

МЕТОДИКА НАЗЕМНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ СЪЕМОЧНЫХ КАМЕР НА ЛИНЕЙНЫХ ПЗС

А.С. Василейский, М.М. Железнов, Я.Л. Зиман, И.В. Полянский

Институт космических исследований РАН, АНО "Космос-НТ"

117997 Москва, Профсоюзная 84/32

E-mail: maxim@nserv.iki.rssi.ru

Формулируются задачи геометрической калибровки съемочных камер с фотоприемниками - линейными ПЗС. Перечисляются параметры, подлежащие определению при калибровке.

Излагается предлагаемая методика геометрической калибровки, включающая проведение панорамной съемки исследуемой камерой и последующее измерение направлений на ряд изобразившихся на панораме контурных точек, съемка которых выполнена разными ПЗС-линейками в один и тот же момент времени.

Дается описание необходимого стенда и программы работ при проведении калибровки в соответствии с предложенной методикой. Описывается алгоритм расчета искомых геометрических параметров и реализующее его программное обеспечение.

Предлагаемая методика была подтверждена геометрической калибровкой многозонального съемочного устройства МСУ-100, разработанного для космического аппарата "Метеор-3М".

Введение

Сканирующие устройства на линейных ПЗС-детекторах находят все большее применение в системах оперативного дистанционного зондирования Земли из космоса. Разрабатываемый для космического аппарата "Метеор-3М" [1] комплекс многозональной спектральной съемки (КМСС) включает техзональные сканирующие устройства МСУ-50 и МСУ-100. Фотоприемниками в каждой из камер МСУ служат три линейных ПЗС-детектора, расположенных за разными светофильтрами и обеспечивающих съемку в трех спектральных зонах. Спектральные зоны камеры МСУ-50 оптимизированы для съемки водной поверхности, а для камеры МСУ-100 зоны рассчитаны для съемки суши.

Геометрическая калибровка съемочных систем предусматривает определение их фотограмметрических параметров, которые необходимы в процессе наземной обработки получаемых видеоданных [2], в частности при решении задач географической координатной привязки получаемых изображений, приведения их к одному масштабу и совмещения изображений, получаемых в разных спектральных каналах. Высокие требования к точности геометрической калибровки обусловлены требованиями к точности привязки и совмещения изображений, составляющими 0,1-0,5 размера пиксела [3, 4].

Принцип геометрической калибровки может основываться на регистрации съемочной системой тестовых изображений объектов, с априорно известными с высокой точностью координатами [3]. Последующая математическая обработка координат объектов на изображениях и их реальных координат позволяет определить геометрические параметры калибруемого съемочного устройства. В силу того, что съемочные устройства на линейных ПЗС-детекторах одновременно регистрируют только одну строку изображения, их геометрическая калибровка представляет существенно более сложную задачу по сравнению с калибровкой кадровых камер [3]. Различные методы геометрической калибровки отличаются способом формирования опорных направлений, предъявляемых подлежащей калибровке камере.

В настоящее время при калибровке съемочных устройств, информация с которых должна подвергаться фотограмметрической обработке, чаще всего используются коллимационные схемы. При этом подлежащая калибровке камера регистрирует формируемое оптической системой изображение бесконечно удаленного точечного источника излучения [4, 5] или удаленного тестового объекта [5]. Точное измерение направления на объект достигается путем установки коллиматора [5] или самой подлежащей калибровке камеры [4, 5] на прецизионном поворотном устройстве. Необходимое для формирования изображения линейным детектором сканирование осуществляется путем вращения самой калибруемой камеры или коллиматора. Альтернативный метод геометрической калибровки предусматривает регистрацию калибруемым съемочным устройством изображения множества удаленных тестовых объектов, направления на которые измеряются теодолитом [6].

Уточнение данных, получаемых в процессе наземной геометрической калибровки, при необходимости осуществляют в процессе периодической калибровки съемочной аппаратуры в полете [3, 7].

Параметры, подлежащие определению при геометрической калибровке

Для решения задачи геометрической калибровки необходимо реализовать фотограмметрическую систему координат, единую для изображений, получаемых всеми тремя каналами съемочного устройства МСУ. За начало фотограмметрической внутренней системы координат (ВСК) МСУ принимается задняя узловая точка объектива. Плоскость XU системы параллельна посадочной плоскости МСУ. Ось Z перпендикулярна плоскости XU с положительным направлением в сторону объекта съемки. Ось Y параллельна прямой Y'' , лежащей в плоскости посадочного места МСУ и проходящей от центра классного отверстия к центру классного паза (см. рис.1). Ось X дополняет систему до правой.

В ВСК вводится псевдофокальная плоскость, параллельная плоскости XU и отстоящая от нее в направлении минус Z на паспортное фокусное расстояние объектива F . В результате калибровки на основе центрального проецирования определяют координаты X и Y проекции на псевдофокальную плоскость крайних элементов всех трех линейных ПЗС-детекторов. Эти координаты вместе с фокусным расстоянием F являются параметрами, обеспечивающими решение задачи.

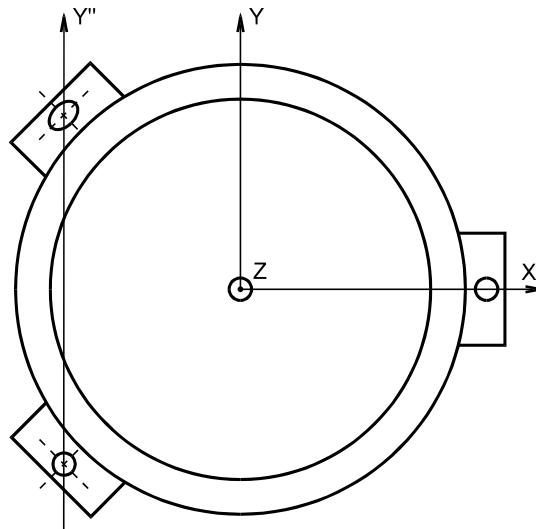


Рис.1. Эскиз посадочного места МСУ.

Стенд геометрической калибровки

Для проведения геометрической калибровки камер МСУ разработана методика, включающая проведение панорамной съемки исследуемой камерой и последующее измерение теодолитом направлений на ряд изобразившихся на панораме контурных точек, съемка которых выполнена разными ПЗС-линейками в один и тот же момент времени. Для реализации разработанной методики был разработан специальный стенд (рис.2).

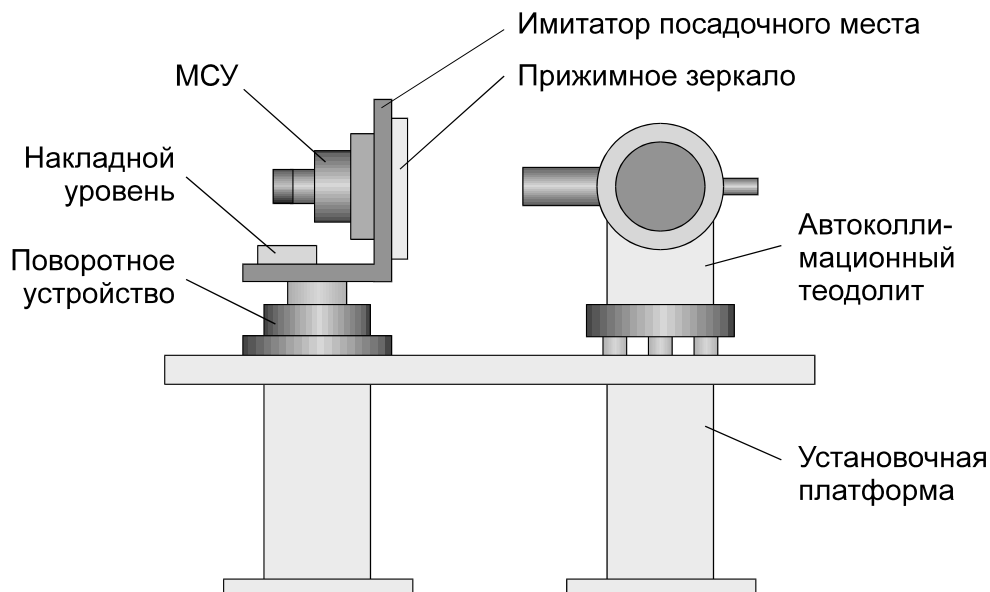


Рис. 2. Стенд геометрической калибровки.

На неподвижную платформу установлено поворотное устройство с имитатором посадочного места МСУ, на обратной стороне которого закреплено параллельное посадочной плоскости прижимное зеркало. С помощью накладного уровня посадочное место приводится в положение, когда оптическая ось МСУ направлена горизонтально.

Поворотное устройство предназначено для вращения установленного на ней МСУ вокруг вертикальной оси с помощью шагового двигателя, обеспечивающего практически постоянную угловую скорость. При вращении поворотного устройства линейные ПЗС-детекторы МСУ формируют панорамное изображение.

Со стороны прижимного зеркала на платформу установлен теодолит. Теодолит приводится в горизонтальное положение с помощью уровня на алидаде горизонтального круга. Разворачивая теодолит, добиваются совпадения прямого и отраженного от прижимного зеркала изображения автоколлимационного визирного креста. В этом случае визирная ось теодолита нормальна к посадочной плоскости камеры и будет лежать в горизонтальной плоскости. Таким образом достигается соосность систем координат теодолита и МСУ.

Порядок проведения измерений

При проведении геометрической калибровки вначале выполняется панорамная съемка местности камерой МСУ, установленной на поворотном устройстве. Затем поворотное устройство выводится в среднее положение, фиксируется положение теодолита относительно посадочного места и проводится съемка неподвижным МСУ в течение нескольких секунд. Затем включается поворотное устройство и проводится съемка разными каналами МСУ небольших участков панорамы местности (рис.3).

Зарегистрированные изображения дешифрируются по полученной ранее панораме и на них находят характерные опорные объекты, которые экспонировались МСУ до начала вращения. При дешифрировании записываются номера чувствительных элементов ПЗС-детекторов, на которые были экспонированы характерные опорные объекты.

После проведения съемки посадочное место и поворотное устройство снимают, а теодолитом измеряют направления на опорные объекты (рис.4).

В результате описанных измерений получают для каждого из N опознанных опорных объектов измеренные теодолитом горизонтальный α_i и вертикальный β_i углы (отсчеты теодолита по горизонтальному и вертикальному кругу), а также порядковые номера n_i соответствующих чувствительных элементов конкретного линейного ПЗС-детектора.

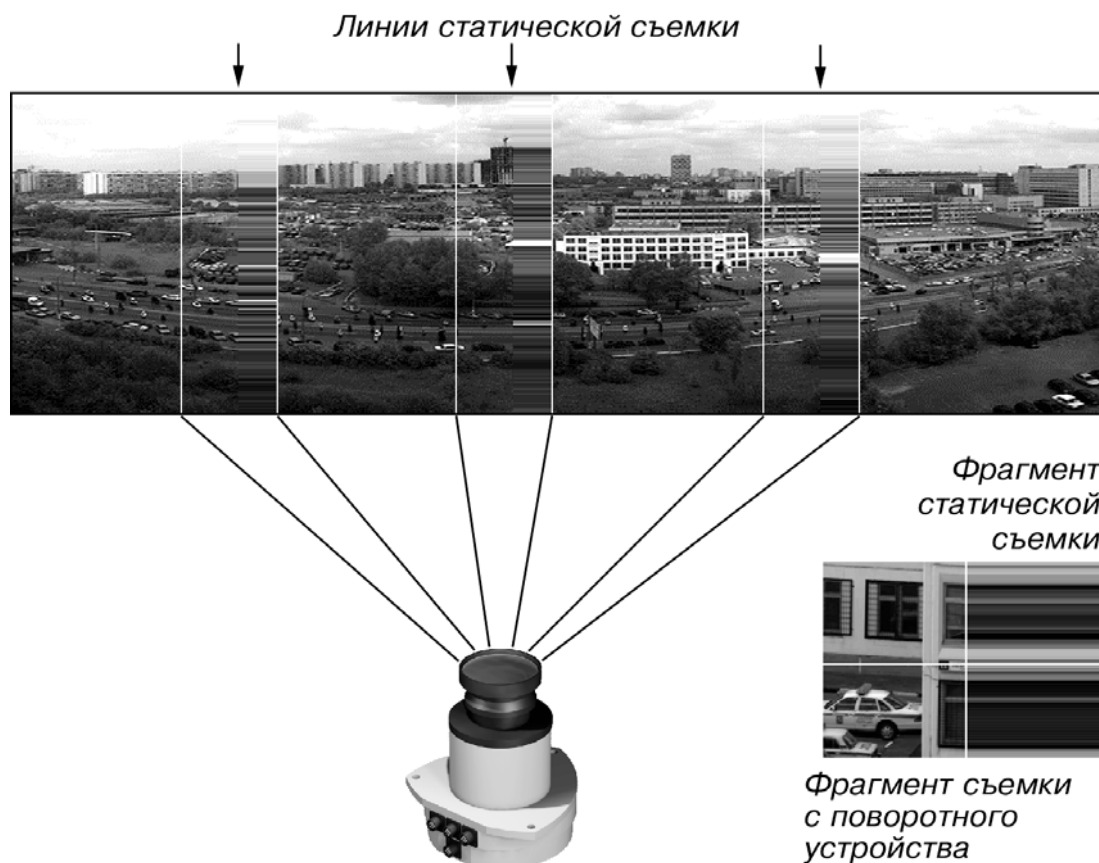


Рис. 3. Съемка панорамы местности камерой МСУ на поворотном устройстве.

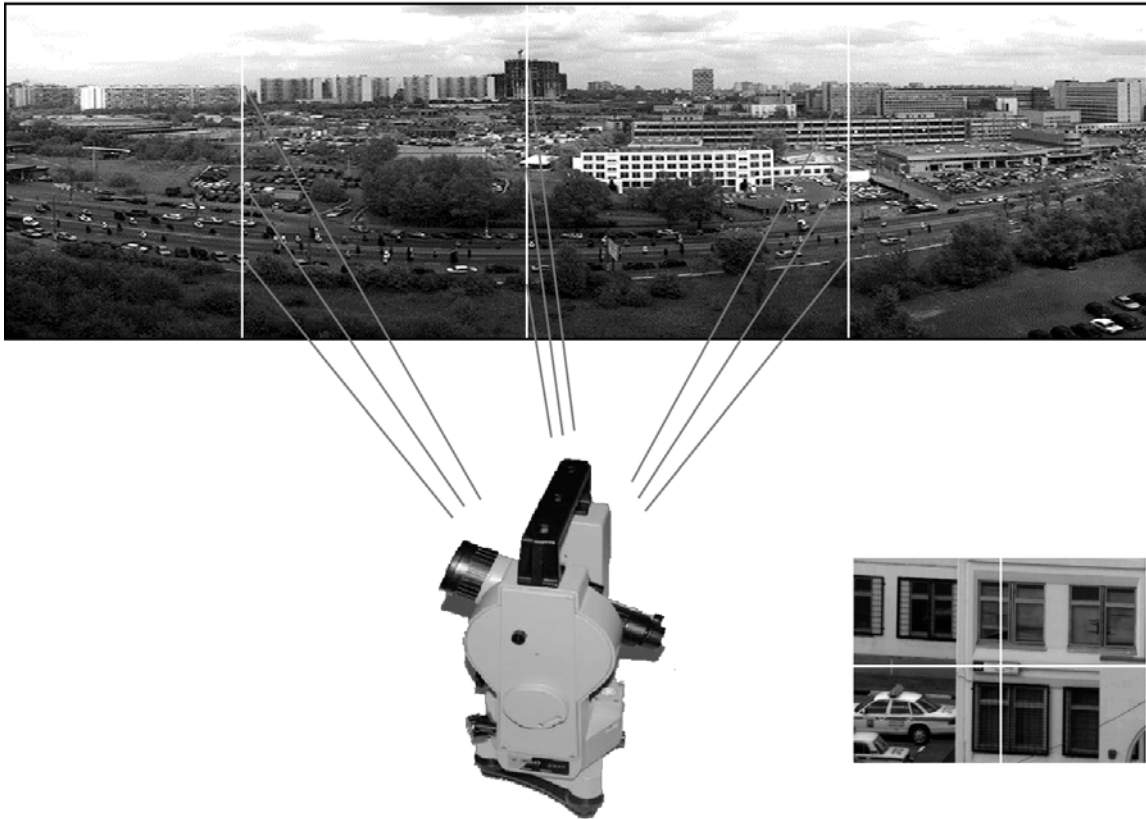


Рис. 4. Теодолитная съемка опорных точек местности.

Методика вычислений

Координаты опорных элементов ПЗС-линейки рассчитываются по формулам:

$$x_i = F \cdot \cos \alpha_i, \quad y_i = F \cdot \cos \beta_i,$$

где F - паспортное фокусное расстояние объектива МСУ, α_i и β_i - измеренные теодолитом для i -го опорного элемента горизонтальный и вертикальный углы.

Считая детекторы линейными, с использованием полученных координат нескольких опорных элементов по приведенным ниже формулам определяются коэффициенты a , b , c , d регрессионных уравнений, определяющих положение любого элемента ПЗС-детектора в ВСК МСУ:

$$a = \frac{\sum (n_i - \bar{n})(x_i - \bar{x})}{\sum (n_i - \bar{n})^2} \quad b = \bar{n} - a\bar{x}$$

$$c = \frac{\sum (n_i - \bar{n})(y_i - \bar{y})}{\sum (n_i - \bar{n})^2} \quad d = \bar{n} - c\bar{y}$$

где n_i - порядковый номер i -го опорного элемента на ПЗС-линейке, \bar{n} - среднее значение n_i , \bar{x} , \bar{y} - средние значения координат опорных элементов в ВСК.

Координаты первого ($n_k=0$) и последнего (для МСУ - $n_k=7925$) чувствительных элементов линейного ПЗС-детектора МСУ в ВСК (x_k , y_k , F) определяются по формулам:

$$x_k = an_k + b$$

$$y_k = cn_k + d$$

Оценку точности вычисленных координат крайних чувствительных элементов линейного ПЗС-детектора можно проводить путем расчета значения нормированного коэффициента корреляции Браве-Пирсона [8] для полученных уравнений регрессии координат x и y пикселей от их номера n :

$$r_{x/n} = \frac{\sum (n_i - \bar{n})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum (n_i - \bar{n})^2 (x_i - \bar{x})^2}}, \quad r_{y/n} = \frac{\sum (n_i - \bar{n})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (n_i - \bar{n})^2 (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Среднеквадратическое отклонение рассчитанных по уравнениям регрессии координат чувствительных элементов ПЗС-детектора рассчитывается по формулам:

$$\delta_{x/n} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \cdot \sqrt{1-r_{x/n}}, \quad \delta_{y/n} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \cdot \sqrt{1-r_{y/n}}.$$

Программное обеспечение

Для автоматизированной обработки измерений было разработано программное обеспечение, позволяющее по результатам измерений на стенде вычислять координаты линейных ПЗС-детекторов во внутренней фотограмметрической системе координат камеры. Внешний вид рабочего окна программы представлен на рис.5.

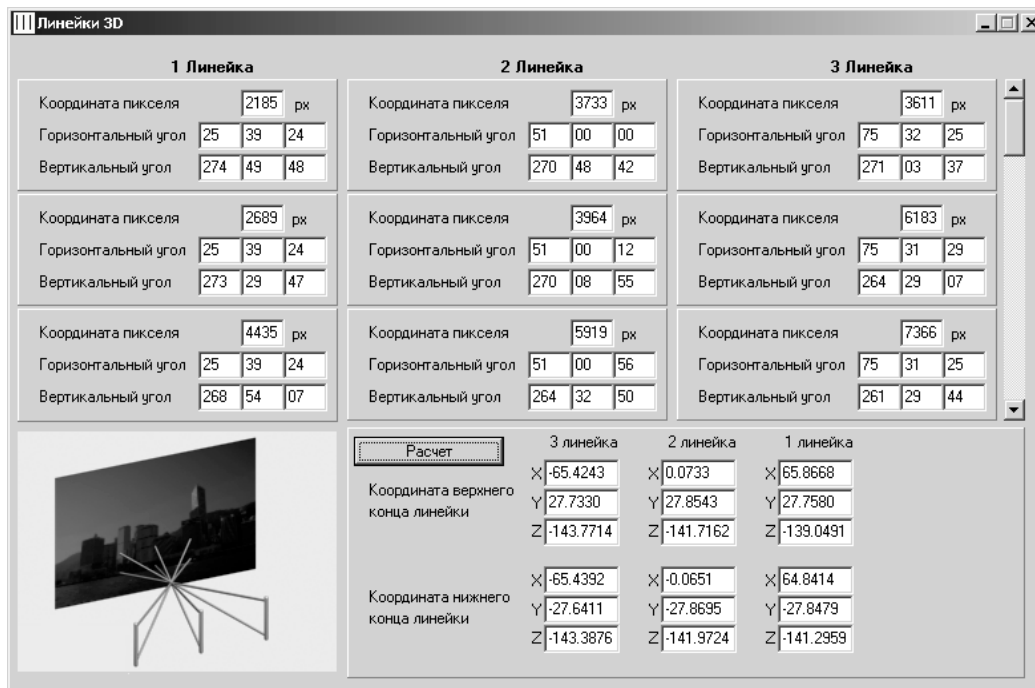


Рис.5. Внешний вид главного рабочего окна программы.

Выводы

В результате проведенной работы были разработаны специальная методика геометрической калибровки сканирующих устройств на линейных ПЗС-детекторах, включающая проведение панорамной съемки исследуемой камерой и последующее измерение теодолитом направлений на ряд изобразившихся на панораме контурных точек, съемка которых выполнена разными ПЗС-линейками в один и тот же момент времени, а также реализующий методику стенд и программное обеспечение для вычисления координат линейных ПЗС-детекторов во внутренней фотограмметрической системе координат камеры. Проведенная калибровка макета камеры МСУ-100 показала, что среднеквадратическое отклонение рассчитанных координат чувствительных элементов ПЗС-детекторов составляет величину в пределах 0,5 размера пикселя.

Литература

1. Трифонов Ю.В., Горбунов А.В., Харитонов В.Ф. КА "Метеор-М" - новый этап постоянно действующей космической системы / Сборник тезисов 1-й международной конференции "Земля из космоса - наиболее эффективные решения", 26-28 ноября 2004 г. М.: Бинوم-пресс, 2003. С.128-130.
2. Василейский А.С., Железнов М.М., Зиман Я.Л. Алгоритмы координатной привязки космических видеоданных по навигационным измерениям // Известия вузов. Приборостроение. 2003, Т.46, № 4. С.37-43.
3. Cramer M. EUROS DR network on digital camera calibration // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, Vol.35, Part B6, Istanbul, P.204-209.
4. Chen T., Shibasaki R., Shunji M. Development and calibration of the airborne Three-Line Scanner (TLS) imaging system // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, Vol.69, № 1, P.71-78.
5. Schuster R., Braunecker B. Calibration of the ADS40 airborne digital sensor // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol.33, Part B1, Amsterdam, P.288-294.

6. *Alharthy A., Bethel J.* Laboratory self-calibration of a multi-band sensor / *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, Vol.34, Part 3A, Graz, Austria, P.23-28.
7. *Василейский А.С., Жуков Б.С., Зиман Я.Л., Эртель Д., Конрадт М.* Межканальное геометрическое совмещение изображений, полученных с помощью малого спутника BIRD // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник научных статей.*- М.: Полиграф-сервис, 2004. С.403-408.
8. *Смирнов Н.В., Белугин Д.А.* Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. М.: Недра, 1969, С.379.