

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КАЛИБРОВКИ КАМЕР, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК И МОДЕЛЕЙ ДИСТОРСИИ

Андрей Владимирович Семенцов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий научно-производственной лабораторией «ТЕМПУС» в Центре геоинформационных компетенций, тел. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

В статье предлагается новая методика, позволяющая выполнять сравнение параметров, полученных разными методиками калибровки камер. Суть методики заключается в сопоставлении восстановленных связок лучей. Приведены результаты практических экспериментов.

Ключевые слова: калибровка камер, сравнение параметров, связка лучей, внутреннее ориентирование снимков, дисторсия объектива.

COMPARISON OF CAMERA CALIBRATION PARAMETERS OBTAINED BY DIFFERENT METHODS AND MODELS OF DISTORTION

Andrey V. Sementsov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of scientific and production laboratory «TEMPUS» of the center of geoinformation competencies, tel. (960)779-06-79, e-mail: andsemencov@mail.ru

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. of department of physical geodesy and remote sensing, tel. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

The article proposes the new method which allows to perform a comparison of the parameters obtained by different methods of camera calibration. Essence of the method consists in comparing the reconstructed bundles of beams. The results of practical experiments are shown.

Key words: camera calibration, comparison of parameters, bundle of beams, interior orientation of images, lens distortion.

В настоящее время существует большое разнообразие методик калибровки цифровых камер [1,4,5,14]. Это обусловлено активным внедрением неметрических цифровых камер в производственный процесс – для решения различных измерительных задач [2,3,9,13].

При этом одним из сложных вопросов остаётся обоснование методов калибровки, так как не всегда можно провести полноценный анализ систем управ-

нений, положенных в их основу. Поэтому желательно выработать какой-либо критерий оценки достоверности исследуемых методов.

С измерительной точки зрения фотоаппарат является угломерным инструментом, то есть измеряет направления на все точки, изобразившиеся на снимке. Это обстоятельство подчёркнуто в термине «связка лучей», то есть изображение на снимке это всего лишь фиксация направлений на объекты местности («проектирующих лучей») на носителе («снимке»). Конечно, виды связок лучей бывают разные, как и поверхности, на которые изображение проектируется, но для центральной проекции все проектирующие лучи пересекаются в одной точке («центре проекции», «центре фотографирования») и, по существу, фотоаппарат является аналогом теодолита, только без ориентирующих устройств в виде уровней и компенсаторов.

Согласно определению, калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Так как фотокамера является угломерным инструментом, то и в качестве эталона должны выступать углы. В пределе, это совокупность всех угловых измерений, т.е. связка лучей.

Отличительной особенностью калибровки с использованием эталонной связки лучей следует отметить возможность определения неравномерной дисторсии, в пределе для каждой измеренной точки снимка.

Идеальными, согласно данной точки зрения, являются способы калибровки по звёздному небу (огромное количество «эталонных» углов) [7] и способ, в котором координаты центра фотографирования и точек на местности известны (это позволяет перейти к направлениям на точки) [4,5,14]. Также сюда можно отнести методы, использующие ганиометры.

Следует отметить, что широко распространённый способ калибровки по пространственному тест-объекту не использует эталонную связку лучей: связка лучей восстанавливается в соответствии с моделью дисторсии, соответственно данный способ в каноническом виде (по одному снимку) не способен определить неравномерную дисторсию.

Таким образом, учитывая угломерную функцию фотоаппарата, можно предположить способ сравнения результатов определения параметров дисторсии (включая элементы внутреннего ориентирования) на основе сопоставления связок лучей.

Алгоритм сравнения связок лучей при этом выглядит следующим образом:

- 1) переход от координат точек снимка к пространственным векторам с учётом модели дисторсии;
- 2) совмещение связок лучей путём «доворота» одной из связок в соответствии с оптимизирующей функцией;
- 3) для оценки точности совмещения связок лучей предлагается использовать СКО соответственных лучей, выраженных в секундах. Для малых значений углов можно использовать упрощённую формулу, основанную на разности нормированных векторов:

$$m''_{\Delta\alpha} = \sqrt{\frac{\sum \left\| \frac{\bar{X}_{2i}}{\|\bar{X}_{2i}\|} - \frac{\bar{X}_{1i}}{\|\bar{X}_{1i}\|} \right\|^2}{n}} \cdot \rho'', \quad (1)$$

где $m''_{\Delta\alpha}$ – СКО совмещения двух связок лучей;

$\bar{X}_{1i}, \bar{X}_{2i}$ – векторы направления на точку i для первой и второй связки лучей соответственно;

ρ'' – константа, необходимая для перехода от радиан к угловым секундам;

n – количество лучей в связке лучей.

Графическая схема сравнения связок лучей, полученных при разных наборах калибровочных параметров, приведена на рис. 1.

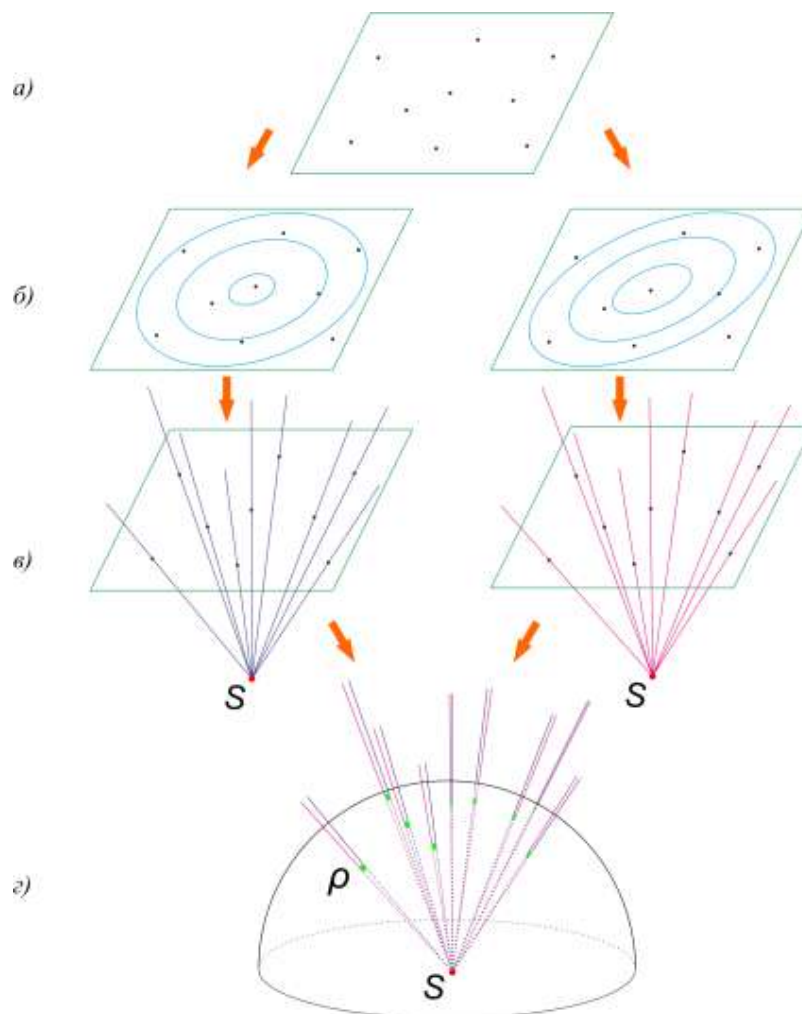


Рис. 1. Схема сравнения параметров калибровки по этапам:

а) определение расположения точек на снимке; б) исправление координат точек с учётом параметров дисторсии; в) восстановление связок лучей; г) сравнение полученных связок лучей

Также следует отметить, что сравнить результаты калибровки, полученные разными методиками, простым попарным сопоставлением параметров досто-

верно невозможно. В случае, когда для описания дисторсии в сравниваемых методах используются разные модели и, соответственно, разные коэффициенты, это в принципе не осуществимо. А в случае использования некой общей модели описания дисторсии параметры могут существенно отличаться, так как коэффициенты оказывают сложное, нелинейное влияние на значение дисторсии и иногда в значительной степени коррелируют друг с другом.

Для проверки работоспособности предложенной методики были проведены эксперименты по определению параметров калибровки разными способами с использованием реальных снимков для камеры Sony Alpha NEX-5R с объективом E 16mm F2.8:

- по снимку звёздного неба [7];
- по пространственному тест-объекту (классический подход);
- по плоскому тест-объекту [6];
- без использования координат опорных точек [10] с применением математического описания смещения центра фотографирования [11] и использованием дополнительного геометрического условия [8], согласно которому взаимное расположение марок соответствует шаблону [12].

Обработка данных по каждому варианту калибровки выполнена в вычислительной среде Equilibrium. В качестве модели искажений связки лучей использована полиномиальная модель радиальной дисторсии, принятая в ЦФС PNOTOMOD.

Согласно описанному выше подходу, сравнение результатов разных вариантов калибровки выполнялось путём сопоставления полученной связки лучей с эталонной. В качестве эталонной связки лучей использовались направления на звёзды, относительное положение которых, как известно, отличается высокой стабильностью.

Пример схемы расчета сравнения связок лучей представлен на рис. 2:

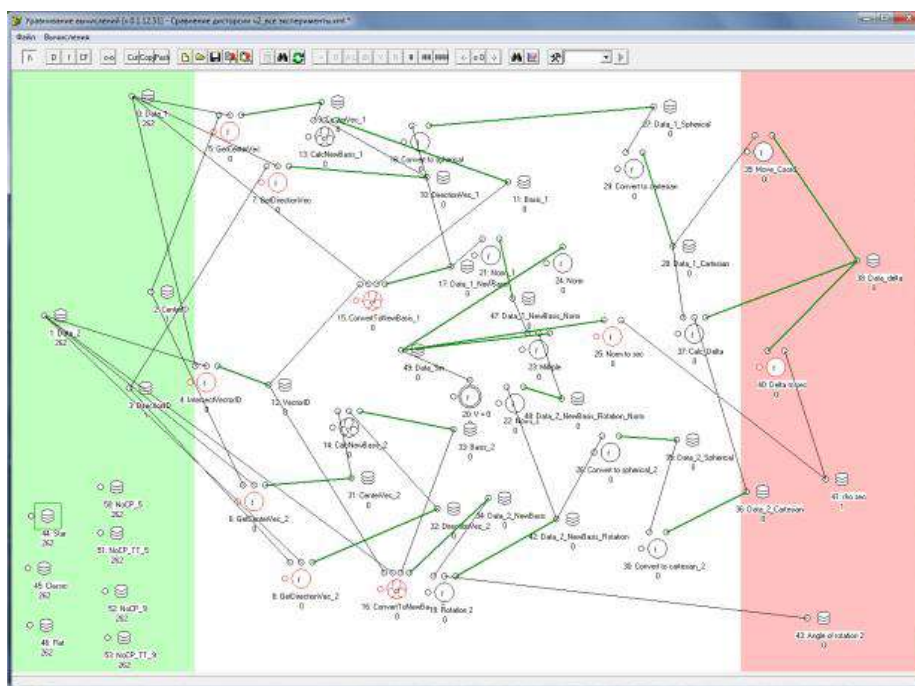


Рис. 2. Схема расчета сравнения связок лучей в программе Equilibrium

Полученные результаты оценки точности различных методик калибровки согласно формуле (1) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения полученных связей лучей с эталонной

Вариант калибровки	Количество снимков	Количество измеренных точек	μ , пикс	СКО, $m_{\Delta\alpha}$, "
По снимку звёздного неба	1	262	0,511	38,118
По пространственному тест-объекту (классический вариант)	3	436	0,483	75,799
По плоскому тест-объекту	2	277	0,397	86,952
Без координат опорных точек (с условием шаблона)	9	1044	0,779	50,386
Угловой размер центрального пикселя согласно расчетам составляет $\approx 62''$				

Из табл. 1 видно, что наилучшие результаты показали варианты калибровки по снимку звёздного неба и по девяти снимкам без использования координат опорных точек с применением условия шаблона. Остальные варианты показали близкие результаты: среднее квадратическое отклонение связей лучей от эталонной изменялись в пределах от $75''$ до $87''$.

Следует пояснить, что отклонение, полученное для варианта калибровки по снимку звёздного неба, объясняется погрешностями работы оператора при измерении координат точек на снимке, а также рефракцией атмосферы и незначительным смазом изобразившихся на снимке звёзд за счёт выдержки фотоаппарата в 4 секунды при экспонировании.

Пример результата сравнения связей лучей в графическом виде представлен на рис. 3.

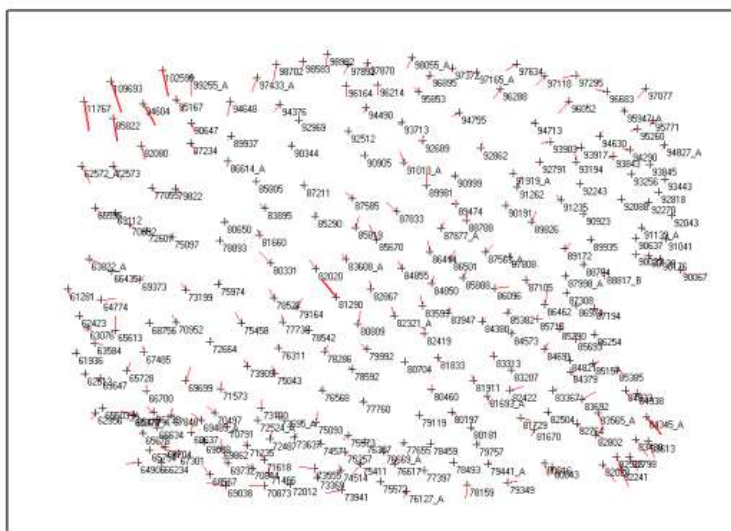


Рис. 3. Сравнение связи лучей, полученной при калибровке без использования координат опорных точек (по девяти снимкам с условием шаблона) с эталонной связкой лучей

Для примера, представленного на данном рисунке (рис. 3), максимальное отклонение проектирующих лучей составило 158,8 угловых секунд, а среднее квадратическое отклонение 50,4 угловых секунд.

Таким образом, результаты проведённых экспериментов с использованием реальных снимков свидетельствуют о возможности применения разработанных методик калибровки для определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии неметрических цифровых камер, а также о работоспособности предложенной методики сравнения результатов калибровки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белошапкин М. А., Гук Н. А. Калибровка цифровых камер по линейному тест-объекту // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 121.
2. Ессин А. С., Ессин С. С. Особенности фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъёмки с БПЛА // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 80–82.
3. Ессин А. С., Ессин С. С. Технология фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, в целях создания ортофотопланов // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 72–75.
4. Исследование методики калибровки снимков на испытательном полигоне Западно-сибирского филиала «Госземкадастръёмка» ВИСХАГИ / Быков А. Л., Быков В. Л., Быков Л. В., Макаров А. П. // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 32–34.
5. Калибровка снимков на равнинном испытательном полигоне с определением координат центров фотографирования / Макаров А. П., Быков Л. В., Быков В. Л., Быков А. Л. // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 60–62.
6. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.
7. Никитин В. Н., Николаева Т. В. Калибровка цифровой неметрической камеры по снимкам звёздного неба // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.
8. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.
9. Пошивайло Я. Г. Применение цифровых неметрических камер для целей крупномасштабного картографирования // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 4. – С. 125–128.
10. Семенцов А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.
11. Семенцов А. В., Никитин В. Н. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей

среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 72–80.

12. Семенцов А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : сб. молодых учёных СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

13. Смирнов Е. С., Пальчикова И. Г. Калибровка цифровых камер для микроскопной цитометрии // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 48-53.

14. Черемушкин А. В. Тест-объект для калибровки фотографических систем // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 116–118.

© А. В. Семенцов, В. Н. Никитин, 2015