

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ФОТОКАМЕРЫ ДЛЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

С.А. Кадничанский («Геоскан»)

В 1973 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист». После окончания института работал в Госцентре «Природа», с 1979 г. — в ЦНИИГАиК, с 1993 г. — в РосНИЦ «Земля», Центре «ЛАРИС», с 2002 г. — в ФГУП «Госземкадастръемка» — ВИСХАГИ, с 2005 г. — в компании «Геокосмос», затем — в НП АГП «Меридиан+» и ФГУП «ГосНИИ авиационных систем», с 2015 г. — в ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». С 2018 г. работает в ООО «Геоскан», в настоящее время — заместитель генерального директора по аэрофотогеодезии. Кандидат технических наук.

М.В. Курков («Скан»)

В 2004 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист». После окончания университета работал в ЗАО НПП «Центр прикладной геодинамики», с 2007 г. — в ООО НП АГП «Меридиан+», с 2013 г. — в ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ». С 2016 г. работает в ООО «Скан», в настоящее время — начальник научно-исследовательского отдела.

В.М. Курков (МИИГАиК)

В 1978 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист». После окончания института учился в аспирантуре, затем работал на кафедре геодезии МИИГАиК. В настоящее время — доцент кафедры фотограмметрии МИИГАиК. Кандидат технических наук.

А.Г. Чибунчев (МИИГАиК)

В 1974 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист». После окончания института работает в МИИГАиК, с 2005 г. по настоящее время — заведующий кафедрой фотограмметрии. Доктор технических наук, профессор.

В настоящее время вопросы калибровки камер достаточно хорошо изучены. Существует множество различных подходов их решения. Для калибровки цифровых фотокамер (далее — фотокамер) применяют пространственные и плоские тест-объекты [1], а для описания систематических ошибок координат точек снимка — полиномы различных степеней [2–6], в том числе полиномы, описы-

вающие дисторсию объектива [7], или ряды Фурье [8].

Считается, что наилучший результат калибровки фотокамер можно получить, используя метод, основанный на решении обратной фотограмметрической засечки по снимкам пространственного тест-объекта. Другой подход, который дает хорошие результаты, — это калибровка на основе уравнивания блока фототриангуляции, построенно-

го по аэрофотоснимкам испытательного полигона. В настоящее время, когда для аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов (БВС) широко применяются компактные фотокамеры, не предназначенные производителем для аэрофототопографической съемки и не обеспеченные данными заводской фотограмметрической калибровки, этот метод представляется наиболее эффективным. Наличие коорди-

нат центров фотографирования аэрофотоснимков, определяемых с помощью бортового приемника ГНСС с достаточно высокой точностью и используемых в качестве опорных данных, а также большое количество аэрофотоснимков, позволяет вполне оптимистично оценивать качество такой калибровки.

Ниже приводятся результаты исследований по калибровке и самокалибровке фотокамеры Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2 на основе аэрофототопографической съемки испытательного полигона и даются рекомендации по характеристикам полигона и параметрам аэрофотосъемки, обеспечивающим калибровку с необходимой точностью.

▼ Оборудование, программное обеспечение и испытательный полигон

Фотокамера Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2 является частью программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Геоскан 101 Геодезия», предназначенного для аэрофототопографической съемки и получения цифровых ортофотопланов, цифровых моделей рельефа и других пространственных данных.

ПАК «Геоскан 101 Геодезия» состоит из следующих основных компонентов:

— БВС «Геоскан 101» (рис. 1);

— цифровой фотокамеры Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2 (рис. 2);

— приемника ГНСС Topcon OEM B111;

— программного обеспечения (ПО) Agisoft PhotoScan Professional 1.4.4 (в настоящее время распространяется как Agisoft Metashape Professional. — Прим. ред.).

Фотокамера, используемая для аэрофототопографической съемки, должна отвечать определенным требованиям, в том числе, таким, как наличие центрального (междулинзового)

затвора или иного способа одновременного экспонирования всех элементов светочувствительной матрицы, а также паспорта или сертификата, в котором указаны полученные в результате фотограмметрической калибровки значения следующих параметров:

— фокусное расстояние фотокамеры (f);

— координаты главной точки снимка (x_0, y_0) в системе координат фотокамеры;

— значения коэффициентов степенного полинома радиальной дисторсии, а также коэффициентов тангенциальной дисторсии (при наличии).

Фотокамера Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2 имеет следующие основные характеристики:

— тип объектива — ZEISS VarioSonnar T* (состоит из 8 элементов в 7 группах — 3 асферических элемента, включая усовершенствованные асферические элементы), имеет центральный затвор, несъемный;

Компанией «Геоскан» кафедре фотограмметрии МИИГАиК была поставлена задача исследовать возможность и качество фотограмметрической калибровки фотокамеры путем аэрофотосъемки калибровочного полигона с последующей фотограмметрической обработкой полученных материалов. Целью таких исследований, в том числе было обоснование оптимальных параметров полигона для фотограмметрической калибровки фотокамеры, требований к планово-высотной подготовке аэрофотоснимков, параметров аэрофотосъемки и процессу фотограмметрической обработки посредством ПО Agisoft PhotoScan.

Для калибровки использовался научно-исследовательский учебный комплекс «Заокский Геополигон» МИИГАиК, расположенный в Заокском районе Тульской области, имеющий следующие основные характеристики:



Рис. 1
БВС «Геоскан 101» с фотокамерой

— тип матрицы — CMOS-матрица Exmor R (35,9x24,0 мм);

— номинальное фокусное расстояние — 35 мм;

— размер матрицы — 7952x5304 пикселей;

— физический размер пикселя — 0,0045 мм.

Фокусировка объектива на бесконечность дополнительно жестко фиксирована.



Рис. 2
Фотокамера Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2



Рис. 3
Схема расположения полигона и маркированных опознаков

- площадь — 1 км²;
- число маркированных опознаков — 47;
- средняя квадратическая погрешность (СКП) определения пространственных координат маркированных опознаков относительно базовой станции ГНСС — 0,02 м;
- перепад высот — 70 м.

На рис. 3 показана схема расположения полигона и маркированных опознаков.

Подготовка полигона заключалась в обследовании пунктов Государственной геодезической сети и имеющихся опознаков, маркировании и измерении дополнительных опознаков, геодезической привязке базовых станций ГНСС, используемых для геодезического обеспечения аэрофотосъемки с целью определения координат центров фотографирования аэрофотоснимков бортовым ГНСС приемником.

▼ **Аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка**

Специалисты компании «Геоскан» выполняли аэрофотосъемку территории калибровочного полигона с помощью БВС «Геоскан 101» при высоте поле-

та 250 м и скорости 72 км/ч, двумя рядами взаимно перпендикулярных маршрутов в условных направлениях «север — юг» («с-ю») и «запад — восток» («з-в»), с продольным перекрытием (P_x) — 80% и поперечным перекрытием (P_y) — 70%. Для принятой высоты полета воздушного судна пространственное разрешение аэрофотоснимков на местности составляло 3,3 см.

В результате аэрофотосъемки территории калибровочного полигона было получено 717 снимков, из них — 360 снимков по 15 маршрутам в направлении «с-ю» и 357 снимков по 14 маршрутам в направлении «з-в».

Параметры калибровки фотокамеры определялись с помощью ПО Agisoft PhotoScan Professional 1.4.4., в котором реализована возможность вычисления в результате уравнивания блочной сети фототриангуляции следующих параметров фотограмметрической калибровки:

- фокусного расстояния фотокамеры (f);
- координат главной точки снимка (x₀, y₀);

— коэффициентов радиальной дисторсии (K₁, K₂, K₃);

— коэффициентов тангенциальной дисторсии (P₁, P₂), соответствующих модели дисторсии, описываемой следующими выражениями:

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy,$$

$$y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy,$$

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2},$$

где x, y — координаты, отсчитываемые от главной точки снимка, свободные от дисторсии, например, вычисленные по пространственным координатам точки местности.

▼ **Результаты исследований**

На основе имеющихся исходных материалов было выполнено уравнивание сети фототриангуляции с определением параметров калибровки по всем маршрутам в обоих направлениях с использованием в качестве опорных точек 45 маркированных опознаков. Стандартное отклонение исходных значений координат центров фотографирования аэрофотоснимков задавалось равным 8 см. Связующие точки выбирались автоматически, их общее число составило 1 935 143. Полученные после уравнивания средние квадратические значения остаточных расхождений в координатах опорных точек и средние квадратические значения поправок в координаты центров фотографирования приведены в табл. 1. Средние квадратические значения поправок в координаты центров фотографирования не превышают заданных стандартных отклонений их исходных значений. Это свидетельствует о том, что исходные координаты центров фотографирования были определены с точностью, характерной для СКП, близкими к значениям, приведенным в табл. 1. Среднее квадратическое значение поправки в измеренное положение точки на снимке

Результаты уравнивания фотограмметрической сети с использованием в качестве опорных точек 45 маркированных опознаков

Таблица 1

Х	Координаты		В плоскости ХУ	В пространстве ХУН	Количество
	У	Н			
Средние квадратические значения поправок в координаты центров фотографирования, см					
6,0	6,0	2,4	8,6	9,0	363
Средние квадратические остаточные расхождения в координатах опорных точек, см					
3,6	3,5	5,6	5,0	7,5	45

Результаты фотограмметрической калибровки

Таблица 2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Число опорных точек	45	45	45	15	15	15	0	0
Маршруты	«С-Ю», «З-В»	«З-В»	«С-Ю»	«С-Ю», «З-В»	«З-В»	«С-Ю»	«З-В»	«С-Ю»
f, пиксель	7539,64	7540,11	7540,14	7539,39	7539,84	7539,94	7539,25	7540,8
х ₀ , пиксель	20,02	20,02	19,33	20,00	19,98	19,36	20,12	19,62
у ₀ , пиксель	8,78	8,13	7,45	8,79	8,19	7,39	8,10	7,24
K1	-0,0502	-0,0519	-0,0502	-0,0502	-0,0519	-0,0502	-0,0511	-0,0500
K2	-0,1691	-0,1624	-0,1713	-0,1690	-0,1624	-0,1712	-0,1679	-0,1727
K3	0,2324	0,2230	0,2383	0,2324	0,2230	0,2382	0,2332	0,2407
P1	-0,00044	-0,00042	-0,00044	-0,00044	-0,00042	-0,00043	-0,00041	-0,00043
P2	0,00063	0,00066	0,00065	0,00063	0,00066	0,00064	0,000665	0,00064

составило 1,7 пикселя. На рис. 4 показано векторное поле поправок в положения связующих точек на снимке после уравнивания, характеризующее распределение остаточной дис-

торсии. Вычисленные значения параметров фотограмметрической калибровки приведены в табл. 2 (вариант 1).

В вариантах 2 и 3 уравнивания фотограмметрической сети

использовались отдельно снимки маршрутов разных направлений. Полученные значения параметров калибровки по этим маршрутам, приведенные в табл. 2, показывают, что результаты для разных направлений маршрутов существенно (до 1,3 пикселя) отличаются для у₀ от значения, полученного в варианте 1, и характеризуют ненадежность решения по одному направлению маршрутов по сравнению с решением по двум направлениям.

В варианте 4 число опорных точек (маркированных опознаков) было уменьшено до 15 при их равномерном расположении по калибровочному полигону, включая углы блока фототриангуляции. Значения полученных параметров калибровки, представленные в табл. 2 (вариант 4), очень близки к значениям варианта 1, в котором в качестве опорных точек использовалось 45 маркированных

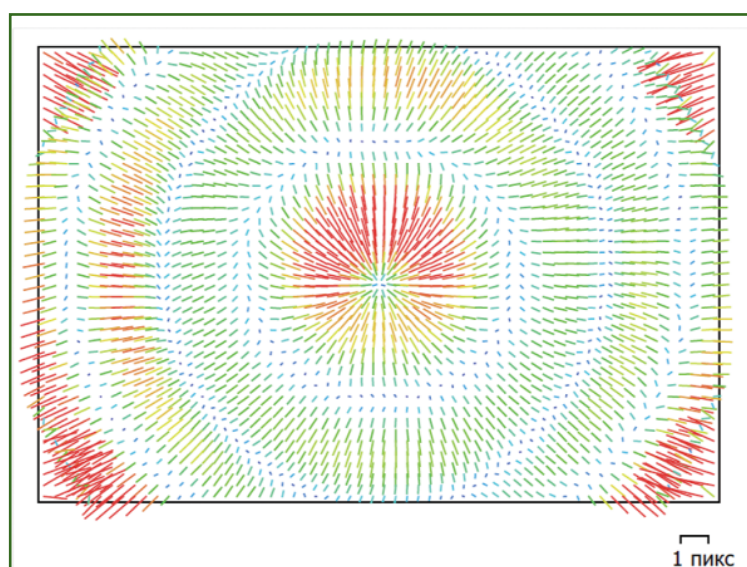


Рис. 4

Характерная картина векторного поля поправок в положения связующих точек на снимке после уравнивания

Результаты контрольного уравнивания фотограмметрической сети по разным направлениям маршрутов с самокалибровкой без использования опорных точек

Таблица 3

<i>Направление маршрутов «с-ю»</i>					
X	Координаты		В плоскости XY	В пространстве XUN	Количество
	Y	H			
Средние квадратические значения поправок в координаты центров фотографирования, см					
6,6	7,8	2,7	10,3	10,6	363
Средние квадратические остаточные расхождения на контрольных точках, см					
4,8	4,9	8,2	6,9	10,7	46
<i>Направление маршрутов «з-в»</i>					
X	Координаты		В плоскости XY	В пространстве XUN	Количество
	Y	H			
Средние квадратические значения поправок в центры фотографирования, см					
6,8	5,8	2,9	8,9	9,4	351
Средние квадратические остаточные расхождения на контрольных точках, см					
4,8	4,7	8,0	6,7	10,4	45
Средние квадратические остаточные расхождения на опорных точках при использовании параметров калибровки варианта 4, см					
4,6	3,8	7,3	6,0	9,5	42

опознаков. Уменьшение числа опорных точек до пяти дало результат, заметно отличающийся от вариантов 1 и 4. В вариантах 5 и 6 использовалось 15 маркированных опознаков, но фотограмметрическая сеть уравнивалась отдельно для каждого из направлений маршрутов. Полученные в варианте 6 (направление маршрутов «с-ю») значения некоторых параметров существенно отличаются от вариантов 1 и 4.

Затем была исследована возможность и качество уравнивания фотограмметрической сети с самокалибровкой без использования маркированных опознаков с контролем точности сети по 46 контрольным точкам (табл. 3). Полученные значения параметров калибровки представлены в табл. 2 (варианты 7 и 8). В варианте 7 с направлениями маршрутов «з-в» полученные значения параметров калибровки близки к значениям вариантов 1 и 4, значения элементов внутреннего ориентирования отличаются на величину от 0,1 до 0,68 пикселя, а средние квадратические расхожде-

ния на контрольных точках в обоих вариантах незначительно отличаются от средних квадратических расхождений на опорных точках при уравнивании сети совместно по снимкам двух направлений маршрутов с использованием фиксированных значений параметров калибровки, полученных в варианте 4. Это отличие вполне объяснимо тем, что в данном случае координаты маркированных опознаков не использовались в уравнивании, т. е. при уравнивании не решалась задача минимизации расхождений на опорных точках, неизбежно влияющая на результат. Таким образом, полученные в вариантах 7 и 8 результаты уравнивания позволяют сделать вывод о возможности проведения самокалибровки без использования маркированных опознаков при выполнении работ по аэрофототопографической съемке в обычном режиме.

Можно предположить, что некоторое понижение точности фототриангуляции, выполненной по снимкам с направлением полетов «с-ю», по сравнению с

направлением «з-в», объясняется тем, что в данной местности преобладает ветер в направлении запад-восток. Этот боковой ветер (в случае съемки в направлении «с-ю»), возможно, повлиял на точность определения координат центров фотографирования и на величину «смаза» изображения.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Определение параметров фотограмметрической калибровки фотокамеры по материалам аэрофотосъемки калибровочного полигона может быть использовано как метод фотограмметрической калибровки, обеспечивающий надежный результат с требуемой точностью, при котором элементы внутреннего ориентирования аэрофотоснимков определяются с погрешностью, менее физического размера пикселя. Необходимыми условиями при этом для цифровых фотокамер типа Sony Cyber-shot DSC-RX1RM2 являются:

— площадь территории полигона не менее 1 км²;

— наличие равномерно распределенных по территории полигона не менее 15 маркированных опознаков (опорных точек), координаты которых определены относительно базовой станции ГНСС с СКП не более 0,02 м;

— выполнение аэрофотосъемки двумя рядами взаимно перпендикулярных маршрутов;

— обеспечение продольного перекрытия снимков на 80%;

— обеспечение поперечного перекрытия снимков на 70%;

— определение координат центров фотографирования аэрофотоснимков бортовым приемником ГНСС с СКП не хуже 0,08 м.

2. При выполнении работ по аэрофототопографической съемке с определением координат центров фотографирования аэрофотоснимков бортовым приемником ГНСС с СКП не хуже 0,08 м возможно применение

режима самокалибровки, что обеспечивает точность конечного результата обработки материалов аэрофототопографической съемки, соизмеримую с точностью, достигаемой при уравнивании с использованием в качестве опорных точек маркированных опознаков.

3. Представляется целесообразным продолжить исследования по применению самокалибровки с целью формулирования конкретных рекомендаций для различных условий аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки.

▼ Список литературы

1. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия. Учебник для вузов / Под общей редакцией А.Г. Чибуничева. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. — 294 с.

2. Курков В.М. Методы учета систематических искажений аэро-снимка. Самокалибровка // Известия вузов. Геодезия и аэрофо-

тосъемка. — 1980. — № 6. — С. 75–79.

3. Ackermann, F. (1981): Block Adjustment with Additional Parameters. *Photogrammetria* 36 (6), pp. 217–227.

4. Clarke, T. & Fryer, J. (1998): The Development of Camera Calibration Methods and Models. *Photogrammetric Record* 16 (91), pp. 51–66.

5. El-Hakim, S. & Faig, W. (1977): Compensation of Systematic Image Errors Using Spherical Harmonics. *Proc. American Society of Photogrammetry, Fall Technical Meeting, Little Rock, Arkansas, 18–21 October*, pp. 492–499.

6. Ebner, H. (1976): Self-calibrating Block Adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen* 44 (4), pp. 128–139.

7. Brown, D. (1971): Close-range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering* 37 (8), pp. 855–866.

8. Dieter Fritsch (2015): Some Stuttgart Highlights of Photogrammetry and remote Sensing. *Photogrammetric Week '15*, Ed. D. Fritsch, Wichmann, Berlin/Offenbach, pp. 3–20.



Программа юбилейных мероприятий



Торжественное заседание, посвященное 100-летию Московского колледжа геодезии и картографии



Декада технического творчества



Выставка «Техническое творчество студентов»



Техническая конференция



Олимпиады и конкурсы среди студентов колледжа



Спортивные соревнования, посвященные юбилею колледжа



Классные часы «Преподаватели-выпускники колледжа»



Фото-конкурс, конкурс стенных газет



Чтения, посвященные истории российского профессионального картографо-геодезического образования



Литературный конкурс творческих работ студентов



Выставка работ художника В.Е. Лукьянова



Выставка старинных и современных геодезических приборов

Подробная информация на <http://100.mkgik.org>