На втором этапе определяется среднее арифметическое значение параметров внутреннего ориентирования и коэффициентов дисторсии по обработанным снимкам. Эти средние значения и уточненные на первом этапе значения параметров внешнего ориентирования, присваиваются каждому из обрабатываемых снимков. Вновь повторяется индивидуальная обработка каждого снимка, как на первоначальном этапе. Предполагается, что полученные значения фотограмметрических параметров калибровки будут отличаться от истинных незначительно, а начальные значения среднеквадратических погрешностей всех варьируемых параметров существенно уменьшатся.

На третьем этапе новое осреднение даёт исходные данные для

следующего этапа – совместной обработки всех снимков. При этом варьируются $12 \times N$ параметров, где N – число обрабатываемых снимков. На данном этапе осреднение значений параметров калибровки производится на каждом шаге уточнения по МНК.

Метод наименьших квадратов при поиске решения фактически не ограничен какой-либо областью значений варьируемых параметров, если только не включать в функционал дополнительное слагаемое, учитывающее отход решения на очередном шаге поиска от начальных значений варьируемых параметров.

Поиск прекращается в одном из двух случаев:

- выбрано заданное число шагов,
- при очередном шаге значение функционала увеличилось.

Алгоритм задачи предусматривает повторение работы описанных выше этапов задаваемым числом циклов. При этом первый этап нового цикла использует в качестве начальных значений варьируемых параметров решение, полученное на предыдущем цикле.

Принятый принцип фотограмметрической калибровки камер был исследован по методу математического моделирования и практически реализован на практике в программе «Аргон», осуществляющей необходимую математическую обработку.

6.4 Результаты калибровки цифровых камер

Для экспериментальной проверки разработанной методики по приведенной выше технологии, математическое описание которой приведено в п. 5.1, были выполнена калибровка нескольких профессиональных неметрических цифровых фотокамер Canon 5D Mark II и Kodak с неизвестными элементами внутреннего ориентирования и дисторсии. Камеры изначально адаптировались для их последующего использования при внешнетраекторных измерениях в аэробаллистических экспериментах на установке АБТ-2 ВНИИЭФ. Калибровка камер выполнялась на значении фокусного расстояния, соответствующего расстоянию фокусировки до объекта съёмки 5.5 м, с фиксацией объектива в данном положении для сохранения элементов внутреннего ориентирования.

Для примера, характеристики камеры Canon 5D Mark II (рисунок 6.1):

- тип сенсора – 21,1-мегапиксельный CMOS,
- физический размер сенсора - полноформатный 36 x 24 мм (соответствует размеру кадра 35-миллиметровой плёнки);
- размер снимка 5616 x 3744 пиксел;

- размер пикселя 6.4 x 6.4 мкм;
- получение снимков в форматах RAW/JPEG.

Тип использованного объектива (рисунок 6.2) - Canon LENS EF 50 мм 1:1,2 L USM (фокусное расстояние 50 мм; светосила 1:1,2).

Фотографическое изображение (снимок) поля опорных точек испытательного калибровочного стенда, полученного камерой Canon 5D Mark II, показан на рисунке 6.3



Рисунок 6.3

С помощью фотограмметрического программного обеспечения PHOTOMOD ВТ ФГИ («Ракурс-ВНИИЭФ») на каждом полученном калибровочном снимке были измерены с субпиксельной точностью координаты 90 опорных точек, определенных геодезическим методом. Координаты этих точек принимались за истинные.

Требуемые фотограмметрические параметры калибровки определялись с помощью программного обеспечения «Аргон», путём совместной математической обработки по МНК серии из 4-х полученных снимков для каждой калибруемой камеры.

Одновременно с калибровкой камер определяются и физические размеры пикселя сенсора формирования изображения. Данный параметр, по существу, является неотъемлемой частью метрологической

аттестации любой цифровой камеры, которая будет использована для решения производственных задач, т.к. является источником больших систематических ошибок.

Результаты калибровки одной из цифровых камер отображены в виде «Паспорта фотограмметрической калибровки ...» на рисунке 6.4.

Выполненная фотограмметрическая калибровка цифровых неметрических камер с помощью предложенной технологии и методики калибровки, позволяет сделать следующие выводы:

1. Для определения совокупности параметров калибровки камер успешно использован трёхмерный калибровочный стенд и ПО, позволяющие производить калибровку в тех же условиях, в которых получают фотоснимки, или в наиболее близких к ним.

2. Вычисляемые остаточные невязки между расчётными и измеренными координатами опорных точек на снимках для всех исследуемых камер, в среднем, не превышают 3-5 мкм, что является хорошим результатом как для самой тестируемой камеры, так и для оценки эффективности использования фотограмметрического калибровочного стенда и программного комплекса обработки снимков.

3. Дисторсия, определяемая по всей площади снимка у разных камер имеет преимущественно радиальный характер. Она оказалась очень большой - до 20-30 пикселей, равно как и отклонение главной точки от центра блока формирования изображения. Величины этих искажений центральной проекции значительно превышают случайные погрешности измерения снимков, они должны определяться в процессе калибровки и учитываться при решении измерительных задач фотограмметрии.

Паспорт фотограмметрической калибровки цифровой камеры

Камера Canon 5D Mark II № ...609
 Объектив Canon Lens EF 50mm 1:1.2 L USM №

Фильтр Нет

Дата калибровки: февраль 2014 г.

Таблица 1- Параметры внутреннего ориентирования

Параметр	Значение
Фокусное расстояние f , мм	50.546 $\pm$ 0.001
x_0 , мм	0.206 $\pm$ 0.001
y_0 , мм	- 0.140 $\pm$ 0.001
Физический размер пикселя, мкм	6.4 x 6.4

Таблица 2 - Радиальная дисторсия: $\Delta r = k_1 r^1 + k_2 r^2 + k_3 r^3$

r , мм	Δr , мм
0	0.0
2	0.06074
4	0.11193
6	0.15356
8	0.18560
10	0.20802
12	0.22081
14	0.22395
16	0.21740
18	0.20116
20	0.17519
$k_1 = 0.03275$ $k_2 = -1.1903$ $k_3 = -0.4635$	

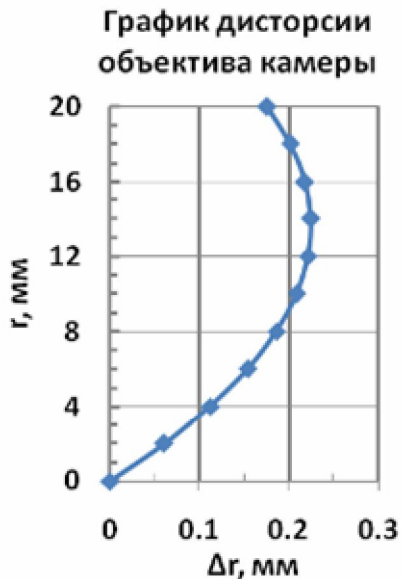


Рисунок 6.4

Заключение

В пособии приведены некоторые итоги решения проблемы метрологической аттестации (калибровки) цифровых неметрических фотокамер бытового назначения, применяемых в измерительных целях.

Наиболее ответственным моментом внешнетраекторных фотограмметрических измерений, осуществляемых при проведении аэробаллистических экспериментов, является цифровая фотограмметрическая обработка снимков, которая связана с необходимостью решения возникающих проблем геометрической калибровки съёмочной аппаратуры.

Высокая стоимость специальной фотограмметрической съёмочной аппаратуры (фотограмметрических камер) вынуждает рассматривать возможности использования неметрических бытовых фотокамер для высокоточного решения по снимкам измерительных задач. В силу неизбежных погрешностей изготовления эти камеры не обеспечивают получение снимков с необходимым конкретным геометрическим качеством, которое может определяться только в процессе их калибровки.

В пособии дано краткое описание методических вопросов фотограмметрической обработки цифровых фотоснимков, технических средств получения цифровых изображений и программы компьютерной обработки снимков с целью получения геометрических параметров калибровки.

Рассмотрена реально функционирующая технология и метод фотограмметрической калибровки цифровых неметрических фотокамер с использованием пространственного калибровочного стенда, основанные на фотографировании системы (поля) опорных точек, пространственные координаты которых известны из геодезических измерений. Предложенная технология обладает тем преимуществом, что фотосъёмка опорных точек выполняется одной и той же камерой и осуществляется независимо с 3-4 точек пространства.

Компьютерная программа совместной математической обработки до 4-х калибровочных снимков по МНК, позволяет получать метрически достоверные параметры калибровки, с возможностью их дальнейшего использования для высокоточных внешнетраекторных фотограмметрических измерений параметров движения объектов испытаний в аэробаллистических экспериментах.

Технология калибровки, метод и программа обработки были использованы при фотограмметрической калибровке ряда цифровых неметрических фотокамер и продемонстрировали свою работоспособность.

Список использованной литературы

1. Амромин П. Д. Калибровка аэрофотоаппаратов по снимкам конвергентной съёмки, образующих замкнутый триплет. – Труды Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъёмки и картографии, 1974, № 35, с. 69-78.
2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. /Под ред. Г.С. Хуанга. М. Радио и связь 1984.
3. Буров М.И., Костин В.И. Аналитический фотограмметрический метод изучения кинематических параметров движения быстролетающих объектов. Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъёмка», 1979, №1.
4. Вальтерис С.Э. и др. Автоматизированная обработка изображений. / Труды Литовской ССР. Сер. Б, 1983, т. 3.
5. Васильев Л. Н. Корреляционный анализ поля аэроснимка. «Геодезия и картография», 1976, № 9.
6. Васильев Л. Н., Семёнова В.С. Эффективность калибровки аэрофотографических систем. - «Геодезия и картография», 1978, № 12, с. 35-42.
7. Зайцев В. Обзор продукции LH System. // ArcReview, 2002, № 3, с. 3.
8. Ипатова Л.П., Хрущ Р.М. Автоматическая идентификация одноименных областей и точек стереопары фотоснимков. - «Геодезия и картография», 2001, № 6, с.22—24.
9. Книжников Ю.Ф., Гельман Р.Н. О некоторых источниках погрешностей при автоматическом измерении цифровых стереопар. - «Геодезия и картография», 2000, № 5, с. 25 - 31.
10. Костин В.И. О калибровке аэрофотоаппаратов (АФА), перефокусированных для съёмки с близких расстояний. – Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъёмка», 1977, №2.
11. Лобанов Н.А. Аналитическая фотограмметрия. М., «Недра», М., 1972.
12. Лобанов А.Н., Журкин И.Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. М., «Недра», 1980.
13. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Соифера. М., Физматгиз, 2001.
14. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений. Кн. 2. Пер. с англ. М., «Мир», 1982. [
15. Прикладная фотограмметрия. Л. «Наука», 1969.

16. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме. М. ЦНИИГАиК, 2005.

17. Русинов М.М., Афремов А.Ш. и др. Ортоскопия фотограмметрических объективов. М. «Недра», 1976

18. Райзман Ю.Г. Аэросъёмочный фотограмметрический комплекс VisionMap АЗ // VIII Междунар. научно-технич. конф. «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии». — (Хорватия), 2008.

19. Тюфлин Ю.С. Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. М., «Недра», 1986.

20. Фотограмметрия. // Келль Н.Г., Корнилов Ю.Н., Пономарев Е.В. и др. М., «Недра», 1989.

21. Фу К., Розенфельд А. Распознавание образов и обработка изображений. Современные проблемы кибернетики. М. Знание, 1980.

22. Хрущ Р.М. Этапы становления и развития фотограмметрии в России. «Геодезия и картография», 2003, № 7, с. 50 -- 61.

23. Bopp Hanspeter, Krauss Herbert. Ein Orientierungs – und Kalibrierungsverfahren für Nichttopographische Anwendungen der Photogrammetrie. Allg. Vermess. -Nachr., 1978, 85, №5, 182-188.

24. Effect of object distance on distortion in system cameras. Hakkarainen Juhani, Raty Jukka //Surv. Sci. Finl. .-1989;-7, № 1 .-С 1-11.

25. Jacobsen K. Geometric handling of large size digital airborne frame camera images. Optical 3D Measurement Techniques. — Zurich, 2007. — Vol. I. — P. 164–171.

26. Konefick John F., Gyer Maurice S. Analytical self-calibration.- Photogramm. Engineering, 1972, 38, №11.

27. Hallert B. Kalibrierung von Auswertegeräten und Nahaufnahmekammern., Zeitschrift für Vermessungswesen, 1964.

