

УДК 004.932

## ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ СЪЁМОЧНЫХ СИСТЕМ ДЗЗ

*Кузнецов А.Е., д.т.н., профессор, зам. директора НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: foton@rsreu.ru;*

*Пошехонов В.И., к.т.н., ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: foton@rsreu.ru*

ORGANIZATION OF REMOTE SENSING IMAGING SYSTEMS  
GEOMETRIC CALIBRATION

*Kuznetsov A.E., Poshekhonov V.I.*

*The technological scheme of the in-flight geometric calibration of Earth remote sensing systems is considered. The technology includes two stages of calibration activities. The first stage is performed during the satellite flight tests and is associated with the refinement of the interior orientation parameters and the mounting angles of the camera. The task of the second stage is to monitor the mounting angles of the camera. It is shown that the recalibration process should be performed in case of exceeding the permissible misalignment of measurements by star trackers of the camera orientation roll, pitch and yaw angles. A model justifying the number of calibration routes that are necessary during calibration process is given. A conclusion is given on the practical use of the considered technological process and the ways of its improvement.*

**Key words:** remote sensing camera, star tracker, ground control points, exterior and interior orientation parameters.

**Ключевые слова:** съёмочная камера, астродатчики, опорные точки местности, элементы внешнего и внутреннего ориентирования.

**Введение**

Геокодирование и геометрическая обработка изображений, формируемых системами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), осуществляется на основе математических моделей, описывающих процесс съёмки подстилающей поверхности камерой наблюдения. С использованием моделей вычисляются геодезические координаты  $(\varphi, \lambda)$  пикселей изображения на основе динамических и статических параметров, описывающих пересечение визирного луча камеры с земной поверхностью с учётом высоты местности  $h$ . Динамические параметры, определяемые как элементы внешнего ориентирования и описываемые вектором  $\Omega(t)$ , включают данные о пространственном и угловом положении спутника в зависимости от времени съёмки  $t$ . Статические параметры включают элементы внутреннего ориентирования камеры (ЭВНО) и конструктивные углы приборов астроориентации и съёмочного устройства относительно связанной системы координат спутника. К элементам внутреннего ориентирования, описываемым вектором  $\mathbf{u}$ , относятся фокусное расстояние и положение фоточувствительных элементов камеры в фокальной плоскости с учётом дисторсии объектива.

Данные первой группы параметров, входящих в модель, формируются автономной системой навигации космического аппарата (КА), а второй – по данным наземной фотограмметрической калибровки камеры. Особенность космических систем ДЗЗ состоит в том, что после запуска КА данные предполётной фотограмметрической калибровки изменяются, что снижает точ-

*Рассматривается технологическая схема проведения полётной геометрической калибровки съёмочных систем дистанционного зондирования Земли. Технология включает два этапа проведения калибровочных мероприятий. Первый этап выполняется в период лётных испытаний спутника и связан с уточнением элементов внутреннего ориентирования и конструктивных углов камеры. Задачей второго этапа является мониторинг конструктивных углов камеры. Показано, что процесс перекалибровки должен выполняться в случае превышения допустимого рассогласования измерений астродатчиками ориентации камеры по углам крена, тангажа и рысканья. Приводится модель, обосновывающая число маршрутов съёмки, которые используются при проведении калибровочных работ. Дается заключение о практическом использовании рассмотренного технологического процесса и пути его совершенствования.*

ностные характеристики модели обработки формируемых камерой изображений. Для уточнения ЭВНО и конструктивных углов выполняется полётная геометрическая калибровка съёмочной системы. Основная идея этого процесса рассмотрена в работе [1]. Однако, с технологической точки зрения этот сложный процесс, используемый как на этапе лётных испытаний КА, так и в ходе штатной эксплуатации изделия, в публикациях не описан. Поэтому целью настоящей работы является рассмотрение порядка проведения мероприятий по геометрической калибровке, обеспечивающего поддержание высоких точностных характеристик модели обработки видеоданных в течение всего периода целевого использования систем ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

**Технологическая схема проведения геометрической калибровки**

Геометрическая калибровка съёмочных устройств проводится для всех систем ДЗЗ, однако для камер вы-

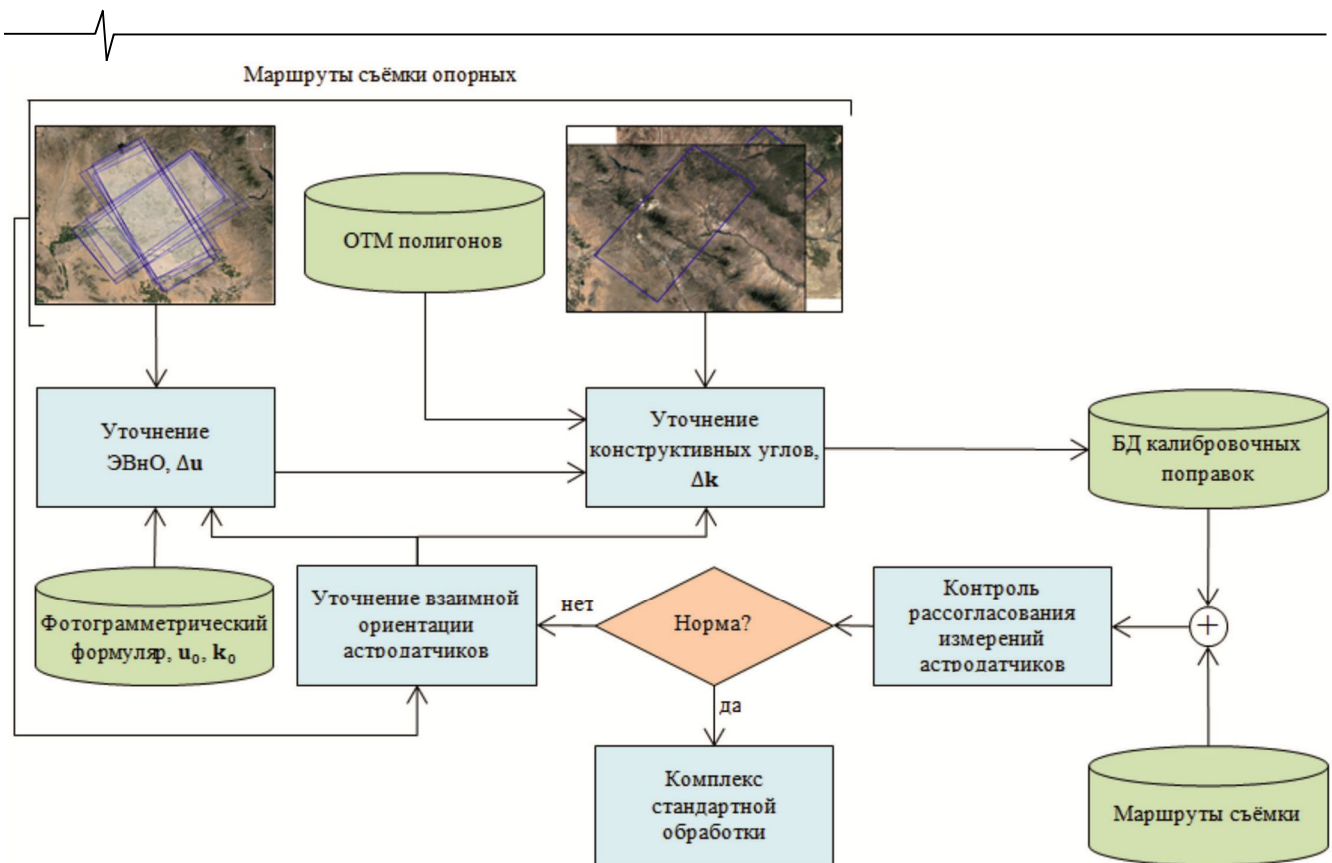


Рис. 1. Технологическая схема выполнения геометрической калибровки

сокого пространственного разрешения эта процедура отличается наибольшей сложностью, поскольку её реализация требует взаимодействия всех компонентов наземного комплекса приёма, обработки и распространения информации [2]. На рис. 1 приведена технологическая схема проведения полётной геометрической калибровки, разработанная для систем ДЗЗ типа «Аист», «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ» и др. Схема, как это отмечалось в [1], описывает двухэтапный процесс проведения калибровочных мероприятий.

На первом этапе, проводимом на этапе лётных испытаний КА, уточняются элементы внутреннего ориентирования и конструктивные углы, т.е. определяются поправки к векторам  $\mathbf{u}_0$  и  $\mathbf{k}_0$ ,

$$\varphi = \Phi(m, n, h, \Omega(t), \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}, \mathbf{k}_0 + \Delta\mathbf{k}),$$

$$\lambda = F(m, n, h, \Omega(t), \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}, \mathbf{k}_0 + \Delta\mathbf{k}),$$

где  $\Phi$  и  $F$  – математические функции, устанавливающие координатное соответствие между планарными  $(m, n)$  и геодезическими  $(\varphi, \lambda)$  координатами пикселей изображения;  $\mathbf{u}_0$  и  $\mathbf{k}_0$  – векторы, описывающие формулярные значения параметров внутреннего ориентирования и конструктивных углов астродатчиков и камеры;  $\Delta\mathbf{u}$  и  $\Delta\mathbf{k}$  – искомые поправки.

Кроме того, на этом этапе осуществляется валидация математической модели съёмки, т.е. установление её адекватности реальным условиям функционирования съёмочной и навигационной аппаратуры. Поэтому обязательным условием этого этапа является участие разработчиков модели в процессе калибровки.

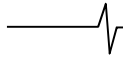
Исходными данными для выполнения работ по этапу являются:

- данные фотограмметрического предполётного формуляра, содержащие параметры векторов  $\mathbf{u}_0$  и  $\mathbf{k}_0$ ;
- опорные полигоны – участки земной поверхности, содержащие опорные точки местности (ОТМ);
- маршруты съёмки опорных полигонов.

ОТМ представляют собой изображения характерных объектов, для которых с высокой точностью известны геодезические координаты  $(\varphi_{oi}, \lambda_{oi})$  и высота  $h_{oi}$ , где  $i$  – номер ОТМ. Для минимизации ошибок измерения планарных координат  $(m, n)$  характерных объектов на анализируемых изображениях, пространственное разрешение изображений ОТМ должно быть по крайней мере в два раза выше пространственного разрешения изображения маршрута съёмки опорного полигона.

Съёмка опорных полигонов организовывается комплексом планирования с соблюдением следующих условий: процент облачности не более 10-15%; наличие информации от всех астродатчиков и фоточувствительных устройств камеры и, наконец, съёмка полигона должна быть выполнена в режиме «крест-накрест» под разными углами отклонения КА от надира. Последнее условие необходимо для использования алгоритма самокалибровки камер. Как показали исследования в [1], данный режим хорошо зарекомендовал себя при уточнении элементов внутреннего ориентирования каждой фоточувствительной матрицы камеры. Длительность каждого маршрута должна соответствовать площади покрытия, т.е. порядка 5-7 секунд для КА серии «Ресурс-П».

Таким образом, основная сложность при получении исходных данных для калибровки ЭВНО заключается в необходимости съёмки большого количества безоблачных маршрутов одной и той же территории. Продолжи-



тельность интервала времени выполнения съемки может доходить до 4 недель даже при выборе в качестве опорного полигона района с большим числом солнечных дней в году. В связи с этими ограничениями для опорного полигона калибровки ЭВНО могут отсутствовать высокоточные ОТМ. Поэтому для определения конструктивных углов камеры выполняется съемка второй группы маршрутов на районы большого числа опорных полигонов, обеспеченных высокоточными ОТМ.

Собственно процесс калибровки начинается с уточнения взаимной ориентации астродатчиков на основе анализа поступающих от них измерений. Процесс сводится к определению поправок к их конструктивным углам, с тем, чтобы минимизировать рассогласования, выдаваемые астродатчиками по углам крена, тангажа и рысканья. Целью является вычисление ориентации приборной системы координат (ПСК) каждого астродатчика относительно связанной системы координат (ССК) КА, которую представим в виде кватерниона  $\mathbf{k}_{ai}$ , где  $i$  – номер астродатчика.

Для каждого момента времени  $t_j$ , для которого имеются не менее двух измерений астродатчиков, вычисляется усредненный кватернион  $\mathbf{q}_j$  ориентации КА, задающий переход из ССК КА в инерциальную систему координат (ИСК):

$$\mathbf{e}_{ij} = \tilde{\mathbf{a}}_{ij} \mathbf{q}_j \tilde{\mathbf{k}}_{ai}, \quad \sum_i \mathbf{e}_{ij}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_{ij} = \min_{\mathbf{q}_j},$$

где  $\mathbf{e}_{ij}$  – невязки измерений  $i$ -го астродатчика относительно усредненного значения,  $\mathbf{M}$  – ковариационная матрица, характеризующая неравноточность измерений астродатчиков по разным осям (при умножении на мат-

рицу  $\mathbf{M}$  кватернион рассматривается как четырехмерный вектор-столбец),  $\mathbf{a}_{ij}$  – измерение  $i$ -го астродатчика, задающее переход из ПСК астродатчика в ИСК на момент времени  $t_j$ .

Анализ невязок  $\mathbf{e}_{ij}$  позволяет выполнить анализ точности определения взаимной ориентации астродатчиков по текущим конструктивным углам и в случае необходимости выполнить их уточнение:

$$\sum_j \sum_i \mathbf{e}_{ij}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_{ij} = \min_{\mathbf{q}_j, \mathbf{k}_{ai}}.$$

Процесс уточнения взаимной ориентации астродатчиков поясняет рис. 2, на котором приведены графики невязок измерений астродатчиков по углам крена и тангажа до и после уточнения [2].

Процесс расчета поправок  $\Delta \mathbf{u}$  и  $\Delta \mathbf{k}$  на основе анализа невязок координат в опорных и одноименных точках подробно изложен в работе [1].

Результатом выполнения первого этапа геометрической калибровки съёмочной камеры являются уточнённые ЭВНО и конструктивные углы, которые сохраняются в базе данных калибровочных поправок и используются в качестве исходных данных при последующей обработке материалов съёмки.

В задачи второго этапа геометрической калибровки входит контроль точностных параметров, входящих в модель обработки данных. Как правило, ЭВНО остаются стабильными в течение всего периода целевого использования КА и не требуют перекалибровки, если не происходили нарушения температурного режима работы камеры. Поэтому основным источником погрешностей геопривязки материалов съёмки являются конструктивные углы астродатчиков и камеры.

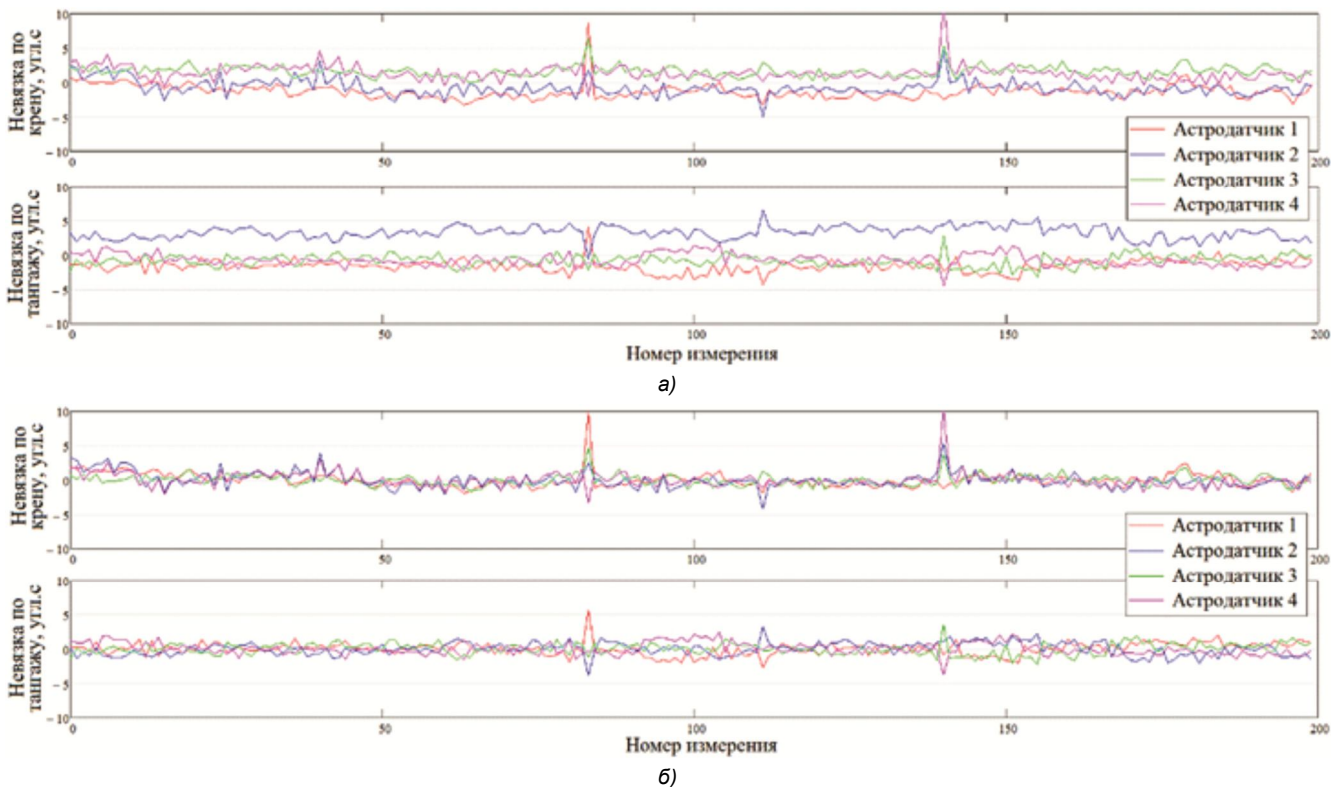
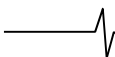


Рис. 2. График взаимных рассогласований осей астродатчиков по углам крена и тангажа до проведения калибровки (а) и после неё (б). До коррекции СКО невязок составили 1,686" и 2,097", после коррекции – 1,067" и 0,891"



Процесс контроля конструктивных углов астродатчиков выполняется на основе анализа их измерений от всех маршрутов, зарегистрированных антенным комплексом в сеансе связи с КА. Если СКО невязок  $e_{ij}$  измерений астродатчиков по углам крена, тангажа и рысканья не превосходят значений, найденных на первом этапе уточнения их взаимной ориентации, то маршруты съёмки используются для формирования выходных информационных продуктов стандартных уровней обработки. В противном случае формируется заявка на съёмку опорных полигонов, выполняется уточнение взаимной ориентации астродатчиков и находятся новые поправки к уже имеющимся конструктивным углам. Процесс мониторинга осуществляется постоянно, при этом, как показывает практика, периодичность перекалибровки конструктивных углов составляет от одного до двух месяцев.

Важным элементом рассматриваемого технологического процесса является обоснование требований к необходимому числу калибровочных маршрутов при заданной точности геодезических координат ОТМ опорных полигонов. На невязки между измеренными по изображению координатами и вычисленными по модели геопривязки, влияет ряд искажающих факторов. Во-первых, параметры внешнего ориентирования каждого маршрута съёмки, описываемые вектором  $\Omega(t)$ , измеряются с ошибками. Во-вторых, координаты опорных точек измеряются на изображении с ошибкой  $\sigma_u$ , которую примем равной половине его пространственного разрешения, геодезические координаты ОТМ заданы с точностью  $\sigma_o$  в плане и  $\sigma_h$  по высоте. Отсюда получим СКО вычисления невязок, обусловленные погрешностями измерения координат ОТМ,  $\sigma_{OTM} = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_o^2 + (\sigma_h \tan \alpha)^2}$ , где  $\alpha$  – средний угол отклонения КА от надира при съёмке.

Пусть координаты центра масс КА измеряются навигационной аппаратурой с СКО  $\sigma_\lambda$ , а угловое положение камеры определяется приборами астроориентации с погрешностью  $\sigma_y$  по каждой из осей. Учтем, что ошибка измерения угла рыскания камеры, а также ошибка измерения пространственного положения вдоль направления визирования оказывают пренебрежимо малое влияние на точность геопривязки. Тогда случайная ошибка  $\sigma_{ca}$  геокодирования видеоданных маршрута съёмки, обусловленная погрешностями измерительной аппаратуры КА, будет равна,

$$\sigma_{ca} = \sqrt{2\sigma_\lambda^2 + 2(H \tan \sigma_y)^2},$$

где  $H$  – высота орбиты КА.

После выполнения калибровки геопривязка изображений будет выполняться с точностью  $\sigma_e = \sqrt{\sigma_{ca}^2 + \sigma_{cm}^2}$ , где  $\sigma_{cm}$  – систематическая ошибка, обусловленная погрешностью уточнения параметров модели. Для случая, когда все маршруты сняты на разные полигоны калибровки, ошибку  $\sigma_{cm}$  оценим по формуле

$$\sigma_{cm} = \sqrt{(\sigma_{ca}^2 + \sigma_{OTM}^2) / N}, \text{ где } N \text{ – искомое число калибровочных маршрутов.}$$

Будем считать, что в результате выполнения калибровки ошибка геопривязки  $\sigma_e$  не должна превышать ошибку  $\sigma_{ca}$  более чем на  $\gamma = 5\%$ . Тогда требуемое число маршрутов определим по формуле,

$$N = \frac{\sigma_{ca}^2 + \sigma_{OTM}^2}{(\gamma^2 + 2\gamma)\sigma_{ca}^2}.$$

С использованием полученных соотношений, при геометрической калибровке датчика «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П» было установлено, что для уточнения элементов внутреннего ориентирования и конструктивных углов требуется порядка 10 маршрутов съёмки. Как отмечается в [1], общее число одноимённых и опорных точек в ходе предполетной калибровки КА «Ресурс-П» № 2 составило 318483, что позволило уточнить элементы внутреннего ориентирования с субпиксельной точностью.

## Заключение

На базе рассмотренной технологии разработан целый ряд программных комплексов (ПК). Для калибровки съёмочной аппаратуры КА «Канопус-В» и «Канопус-В-О» создан ПК КАОД, для спутников серии «Ресурс-П» – ПК ГКСА. Практическое использование этих комплексов позволило организовать получение высококачественных информационных продуктов, что отмечается в работе [3].

Ограничением рассмотренной технологии является недостаточно высокая оперативность этого процесса, связанная с временными задержками на планирование и съёмку опорных полигонов. Поэтому авторы статьи дальнейшее совершенствование методических основ процесса геометрической калибровки видят в использовании особых режимов съёмки подстилающей поверхности, например, режима реверсивной съёмки произвольных территорий земной поверхности [4]. Использование полученных данных позволит снизить требование к частоте съёмки опорных полигонов и одновременно контролировать конструктивные углы астродатчиков и съёмочной камеры.

## Литература

1. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мятлов Г.Н., Пошехонов В.И., Стратилатов Н.Р. Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44-53.
2. Еремеев В.В., Зинина И.И., Кузнецов А.Е., Мятлов Г.Н., Пошехонов В.И., Филатов А.В., Юдаков А.А. Технология потоковой обработки данных ДЗЗ высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 11-18.
3. Ахметов Р.Н., Зинина И.И., Юдаков А.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 41-47.
4. Greslou D., de Lussy F., Delvit J.M., Dechoz C., Amberg V. Pleiades-HR innovative techniques for Geometric Image Quality Commissioning // ISPRS Melbourne. 2012.