

Список литературы

1. «Трудовой кодекс Российской Федерации», Москва, «Ось – 89», 2005г.
2. Денисенко Г. Ф., «Охрана труда», Москва, Высшая школа, 1985г.
3. Минаев Г. А., Шатько Н. И. «Техника безопасности на топографо-геодезических работах», Москва, Геоиздат, 1962г.
4. «Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов», Москва, ЦНИИГАуК, 2002г.
5. А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» Колосс, Москва 2006 г.

УДК 528.7

КАЛИБРОВКА НЕМЕТРИЧЕСКИХ МАЛОФОРМАТНЫХ КАМЕР С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ФОТОГРАММЕТРИИ

CALIBRATION THE NON METRIC SMALL FORMAT CAMERAS FOR THEREOF USE FOR THE DECISION OF SOME PROBLEMS PHOTOGRAMMETRY



Лазарева Н.С. / Lazareva N.S.

инженер-геодезист по специальности «Прикладная геодезия»

/ Engineer Surveyor of Applied Geodesy specialty

e-mail: nadeshdaISL@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время цифровые неметрические камеры стали применяться для решения некоторых задач фотограмметрии. Ключевым моментом использования таких камер для фотограмметрических измерений является выполнение их калибровки, для чего целесообразно использовать бесплатный программный комплекс, разработанный сотрудниками лаборатории компьютерной графики и мультимедиа МГУ. Основная цель проведенных исследований — разработка методики калибровки цифровых неметрических камер с использованием данного программного комплекса, которая позволит получать параметры фотоаппаратов для последующего применения их для проведения фотограмметрических измерений.

Ключевые слова: калибровка, неметрические камеры, фотограмметрические измерения, объемный калибровочный полигон, мобильный тестовый объект, уравнения коллинеарности, наземная топографическая съемка, обмерные черте-

жи, элементы внутреннего ориентирования, дисторсия объектива.

Abstract. Digital cameras non-metric now began to be applied to solve some problems of photogrammetry. Calibration non-metric of digital cameras — the main point in using these cameras for photogrammetric measurements. To solve this problem it is expedient to use a free software package developed by the laboratory staff of computer graphics and multimedia MSU. The main objective of studies - to develop a method of digital gauge nonmetric camera that uses the software package that will receive the parameters of cameras for photogrammetric measurements.

Keywords: calibration, non-metric cameras, photogrammetric measurement, volumetric calibration stand, a mobile test object, the collinearity equations, topographical surveying with a close range, drawings are compiled from measurements, the elements of inner orientation, lens distortion.

В настоящее время для решения некоторых задач фотограмметрии стали применяться неметрические малоформатные камеры.

Относительно недорогие бытовые цифровые аппараты обладают хорошими радиометрическими характеристиками и позволяют полу-

чать цветные изображения, минуя фотохимический лабораторный процесс, и загружать их непосредственно в компьютер. Это и стало причиной стремления использовать такие фотоаппараты для измерительных целей.

Для фотограмметрических измерений с помощью бытовых камер необходимо выполнять их калибровку с целью получения элементов внутреннего ориентирования (фокусного расстояния и положения главной точки) и параметров дисторсии объектива.

На сегодняшний день имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных этому вопросу. Авторами работ предлагаются различные подходы к выполнению калибровки неметрических малоформатных камер. Все подходы к решению задачи калибровки современных бытовых камер можно разделить на две основные группы: методы самокалибровки и методы непосредственно калибровки с использованием тестового объекта или калибровочного полигона.

Достаточно подробно суть предлагаемых методик самокалибровки и сравнительный анализ различных подходов изложены в работе Куркова В.М. «Методы учета систематических искажения аэроснимка. Самокалибровка».

«Суть аналитического метода самокалибровки,- как отмечает Курков В.М., - в учете систематических искажении координат аэроснимка в процессе уравнивания сети фототриангуляции, построенной по способу связок. В основе способа лежат уравнения коллинеарности. Сущность способа состоит в том, что одновременно определяются поправки к приближенным элементам внешнего ориентирования, координатам точек местности, элементам внутреннего ориентирования и суммарные поправки к координатам точек за влияние всех источников систематических ошибок». [3]

Положительным моментом методик самокалибровки является отсутствие необходимости создавать калибровочный полигон, т. к. все измерения производятся по полевым снимкам, для которых подбирается аппроксимационная модель, призванная исключить систематические ошибки из координат точек, измеренных на снимках. Но при этом способам самокалибровки присущ ряд недостатков.

Основная проблема — невозможность подбора универсальной аппроксимирующей функции не только для снимков, сделанных различными аппаратами, но и, порой, для снимков, сделанных конкретной съёмочной системой. [3]

Кроме того, подобранный полином порой не позволяет учесть сложный характер распределения систематических погрешностей в координатах по полю снимка, несимметричность этого распределения.

Более эффективным и надежным является способ калибровки по классической схеме с использованием тестового калибровочного полигона. Лабораторный полигон используется компанией Vexel для калибровки широкоформатных цифровых аэрофотоаппаратов UltracamX [6]. Калибровка бытовых цифровых фотоаппаратов с использованием тестового лабораторного полигона производится в ДОННТУ, для чего в одном из учебных кабинетов создан плоский калибровочный стенд. Для отыскания параметров калибровки камеры используется программа BlockMSG из программного комплекса DONETSKFOTO, разработанная профессором С.Г.Могильным [1].

В МИИГАИК для определения геометрических характеристик различных камер используется объемный тест-объект, состоящий более чем из 100 точек, а также специальная программа для определения параметров внутреннего ориентирования и дисторсии объектива [4].

Метод калибровки по объемному тест-объекту предлагают Р.Н.Гельман и А.Л.Дунц. Метод описан в статье «Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией». Лабораторный способ основан на съемке с близкого расстояния тест-объекта и измерения на снимке в ручном режиме пиксельных координат точек. Дальнейшая обработка результатов измерений основывается на уравнениях коллинеарности [2].

Предлагаемые методики калибровок основаны на сравнении эталонных и действительных параметров. Измерения по снимкам с изображениями тестового полигона позволяют учесть сложный характер распределения систематических ошибок. Вычисления, основанные на применении уравнений коллинеар-

ности логичны и понятны. Использование объемного тестового полигона позволяет провести полную калибровку аппарата, в результате которой станут известны элементы внутреннего ориентирования камеры и параметры дисторсии объектива, необходимые для последующих фотограмметрических измерений по снимкам, сделанным бытовым фотоаппаратом. Но подобные методики подразумевают построение дорогостоящего высокоточного калибровочного полигона и наличие программного комплекса, позволяющего автоматизировать процесс получения неизвестных параметров. При отсутствии последнего, калибровка станет неоправданно длительным и трудозатратным процессом. Увеличение трудозатрат приведет к увеличению стоимости проводимых работ, а это делает бессмысленным использование неметрических камер вместо специализированной аппаратуры, т. к. применение бытовых фотоаппаратов для измерительных целей подразумевает упрощение и понижение стоимости проводимых работ. Именно трудоемкость проводимых работ, необходимость иметь оборудованную лабораторию со стабильными марками, координаты которых определены с высокой точностью, составляли основную проблему способов лабораторной калибровки. В 2005 году эта проблема стала разрешима благодаря появлению программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox v 0.4. Авторы программы — сотрудники лаборатории компьютерной графики и мультимедиа при факультете ВМК МГУ — Велижев Александр и Вежнев Владимир. Программа является бесплатной. Она позволяет в автоматическом режиме вычислять внутренние параметры камер. Программа может использовать файлы форматов *.jpg, *.tiff, *.png, что позволяет использовать достаточно большой круг снимков со стандартными разрешениями. Результатами обработки снимков являются элементы внутреннего и внешнего ориентирования и коэффициенты дисторсии. [7]

Для выполнения калибровки требуется использовать достаточно простой в изготов-

лении мобильный калибровочный шаблон, представляющий собой шахматную текстуру, нанесенную на ровную поверхность (рис.1). Важен размер клетки рисунка, так как программа плохо распознаёт слишком мелкие клетки. Создатели программы рекомендуют делать клетки рисунка не менее 30 мм.

Также при изготовлении тест-объекта необходимо принять следующие рекомендации, указанные разработчиками [7]:

- 1) Белого пространства (рис.2) между наружной рамкой и границей объекта должно быть по ширине не менее одного квадрата.
- 2) Все квадраты должны быть чётко видны.
- 3) Желательно использовать при работе штатив.
- 4) Делать не менее 25 снимков в съёмочной серии.
- 5) При съёмке объекта стремиться заполнить его изображениями всю матрицу камеры.
- 6) Сохранять постоянный угол наклона плоскости матрицы камеры относительно плоскости тест-объекта.

В результате проведения практических работ было выявлено, что рекомендаций, данных авторами недостаточно для успешного выполнения калибровки камеры. Поэтому по результатам проведенных экспериментов были составлены дополнения к существующим рекомендациям.

Как заявлено в инструкции по применению программы [7], при съёмке объекта необходимо стремиться заполнить его изображениями всю матрицу камеры (рис.3). Это необходимо для того, чтобы в итоге, опознанные на каждом снимке точки, находящиеся в углах схождения белых и черных квадратов (будем для удобства в дальнейшем называть их «опорными точками»), покрывали в совокупности равномерно всю площадь матрицы (рис.4). Кроме того, необходимо сохранять постоянный угол наклона плоскости матрицы камеры относительно плоскости тест-объекта. Для выполнения этих условий, авторы программного комплекса предлагают вариант съёмки, показанный на рис.5.

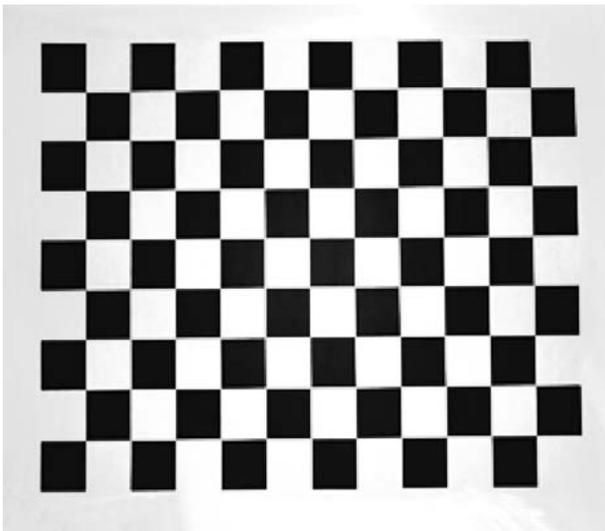


Рис. 1. Вид калибровочного шаблона

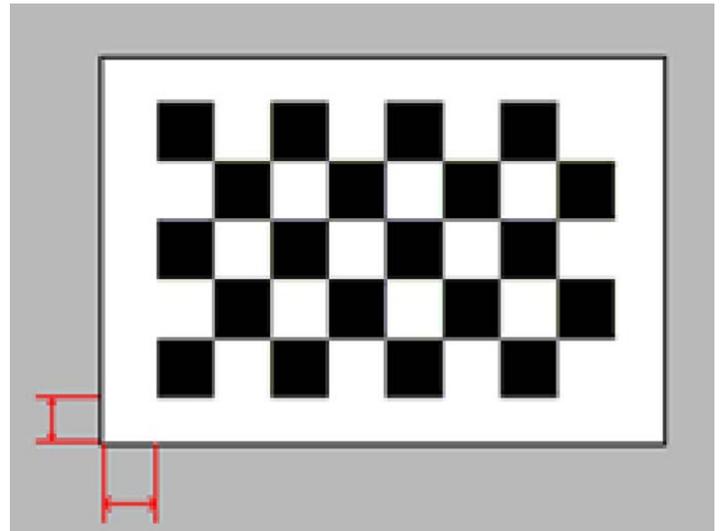


Рис. 2.

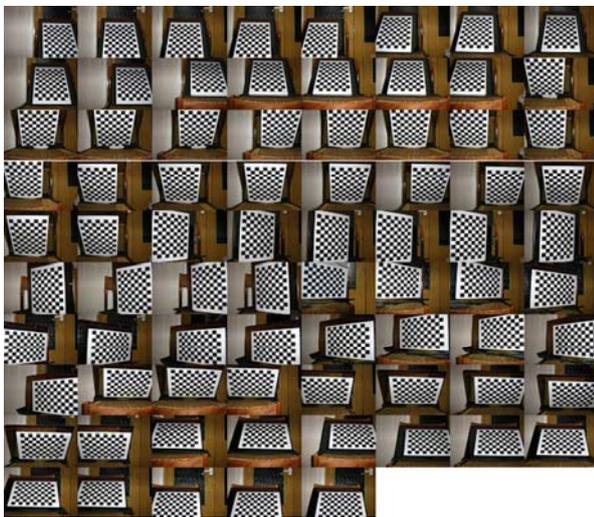


Рис. 3. Съемочная серия

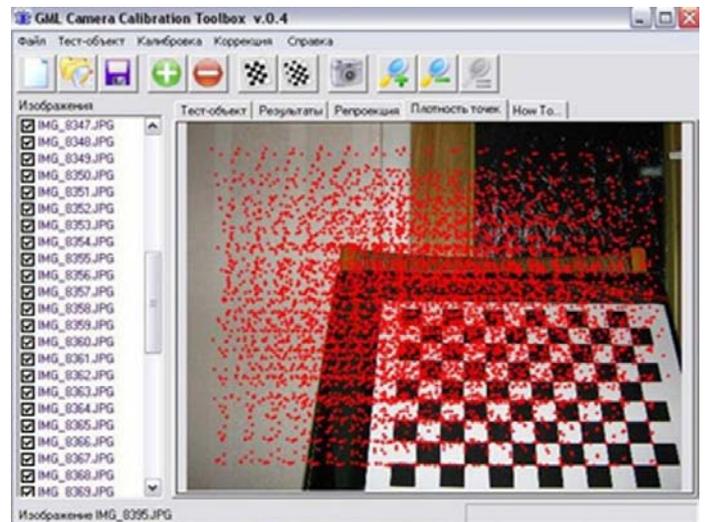


Рис. 4 — Плотность точек

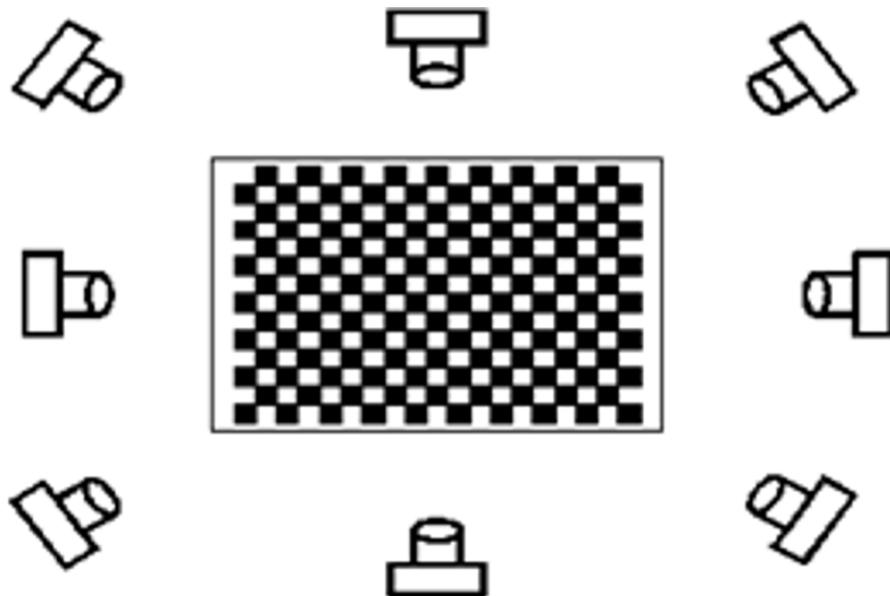


Рис. 5. Позиции фотографирования

В результате проведения подобной серии съемки, в программе будут обрабатываться варианты снимков объекта, показанные на рис. 6. Опытным путем было установлено, что на снимках типа б, г, д, е, ж, з, представленных на рисунке 6, тест-объект не распознается программой в ходе автоматического поиска опорных точек, и снимки такого типа отбраковываются при обработке.

Таким образом, для обработки остается два варианта экспозиции объекта, чего недостаточно для правильного функционирования программы по замечанию самих авторов [7].

Это указывает, скорее всего, на то, что программа производит поиск «опорных точек» по способу построчного распознавания: при обработке снимка на нем распознается правый нижний угол тест-объекта с белым

квадратом, и, по идеальным известным координатам положения точек, определяются области их поиска по строкам и столбцам. Это предположения основывается на том, что программой не распознаются изображения объекта, развернутые относительно рамок снимка под значительным углом. Поэтому при проведении калибровки аппаратов была использована иная методика съемки (рис. 7), в целом отвечающая требованиям, указанным авторами программного комплекса.

При этом было выполнено основное требование съемки: сохранялся постоянным угол наклона объекта к плоскости матрицы камеры, а съемочная серия состояла при этом из снимков с восьмью различными позициями объекта.

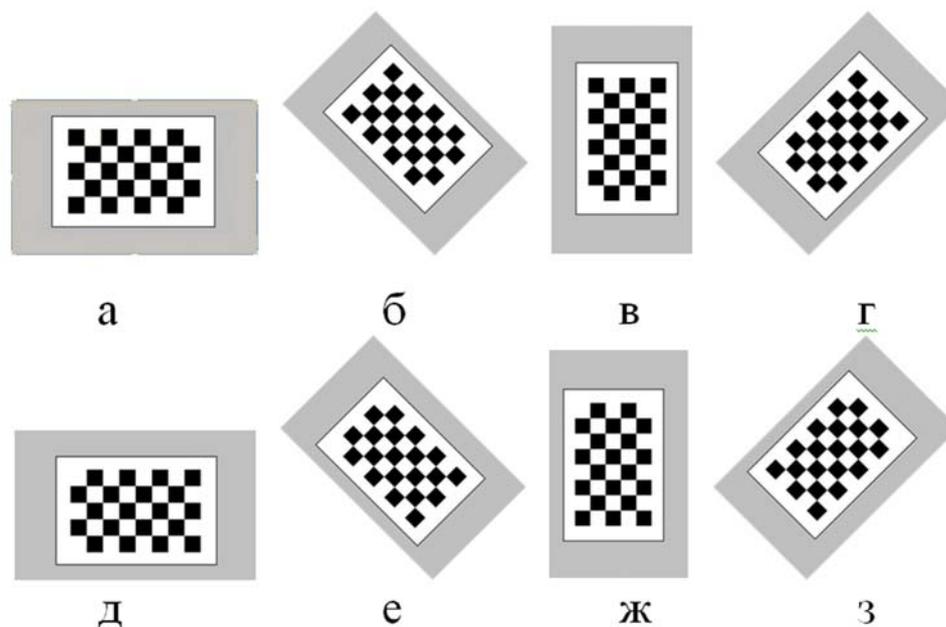


Рис. 6. Расположение изображения тест-объекта относительно рамок снимка

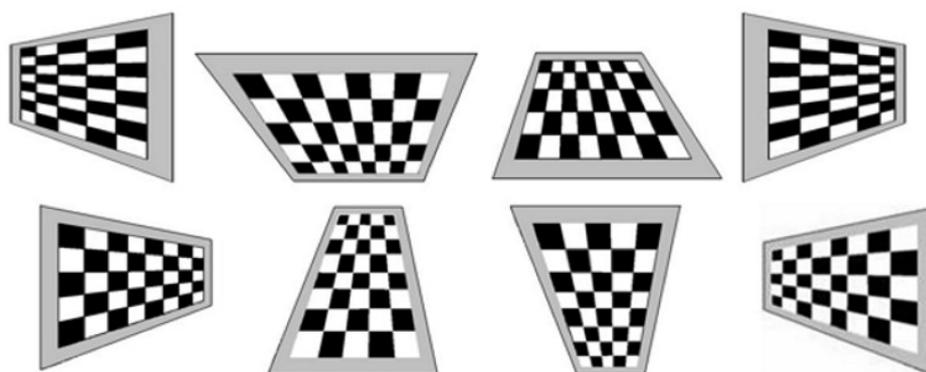


Рис. 7. Экспозиции объекта

Создатели программы рекомендуют перемещать объект относительно камеры для полного заполнения его изображения матрицы аппарата. При выполнении работы было выявлено, что удобнее и практичнее тест объект устанавливать и закреплять под определенным углом, а перемещать саму камеру со штативом (штатив с двумя цилинд-

рическими уровнями для фотокамер) в плоскостях, параллельных стенду.

Опытным путем было выявлено, что программа при автоматическом поиске точек бракует снимки с изображением шахматного рисунка, расположенным под углом к плоскости снимка менее 5° (на рис. 8 показаны углы наклона тест-объекта).

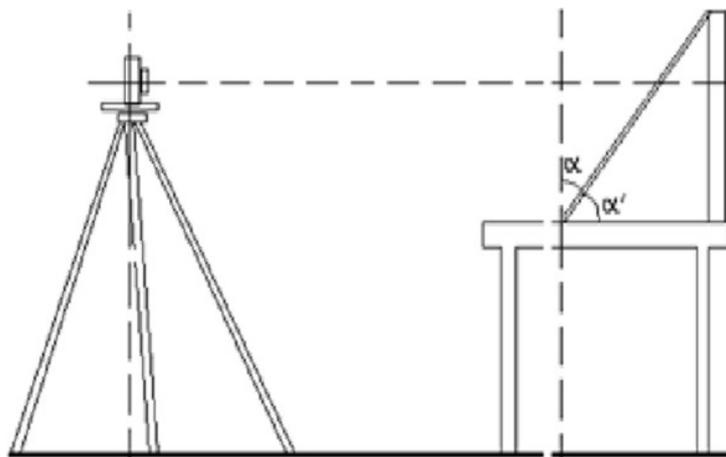


Рис. 8. Угол наклона тест-объекта

В результате выполненных работ были составлены следующие рекомендации, в дополнение к существующим, по выполнению калибровки цифровых фотоаппаратов с применением программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox v 0.4:

- 1) клетки текстуры должны быть четкими и яркими;
- 2) шахматный рисунок должен быть нанесен с максимальной точностью, так чтобы клетки имели одинаковый, заранее определенный размер, а любые отклонения от эталонного размера были столь незначительными, чтобы это не влияло на качество работы программы, т.к. программный комплекс не предусматривает ввод фактической величины клетки тест-объекта, или ввода поправок за отклонение размера клеток от номинальной величины, и объект по умолчанию рассматривается как идеальный;
- 3) съемка должна производиться в хорошо освещенном помещении, желательно дневным светом. Лучшие результаты также дает фотографирование со вспышкой;
- 4) перед выполнением съемки аппарат необходимо перевести в ручной режим съемки

и, по возможности, отключить дополнительные автоматические настройки (например «интеллектуальное увеличение снимков»), которые, вероятно, вносят коррективы в полученное изображение, особенно, если эти исправления производятся за счет каких-либо пиксельных пересчетов;

- 5) необходимо отключить автофокусировку в исследуемом аппарате и, если это возможно, установить фокусирование «на бесконечность» (или установить то фокусное расстояние, которое впоследствии будет применяться для работы);
- 6) для более точной установки аппарата желательно использовать штатив с уровнями для фото- и видеокамер;
- 7) желательно установить тест-объект на ровной горизонтальной поверхности с возможностью надежной фиксации угла наклона или разворота;
- 8) необходимо менять экспозиции объекта, сохраняя постоянным значение угла наклона плоскости объекта к плоскости снимка.

При одной экспозиции необходимо, чтобы из трех возможных углов наклона и разворота плоскости объекта относительно плоскости

снимка, в идеале только один из углов наклона отличался от нуля (при этом плоскость объекта не может быть развернута относительно рамок снимка). Если у объекта угол наклона и разворота приблизительно одинаковые или оба угла наклона имеют сопоставимые значения, отличные от нуля, калибровка при таких условиях не даст истинных результатов.

С использованием данного программного комплекса в ходе исследовательских работ калибровались две бытовые камеры Canon PowerShot A 410 и Sony Caber-Shot W 210, имеющие стандартную оптику среднего класса, с характеристиками объективов, присущими большинству современных неметрических съёмочных систем. Аппараты позволяют выполнять съёмку при полных ручных установках, отключая автоматическую фокусировку. Обе камеры имеют встроенный стабилизатор. Различные варианты проведенных съёмок с использованием указанных фотоаппаратов позволили получить стабильные в пределах нескольких пикселей значения элементов внутреннего ориентирования. Значения коэффициентов дисторсии варьируются от съёмки к съёмке в пределах десятитысяч-

ных пикселя, что связано с меньшей, субпиксельной, разрядностью самих величин.

По итогам проведенных опытов можно заявить о возможности калибровки неметрического фотоаппарата с использованием программного комплекса GML Camera calibration Toolbox v 0.4. Для того чтобы сделать выводы о качестве полученных результатов, необходимо было произвести их оценку точности. Для этого был выполнен ряд съёмок в одинаковых условиях. Исследовались те же фотоаппараты: Canon PowerShot A 410 с разрешением матрицы 3,2 мпкс и Sony Caber-Shot W 210, с разрешением матрицы - 12,1 мпкс, - при двух фиксированных установках предельного фокусного расстояния объектива каждый. Для аппарата фирмы Canon и аппарата фирмы Sony было выполнено по 10 съёмочных серий для каждой из двух фиксированных установок предельных фокусных расстояний. Съёмка производилась при стабильном угле наклона объекта в одинаковых условиях при 8 позициях объекта в одной серии.

Все съёмочные серии обрабатывались в программе GML Camera Calibration toolbox v 0,4. Полученные значения оценивались по формуле Бесселя. Результаты проведенных работы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементы внутреннего ориентирования и коэффициенты дисторсии

	Canon PowerShot A410				Sony Caber-Shot W 210			
	f max	fмм	5,4	mf(мкм)	4,4	fмм	5,35	mf(мкм)
fpix		2505	mf(pix)	2	fpix	3542	mf(pix)	5
x		1022	mx(pix)	2	x	1986	mx(pix)	5
y		747	my(pix)	1	y	1533	my(pix)	5
k1		-0,128	mk1(pix)	±0,002	k1	-0,204	mk1(pix)	±0,002
k2		+0,059	mk2(pix)	±0,009	k2	+0,187	mk2(pix)	±0,004
t1		+0,0001	mt1(pix)	±0,0001	t1	+0,0008	mt1(pix)	±0,0003
t2		-0,001	mt2(pix)	±0,001	t2	-0,0005	mt2(pix)	±0,0002
f min	fмм	17,3	mfмм	28,6	fмм	21,4	mfмм	17,1
	fpix	7760	mf(pix)	13	fpix	13054	mf(pix)	11
	x	1010	mx(pix)	8	x	1008	mx(pix)	8
	y	810	my(pix)	6	y	808	my(pix)	6
	k1	-0,018	mk1(pix)	±0,005	k1	+1,105	mk1(pix)	±0,008
	k2	-0,9	mk2(pix)	±0,2	k2	-6,70	mk2(pix)	±0,38
	t1	-0,0010	mt1(pix)	±0,0002	t1	+0,008	mt1(pix)	±0,001
	t2	-0,0044	mt2(pix)	±0,0002	t2	-0,005	mt2(pix)	±0,001

По полученным данным для приближенных расчетов можно вычислить для каждого из калиброванных фотоаппаратов размер пикселя в микрометрах.

Так для фотоаппарата Canon PowerShot A 410 на объективе фотоаппарата указаны предельные фокусные расстояния: 5,4 мм и 17,3 мм. Их значения в пикселях, полученные в результате калибровки – 2505 pix и 7763 pix, соответственно. Тогда можно составить пропорцию:

$$\frac{1\text{pix}}{f\text{pix}} = \frac{x_{\text{мм}}}{f_{\text{мм}}} \quad (1)$$

Используя оба предельных фокусных расстояния и подставляя их значения в пикселях и миллиметрах в уравнение (1), получим 1 pix = 2,2 мкм.

Аналогично рассчитывался размер пикселя для фотоаппарата Sony Cyber-Shot W 210. На объективе фотоаппарата указаны предельные фокусные расстояния: 5,35 мм и 21,4 мм. Их значения в пикселях, полученные в результате калибровки – 3542 pix и 13054 pix, соответственно. Тогда можно составить пропорцию (1), и получить в результате 1 pix = 1,55 мкм. По итогам проведенной оценки точности возможно утверждать, что для камеры Canon PowerShot A410 элементы внутреннего ориентирования (ЭВНО) получены со средней квадратической ошибкой не превышающей СКП измерения координат точек на снимках. Кроме того, указанная точность получения ЭВНО для камеры фирмы Canon соответствует точности определения ЭВНО метрических камер (как правило 2 — 5 мкм). На основе этого, можно сделать вывод о возможной достаточно высокой точности определения элементов внутреннего ориентирования с использованием программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox v 0.4. и о целесообразности применения данного комплекса для полной калибровки бытовых цифровых камер. Но при этом необходимо учесть, что программный комплекс GML Camere Callibration Toolbox v 0.4 создавался

не для решения задач фотограмметрии; авторы программы не раскрывают те алгоритмы, которые заложены в процесс вычисления параметров камеры и в процесс исправления с их использованием снимков за дисторсию. Кроме того, в протоколах программы, содержащих элементы внутреннего ориентирования и коэффициенты дисторсии, указаны точности определения этих параметров, и согласно представляемым данным, значения ошибок – субпиксельные величины, — тогда как по результатам оценки точности получаемых величин по отклонениям от среднего (по формуле Бесселя) опытным путем были получены средние квадратические погрешности определения величин в пределах нескольких пикселей. В связи с этим необходимо было провести калибровку испытываемых камер по иной, альтернативной программе, с целью подтверждения или опровержения полученных результатов. Для этого был создан объемный калибровочный полигон ГУЗ-12 (в аудитории 12 кафедры аэрофотогеодезии ГУЗа), представляющий собой 190 закоординированных марок (рис. 9) с СКП положения марки $m_p = 5$ мм. Полигон позволяет обеспечить различие координат по удаленности в 3 м при максимальном удалении от средней плоскости полигона в 7м.

Определение элементов внутреннего и внешнего ориентирования и параметров дисторсии по результатам измерений изображений опорных точек на цифровых снимках основано на совместном решении системы уравнений, которые составляются для каждой измеренной на цифровом снимке точки тест-объекта. Эти уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{\text{выч}} - (x_{\text{изм}} + V) &= 0; \\ z_{\text{выч}} - (z_{\text{изм}} + V) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

или, выражая вычисленные координаты изображения с использованием уравнений коллинеарности:

$$\begin{aligned} x_0 + f \frac{a_1(X^r - X_s^r) + a_2(Y^r - Y_s^r) + a_3(Z^r - Z_s^r)}{b_1(X^r - X_s^r) + b_2(Y^r - Y_s^r) + b_3(Z^r - Z_s^r)} - (x_{\text{изм}} + dx) &= 0; \\ x_0 + f \frac{a_1(X^r - X_s^r) + a_2(Y^r - Y_s^r) + a_3(Z^r - Z_s^r)}{b_1(X^r - X_s^r) + b_2(Y^r - Y_s^r) + b_3(Z^r - Z_s^r)} - (x_{\text{изм}} + dx) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где dx, dz — поправки в измеренные на снимке координаты x, z изображения точки тест-объекта за дисторсию объектива:

$$\begin{aligned} dx &= (x - x_0)(r^2 k_1 + r^4 k_2) + \\ &+ [r^2 + 2(x - x_0)^2] p_1 + 2[(x - x_0)(z - z_0)] p_2; \quad (4) \\ dz &= (z - z_0)(r^2 k_1 + r^4 k_2) + \\ &+ 2[(x - x_0)(z - z_0)] p_1 + [r^2 + 2(z - z_0)^2] p_2, \end{aligned}$$

в которых k_1, k_2 — коэффициенты радиальной дисторсии; p_1, p_2 , — коэффициенты тангенциальной дисторсии объектива, r — радиус-вектор точки:

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}. \quad (5)$$

Для решения уравнений вида (3) необходимо располагать геодезическими координатами марок и координатами изображений опорных точек, измеренными на цифровых снимках. Последние предварительно необходимо исправить за дисторсию. Для этого, используя уравнения вида (4), с помощью которых вычисляются поправки в координаты, измеренные на снимках.

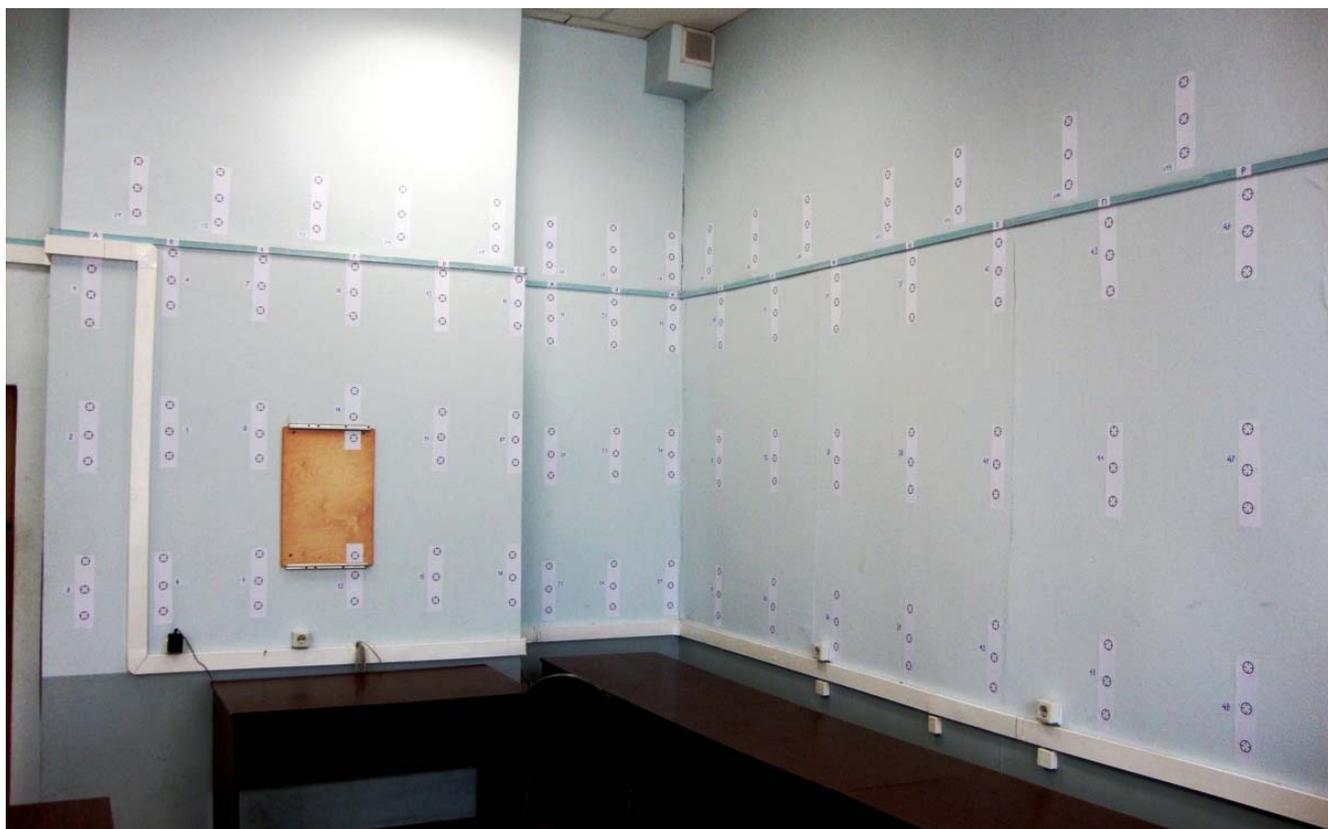


Рис. 9. Полигон ГУЗ-12

Для калибровки по альтернативной методике был выбран аппарат Canon PowerShot A 410, как обладающей объективом с меньшей дисторсией.

Для упрощения вычислений сначала были рассчитаны поправки за дисторсию объектива в координаты точек, измеренные на снимках. После проведения ряда приближений были получены окончательные значения, позволяющие вычислить геодезические координаты марок тестового полигона с точностью не хуже точности определения этих координат геодезическим методом. Поэтому

координаты, измеренные на неисправленных снимках камеры Canon PowerShot A 410 на ЦФС «Талка» в системе координат снимка и исправленные в результате пересчетов, возможно считать свободными от дисторсии. Эти координаты в дальнейшем использовались для вычисления ЭВО и ЭВНО изображений.

Связь координат точек полигона и изображений марок на снимках выражается уравнениями коллинеарности для наземной съемки:

$$\begin{aligned}
 X^G &= X_S^G + (Y^G - Y_S^G) \frac{a_1(x - x_0) + a_2f + a_3(z - z_0)}{b_1(x - x_0) + b_2f + b_3(z - z_0)}, \\
 Z^G &= Z_S^G + (Y^G - Y_S^G) \frac{c_1(x - x_0) + c_2f + c_3(z - z_0)}{b_1(x - x_0) + b_2f + b_3(z - z_0)}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Неизвестными в данном случае будут являться пятнадцать элементов данных уравнений: X_S^G, Y_S^G, Z_S^G , - геодезические координаты центра фотографирования; a_i, b_i, c_i - направляющие косинусы функции угловых элементов внешнего ориентирования; x_0, z_0, f - элементы внутреннего ориентирования. Известными будут выступать геодезические координаты марок полигона X^G, Y^G, Z^G , и координаты изображений марок, измеренные на снимке x и z . Можно пойти классическим путем и составить уравнения поправок, продифференцировав уравнения (6) относительно пятнадцати неизвестных. В результате получатся громоздкие выражения, вычисление которых является весьма трудоёмким. В целях упрощения вычислений возможно воспользоваться функцией «Поиска решений» в Excel стандартного пакета Office. Модуль «Поиск решения» направлен на оптимизацию вычислений и позволяет находить решения нелинейных уравнений, используя их в прямом виде. Очевидно, что для определения пятнадцати неизвестных не нужно будет составлять дифференциальные уравнения. Дос-

таточно правильно установить целевую функцию и ограничения.

В результате решения системы уравнений в программируемом калькуляторе Excel, получаем поправки к приближенным значениям ЭВО и ЭВНО, и, затем, сами значения. Таким образом были найдены элементы внешнего и внутреннего ориентирования по левому и правому снимкам стереопары с изображениями объемного калибровочного полигона ГУЗ-12, сделанным аппаратом Canon PowerShot A 410. Для нахождения неизвестных использовались координаты 18 точек, максимально близких к краю снимка. В результате получены значения искомых элементов, представленные в табл.2.

Элементы внешнего ориентирования, полученные в результате развития фототриангуляции на ЦФС «Талка» и элементы внутреннего ориентирования, полученные в результате калибровки с использованием программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox v 0.4, имеют значения, представленные в табл.3.

Сравнение результатов калибровок по двум методикам представлено в табл.4.

Таблица 2

Элементы внешнего и внутреннего ориентирования, полученные с использованием модуля «Поиск решения» в Excel

Левый снимок			Правый снимок				
x0 = -1,999	z0 = 21,000	f = 2505,000	x0 = -1,999	z0 = 21,000	f = 2505,000		
Xs = 12,845	Ys = 50,831	Zs = 99,160	Xs = 12,167	Ys = 52,191	Zs = 99,132		
Направляющие косинусы, как функции углов наклона и разворота снимков							
	1	2	3		1	2	3
a	-0,410725403	0,912158408	0,016216887	a	-0,382092605	0,923971810	0,005502470
b	0,912004570	0,410373095	-0,012336039	b	0,924482117	0,382142034	-0,014978065
c	0,019877427	-0,004567943	1,000000000	c	0,025738116	0,021810906	0,999404153

Таблица 3

Элементы внешнего и внутреннего ориентирования, полученные в результате калибровки и развития фототриангуляции на ЦФС «Талка»

Левый снимок			Правый снимок				
	$x_0 = -2$	$z_0 = 21$	$f = 2505$	$x_0 = -2$	$z_0 = 21$	$f = 2505$	
	$X_s = 12,863$	$Y_s = 50,843$	$Z_s = 99,161$	$X_s = 12,162$	$Y_s = 52,195$	$Z_s = 99,141$	
Направляющие косинусы, как функции углов наклона и разворота снимков							
	1	2	3	1	2	3	
a	-0,410814247	0,911707783	0,016295726	a	-0,38165598	0,923943180	0,005503556
b	0,911573422	0,410654617	-0,012316805	b	0,924183478	0,381909164	-0,014953538
c	0,019916859	-0,004535757	0,999791351	c	0,025840084	0,021780514	0,99965094

Таблица 4

Расхождения в полученных разными способами ЭВО и ЭВНО

левый снимок				правый снимок		
Δx_0	Δz_0	Δf		Δx_0	Δz_0	Δf
0,001	0	0		0,001	0	0
ΔX_s	ΔY_s	ΔZ_s		ΔX_s	ΔY_s	ΔZ_s
-0,018	-0,012	-0,001		0,005	0,004	-0,009
$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$		$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$
8,88E-05	0,000451	-7,9E-05	Δa	-0,00044	2,86E-05	-1,1E-06
0,000431	-0,00028	-1,9E-05	Δb	0,000299	0,000233	-2,5E-05
-3,9E-05	-3,2E-05	0,000209	Δc	-0,0001	3,04E-05	-0,00025

На основании расчетов, приведенных в табл. 4, можно сделать вывод, что значения линейных ЭВО, найденных при помощи «Поиска решений» (табл.2) отличаются от ЭВО, полученных из фототриангуляции (табл.3) в пределах двух сантиметров (ограничение поправок в линейные ЭВО : ± 5 см). Угловые ЭВО различаются в пределах нескольких единиц в степени 10^{-4} , что даст различие в ЭВО в пределах нескольких минут. При этом элементы внутреннего ориентирования, найденные «Поиском решений» практически не отличаются от элементов, полученных в результате калибровки при помощи комплекса GML Camera Calibration toolbox v 0.4.

На основании этого можно заключить, что программный комплекс GML Camera Calibration toolbox v 0.4 является рабочим аппаратом, с помощью которого возможно получать элементы внутреннего ориентирования с достаточно высокой точностью. Кроме того, программный комплекс позволяет исправлять цифровые изображения за влияние

дисторсии объектива. В случае, когда дисторсия не слишком велика, изображения освобождаются от её влияния практически полностью. Исправление координат за дисторсию по второй методике (с использованием объемного полигона) – довольно трудоемкий процесс, подразумевающий вычисление индивидуальных коэффициентов дисторсии для каждого снимка (т. к. опытным путем было установлено, что коэффициенты дисторсии для снимков, сделанных одной съёмочной системой, не инвариантны). Тогда как исправление снимков в впрограммном комплексе GML дает результаты не хуже, чем методика с использованием полигона ГУЗ-12, но позволяет одновременно в автоматическом режиме скорректировать все изображение.

Поэтому можно утверждать, что GML Camera Calibration toolbox v 0.4 вполне целесообразно применять для калибровки бытовых неметрических камер, с целью использования последних для нужд геодезии и архитектуры.

Целесообразность применения программного комплекса GML для полной калибровки и последующего исправления снимков за дисторсию подтверждают также данные, приведенные в табл.5, которая содержит результаты следующего этапа работ. Следующим этапом работ являюсь проведение оценки точности получаемых по бытовым снимкам координат. Для этого были получены стереопары на полигон ГУЗ-12, которые в дальнейшем обрабатывались на ЦФС Талка. При развитии фототриангуляции по стереопарам,

использовались ЭВНО, полученные в результате калибровки, а стереопары состояли из снимков, исправленных за дисторсию в программном комплексе GML Calibration. Точность оценивалась по отклонениям координат, полученных в результате развития фототриангуляции от координат марок, полученных в результате тахеометрической съемки. Оцененная таким образом средняя квадратическая погрешность координат по исправленным снимкам составила порядка 6 мм (табл.5) для обоих фотоаппаратов.

Таблица 5

Оценка точности геодезических координат (по результатам обработки на ЦФС «Талка»)

Canon PowerShot A 410						Sony Caber-Shot W 210					
Снимки исправлены за дисторсию						Снимки исправлены за дисторсию					
mх(мм)	4,89	mm (мм)	0,03	mp	6,2	mх (мм)	28	mm (мм)	2	mp	30
my(мм)	3,38	mm (мм)	0,02	(мм)		my (мм)	8,9	mm (мм)	0,6	(мм)	
mz (мм)	1,72	mm (мм)	0,01			mz (мм)	6,5	mm (мм)	0,4		

Необходимо отметить, что по стереопарам вычислялись все три геодезические координаты X, Y, Z марок.

Для разработки технических проектов реставрации крупных архитектурных ансамблей обмерные чертежи составляются в масштабах 1:100 и 1:200. Для выполнения обмерных работ на стадии рабочих чертежей планы сооружений составляются в масштабах 1:20, 1:50. [5]

Точность обмерных чертежей указанных масштабов обеспечивается определением координат точек с погрешностью 5-20 мм, что соответствует той точности, которую возможно получить камерой среднего класса, откалиброванной с помощью мобильного тест-объекта и программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox v 0.4. Поэтому можно утверждать, что обмерные чертежи архитектурных сооружений и археологических памятников целесообразно составлять с использованием цифровых бытовых малоформатных камер, что значительно удешевит и облегчит проводимые работы. Наиболее проблемный до сегодняшнего дня вопрос, – вопрос калибровки неметрических камер и исправления искаженных дисторсией изображений, - успешно и эффективно решается с помощью простого в исполнении тестового

объекта и бесплатного софта GML Camera Calibration Toolbox v 0.4.

Список литературы

1. Сагайдак Д.И. Исследование и калибровка цифровых камер / Портал магистров ДонНТУ
2. Гельман Р.Н., Дуңц А.Л. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. М., 2002. - №7, с.23-31.
3. Курков В.М. Методы учета систематических искажения аэроснимка. Самокалибровка. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. М., 1980. - №6. с.75-79
4. Михайлов А. П., Чибуничев А.Г., Курков В.М. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии
5. Руководство по применению фотограмметрических методов для составления обмерных чертежей инженерных сооружений / Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве ПНИИИС Госстроя СССР. М., 1984.
6. Richard Ladstädter, Michael Gruber Geometric aspects concerning the photogrammetric workflow of the digital aerial camera ULRTACAMx.
7. V.Vezhnevets, A.Velizhev GML C++Camera Calibration Toolbox, 2005 (<http://research.graphicon.ru/calibration/gml-c++-camera-calibration-toolbox.html>).