УДК 528.855

МЕТОДИКА СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

© 2026 А.В. Бутко

Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 19.01.2025

При разработке космических аппаратов оптико-электронного наблюдения необходимо проводить сквозной контроль достижимой точности геодезической привязки снимков. Существующие методики не позволяют прогнозировать достижимое значение ошибки геодезической привязки космических снимков с учётом наземной высокоточной обработки бортовой измерительной информации и формировать рекомендации по обеспечению допустимого уровня ошибки геодезической привязки. В работе приводится описание разработанной методики сквозного контроля с учётом математической модели ошибок синтеза элементов внешнего ориентирования снимка и разработана модель ошибок синтеза элементов внешнего ориентирования снимка с учётом высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации. Приведено описание модернизации существующей методики оценки точности геодезической привязки для учёта результатов расчёта по модели ошибок синтеза элементов внешнего ориентирования. Проведено сравнение результатов расчёта по разработанной методике сквозного контроля точности геодезической привязки с практическими результатами. Показана достоверность результатов разработанной методики.
Ключевые слова: точность, ошибка, измерительная информация, геодезическая привязка, космические снимки, статистика, оптимизация, высокоточная наземная обработка.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-316-325
EDN: EVHMGK

ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат (КА) оптико-электронного наблюдения (ОЭН) предназначен для съёмки поверхности Земли в видимом диапазоне спектра и доставки информации на наземные пункты приёма информации. Полученная на Земле информация используется для производства снимков с требуемым пространственным и радиометрическим разрешением, точностью геодезической привязки с целью решения народно-хозяйственных задач. К получаемой с КА информации относится оцифрованное изображение заданных участков земной поверхности и бортовая измерительная информация.

Бортовая измерительная информация участвует в геодезической привязке снимков. Основными источниками измерительной информации на КА являются прибор определения координат звёзд и приёмник навигационных сигналов от спутников глобальной навигационной спутниковой системы[1,2]. Не всегда уровень ошибок измерений обеспечивает достижение требуемой точности геодезической привязки. Причиной является тот факт, что бортовую измерительную аппаратуру разработчик КА вынужден выбирать с учётом ограничений ресурсов КА (масса, моменты инерции, электропотребление и стоимость проекта)[3,4]. Как правило, чем выше точность прибора, тем больше масса, моменты инерции, энергопотребление и стоимость[1]. Также причинами нехватки точности могут быть, например, изменение на одном из этапов разработки КА высоты полета, угловой скорости вращения КА при съемке, изменение компоновки КА, изменение номенклатуры материалов и т.д.

В этих случаях для повышения точности бортовой измерительной информации применяют высокоточную наземную обработку измерений[5]. При этом систематическую составляющую ошибки (неопределённости) измерений устраняют калибровкой[6]. Считается, что в измерительной информации остаётся случайная составляющая ошибки измерения. Высокоточной наземной обработкой измерений является статистическая обработка с использованием методов оптимизации (метод наименьших квадратов, метод уравнивания, метод динамической фильтрации, метод Гаусса-Ньютона и т.д.).

Для своевременного устранения влияния описанных выше причин на каждом этапе разработки КА проводится контроль достижения требуемой точности геодезической привязки снимков. Показателем точности геодезической привязки снимков принято среднеквадратическое отклонение (СКО) плановых координат и высот точек местности[7]. Контроль СКО проводится расчётным путём

Бутко Александр Владимирович, начальник сектора проектного отдела.
E-mail: sandrbut@yandex.ru

по математическим моделям ошибки (неопределённости) геодезической привязки снимков. Анализ литературы показал отсутствие в данных моделях оценки достижимой СКО бортовой измерительной информации в результате высокоточной наземной обработки.

Возникает противоречие между необходимостью контроля точности геодезической привязки снимков на всех этапах разработки КА и отсутствием возможности оценки достижимой СКО бортовой измерительной информации в результате высокоточной наземной обработки.

Для преодоления указанного противоречия требуется решить научную задачу совершенствования методики сквозного контроля точности геодезической привязки снимков при создании КА ОЭН для учета СКО измеренных параметров бортовой аппаратурой в результате высокоточной наземной обработки.

В ходе решения научной задачи проведён обзор существующего методического обеспечения, разработана математическая модель ошибок параметров ориентации снимка по результатам высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации и модернизирована методика сквозного контроля точности геодезической привязки снимков. Далее даётся их описание и результаты апробирования.

ОБЗОР МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ

Под сквозным контролем точности геодезической привязки снимков при создании КА понимаются действия по определению составляющих ошибки определения параметров ориентации снимка, по контролю ошибки геодезической привязки космических снимков и формированию рекомендаций по достижению требуемого уровня.

Среди существующих методик по сквозному контролю точности геодезической привязки наиболее близкими к рассматриваемой проблеме являются:

1) «Метод выбора проектных параметров КА ДЗЗ по заданной погрешности привязки космических снимков» С.Ю. Самойлова[8];

2) «Методика априорной оценки точности координатных определений по космическим снимкам» В.И. Вершинина[9].

В методике 1 используется понятие «точностной модели КА» и приводится её состав[8]:

1. Погрешность знания положения КА на орбите вдоль радиус-вектора КА;
2. Погрешность знания положения КА на орбите вдоль вектора орбитальной скорости;
3. Погрешность знания положения КА на орбите вдоль направления по бинормали к орбите КА;
4. Погрешность знания ориентации КА относительно оси Xвск;
5. Погрешность знания ориентации КА относительно оси Yвск;
6. Погрешность знания ориентации КА относительно оси Zвск;
7. Погрешность знания фокусного расстояния оптической системы;
8. Погрешность привязки момента времени получения изображения, баллистической и информации об угловой ориентации КА к бортовой шкале времени (БШВ);
9. Погрешность знания угла разворота ОЭП-а относительно визирной оси;
10. Погрешность знания координат положения главной точки ОЭП-а по оси Yвск;
11. Погрешность знания координат положения главной точки ОЭП-а по оси Zвск;
12. Погрешность определения координат точки снимка вдоль столбцов изображения;
13. Погрешность определения координат точки снимка вдоль строк изображения;
14. Погрешность знания коэффициента дисторсии оптической системы;
15. Неперпендикулярность оптической оси к фокальной плоскости в плоскости XOY;
16. Неперпендикулярность оптической оси к фокальной плоскости в плоскости XOZ.

В методике 1 параметры из приведенного списка являются входными. Из описания методики 1 следует, что расчёт ошибок параметров ориентации снимков в результате высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации отсутствует.

Назначением методики 1 является выбор проектных параметров КА ДЗЗ по заданной погрешности геодезической привязки космических снимков. Методика позволяет на всех этапах разработки КА распределять (перераспределять) заданную погрешность привязки космических снимков по составляющим «точностной модели КА». Достижение полученных значений подразумевается обеспечивать за счёт инструментальных ошибок бортовых измерительных приборов. Также, методика 1 позволяет осуществлять контроль точности геодезической привязки снимков.

Из приведённого в методике 1 математического аппарата следует, что, без существенной доработки методики, учёт ошибок параметров ориентации снимков в результате высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации не возможен.

В методике 2 используется понятие элементов ориентирования (ЭО) снимка, которые характеризуют ориентацию каждого луча визирования в пространстве в момент съёмки. ЭО снимка состоят

из элементов внешнего ориентирования (ЭВО) и элементов внутреннего ориентирования. В свою очередь, ЭВО снимка делятся на угловые и линейные ЭВО. Входными параметрами в методике 2 являются угловые и линейные ЭВО снимка[9]. Из описания методики следует, что расчёт ошибок параметров ориентации снимков в результате высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации в методике 2 отсутствует. Учёт ошибок параметров ориентации снимков в результате высокоточной наземной обработки бортовой измерительной информации в данной методике возможен. Необходимо отметить, что используемый математический аппарат разработан в предположении равноточности угловых ЭВО снимка по координатным осям.

В методике 2 для априорной оценки точности ЭВО снимка по результатам наземной обработки предусмотрен упрощённый математический аппарат, учитывающий объём и точность измерительной информации. Упрощения заключаются в допущении постоянства частоты формирования измерительной информации и равноточности измерений. В реальности, вследствие движения центра масс КА по орбите и вращения КА вокруг центра масс, измерения формируются с переменной частотой и точностью.

Кроме этого, в методике 2 предусмотрен математический аппарат для распределения заданной ошибки геодезической привязки снимка по ЭО снимка. Данный математический аппарат может быть использован на начальном этапе проектирования для выбора проектных параметров КА ДЗЗ по заданной погрешности геодезической привязки космических снимков.

Таким образом, методику 2 можно использовать на всех этапах в случае обеспечения геодезической привязки снимков без организации наземной высокоточной обработки бортовой измерительной информации. Для применения методики 2 на всех этапах создания КА:

1. разработана математическая модель ошибок синтеза ЭВО снимка с учётом наземной обработки бортовой измерительной информации, получаемой в условиях движения КА;

2. модернизирована методика 2 для учёта неравноточности угловых ЭВО снимка по координатным осям.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОШИБОК СИНТЕЗА ЭВО СНИМКА

Полное описание математической модели ЭВО снимка приведено в работе[10].

Так как прямые измерения ЭВО снимка на борту не проводятся, на практике применяется синтез из бортовых измерений ориентации звёздного датчика (ЗД), параметров движения фазового центра (ФЦ) антенного устройства (АУ) навигационного приёмника (НП) и дополнительной информации. К дополнительной информации относится результат наземных или полётных геометрических калибровок. В результате геометрических калибровок определяется: взаимная ориентация каждого ЗД и визирной системы координат (ВСК), связанной с фокальной плоскостью оптико-электронной аппаратуры, и положение ФЦ каждого АУ НП по отношению к ВСК.

Данная модель предназначена для расчёта ковариационных матриц ошибок синтеза угловых и линейных ЭВО снимка по результатам высокоточной наземной обработки.

Расчёт ошибок синтеза ЭВО проводится по следующему алгоритму:

1) Подготовка исходных данных, включающих параметры траектории орбитального и углового движения КА, характеристик приборов и конструкции КА.

2) Расчёт засветки звёздных датчиков Землёй, Луной и Солнцем.

3) Расчёт распределения яркости по чувствительным элементам приёмника изображения ЗД и отношения сигнал к шуму для каждой звезды (модель снимка звёздного неба) с учётом движения КА.

4) Определение энергетических центров изображения звёзд по модели снимка звёздного неба.

5) Расчёт ошибок координат энергетических центров изображения звёзд

6) Вычисление компонент ковариационной матрицы ошибок n-го измерения ориентации осей приборной системы координат ЗД.

7) Вычисление компонент ковариационной матрицы ошибок решения системы кинематических уравнений в произвольной точке интервала съёмки.

8) Вычисление компонент ковариационной матрицы K_β ошибок определения ориентации осей ВСК (УЭВО снимка).

9) Расчёт видимости навигационных спутников с учётом расположения антенн и ориентации КА.

10) Выполнение этапов алгоритма трёхэтапного метода определения орбиты (определение координат фазового центра антенны)[11]:

- первоначальное определение орбиты;
- определение орбиты на короткой дуге;
- определение орбиты по результатам обработки нормальных мест.

11) Вычисление компонент ковариационной матрицы ошибок грубого определения на первом

этапе высокоточного алгоритма определения фактического орбитального движения.

12) Вычисление компонент ковариационной матрицы ошибок уточнения положения и ухода собственных часов НП по алгоритму линейного рекуррентного оценивания при неоднозначных определениях PPP-метода на втором этапе высокоточного алгоритма определения фактического орбитального движения.

13) Вычисление компонент ковариационной матрицы ошибок восстановления фактического орбитального движения на заданную эпоху из интервала проведения измерений НП на третьем этапе высокоточного алгоритма определения фактического орбитального движения.

14) Вычисление компонент ковариационной матрицы K_S ошибок синтеза параметров положения начала отсчёта ВСК в пространстве (ЛЭВО снимка).

В модели ошибок синтеза угловых ЭВО снимка учитываются следующие источники ошибок:

- шум считывания сигнала с выходного регистра матрицы;
- значения координат центров пикселей матрицы;
- значения координат звёзд в каталоге.

В модели учитываются следующие условия работы ЗД:

- ориентация ЗД относительно корпуса КА;
- ориентация оптико-электронной системы относительно корпуса КА;
- засветка приборов;
- движение КА.

Модель ошибок синтеза угловых ЭВО снимка включает:

1. Модель ошибок координат энергетических центров изображения звёзд, разработанная на основе метода среднего взвешенного[12].

2. Модель ошибок i-го измерения ориентации осей приборной системы координат ЗД на основе метода уравнивания измерений с каталожными значениями координат звёзд.

3. Модель ошибок уточнённых измерений ЗД в результате решения системы кинематических уравнений в произвольной точке интервала съёмки на основе универсального способа аппроксимации вращательного движения ЗД в форме кватернионов, приспособленного для случая достаточно частой временной сетки со значениями вектора и произвольной (в частности, редкой или сильно неравномерной) временной сетки со значениями кватерниона[13].

4. Модель ошибок K_β определения ориентации ВСК (УЭВО снимка) на основе метода уравнивания уточнённых измерений одного и более звёздных датчиков.

В модели ошибок синтеза линейных ЭВО снимка учитываются следующие источники ошибок:

- уход часов навигационного спутника (НС);
- уход частоты генератора НС;
- ионосферная задержка сигнала;
- эфемериды НС.

В модели учитываются следующие условия измерений навигационным приёмником:

- места установки приёмных антенн на корпусе КА (затенение рабочей зоны антенн и расстояние от ФЦ до начала отсчёта ВСК);
- места установки оптико-электронной системы на корпусе КА;
- движение КА.

Модель ошибок синтеза линейных ЭВО снимка включает:

1. Модель ошибок грубого определения положения ФЦ АУ и ухода собственных часов НП на первом этапе алгоритма трёхэтапного метода определения орбиты на основе метода решения навигационной задачи[14].

2. Модель ошибок уточнения положения фазового центра АУ и ухода собственных часов НП по алгоритму линейного рекуррентного оценивания при неоднозначных определениях PPP-метода на втором этапе алгоритма трёхэтапного метода определения орбиты КА[15].

3. Модель ошибок восстановления фактического орбитального движения фазового центра на заданную эпоху из интервала проведения измерений НП на третьем этапе алгоритма трёхэтапного метода определения орбиты по методу наименьших квадратов[11].

4. Модель ошибок K_S синтеза координат ВСК в пространстве (ЛЭВО снимка).

Исходными данными по приборам и конструкции КА являются СКО:

- уровня сигнала с выходного регистра матрицы,
- координат центров пикселей матрицы,
- координат звёзд в каталоге,
- параметров ориентации ЗД относительно корпуса КА,
- параметров ориентации оптико-электронной системы относительно корпуса КА,
- дальности из-за ухода часов НС,

- дальности из-за ухода частоты генератора НС,
- дальности из-за ионосферной задержки сигнала,
- эфемерид НС,
- координат ФЦ в ВСК.

Подготовка исходных данных для расчёта ошибок синтеза ЭВО, включающих параметры траектории орбитального и углового движения КА, проводится в процессе имитационного моделирования целевого функционирования КА. Для этого используется комплексная имитационная модель целевого применения КА ОЭН, используемая для оценивания производительности наблюдения[16-18].

Результатом имитационного моделирования целевого применения КА является:

- радиус-вектор (из центра Земли до центра масс КА) в проекции на оси Гринвичской системы координат;
- вектор скорости орбитального движения центра масс КА в проекции на оси Гринвичской системы координат;
- компоненты кватерниона ориентации КА;
- вектор угловой скорости КА в проекции на оси связанной с КА системы координат.

Эта информация используется вместе с исходными данными по приборам и конструкции КА в вычислительных процедурах алгоритма математической модели ошибок синтеза ЭВО снимка с учётом высокоточной наземной обработки измерений.

ОПИСАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

Для обеспечения требуемой точности геодезической привязки снимков разработан алгоритм сквозного контроля точности геодезической привязки снимков на этапах создания КА. Для этого модернизирована «Методика априорной оценки точности координатных определений по космическим снимкам» В.И. Вершинина (далее Методика).

С целью обеспечения требуемой точности геодезической привязки снимков предлагается методика сквозного контроля, заключающейся в выполнении следующих действий:

1) Определение величины составляющих модели ошибок информации о КА по заданной точности геодезической привязки снимков на этапе проектирования по Методике.

2) Контроль превышения заданной ошибки геодезической привязки космических снимков осуществляется по Методике.

3) Принятие решения о повышении точности измерительной информации с помощью наземной обработки.

4) Контроль точности геодезической привязки по модернизированной Методике.

5) Уточнение параметров КА, обеспечивающих снижение влияния эволюций КА на степень повышения точности геодезической привязки.

Действие 4 методики сквозного контроля предлагается проводить по следующему алгоритму:

1. Проведение имитационного моделирования целевого функционирования КА для получения параметров движения центра масс по орбите и вокруг центра масс.

2. По данным пункта 1 алгоритма проведение моделирования измерений бортовыми приборами и вычисление ошибок элементов внешнего ориентирования снимков по разработанной модели ошибок.

3. Вычисление ошибок геодезической привязки снимков по модернизированной методике.

Действие 5 методики сквозного контроля требует отдельного внимания, поэтому должна быть рассмотрена вне данной работы.

Далее приведено описание модернизации Методики для учёта неравноточности определения угловых ЭВО снимка по координатным осям.

В Методике входными параметрами являются среднеквадратическое отклонение угловых элементов внешнего ориентирования снимка m_β и компоненты ковариационной матрицы ошибок линейных элементов внешнего ориентирования снимка K_S:

$$K_{ГП} = \mu^2 \cdot \left[A^T \cdot \left\{ P^{-1} + \frac{1}{\mu^2} \cdot \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1} \quad (1)$$

и ошибка единицы веса: $\mu^2 = \mu^2_{изм} + \mu^2_{мет} + \frac{f^2 \cdot m^2_\beta}{\rho^2}$, $\mu^2_{изм}$ – ошибка единицы веса измере-

ния координат изображения точки на снимке; $\mu^2_{изм}$ – ошибка единицы веса измерения координат изображения точки из-за отличия модельных от реальных процессов, происходящих во время съёмки; ρ – количество секунд в радиане; f – фокусное расстояние оптико-электронной аппаратуры; P – весовая матрица измерений, K_S – ковариационная матрица ошибок линейных элементов внешнего ориентирования снимка, определяемая по формуле (2); A и $B = -A$ – матрицы частных производных координат точки по ЭВО снимка.

В формуле (1) матрица P является единичной матрицей. Если предположить, что угловые ЭВО снимка не равноточные (матрица Р для СКО угловых ЭВО не единичная), и провести следующую последовательность преобразований:

1) $$K_{ГП} = \left[A^T \cdot \left\{ \mu^2 \cdot P^{-1} + \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1},$$

2) $$K_{ГП} = \left[A^T \cdot \left\{ \left(\mu^2_{изм} + \mu^2_{мет} + \frac{f^2 \cdot m^2_\beta}{\rho^2} \right) \cdot P^{-1} + \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1},$$

3) $$K_{ГП} = \left[A^T \cdot \left\{ \left(\mu^2_{изм} + \mu^2_{мет} \right) \cdot P^{-1} + \frac{f^2 \cdot m^2_\beta}{\rho^2} \cdot P^{-1} + \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1},$$

4) $$K_{ГП} = \left[A^T \cdot \left\{ \mu^2 \cdot P^{-1} + \frac{f^2 \cdot m^2_\beta}{\rho^2} \cdot P^{-1} + \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1},$$

5) $$K_{ГП} = \mu^2 \cdot \left[A^T \cdot \left\{ P^{-1} + \frac{f^2}{\mu^2} \cdot \frac{m^2_\beta}{\rho^2} \cdot P^{-1} + \frac{1}{\mu^2} \cdot \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1},$$

то получим модернизированную формулу оценивания ошибок геодезической привязки снимка:

$$K_{ГП} = \mu^2 \cdot \left[A^T \cdot \left\{ P^{-1} + \frac{f^2}{\mu^2} \cdot K_\beta + \frac{1}{\mu^2} \cdot \left(B \cdot K_S \cdot B^T \right) \right\}^{-1} \cdot A \right]^{-1} \qquad (2)$$

и ошибку единицы веса: $\mu^2 = \mu^2_{изм} + \mu^2_{мет}$, где K_β – ковариационная матрица ошибок угловых ЭВО снимка.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБИРОВАНИЯ МЕТОДИКИ

Проверка математических моделей ошибок определения угловых и линейных элементов ориентирования снимка и модифицированной «Методики априорной оценки точности координатных определений по космическим снимкам» проведена на программном комплексе (ПК) априорной оценки точности геодезической привязки снимков. ПК выполнен в составе одной программной компоненты.

ПК предназначен для решения следующих задач:

- моделирование работы звёздных датчиков;
- моделирование работы навигационного приёмника;
- моделирование обработки измерительной информации;
- оценка точности синтеза элементов внешнего ориентирования снимков;
- априорная оценка точности координатной привязки снимков.

При запуске ПК на расчёт выполняются:

- расчёт ошибок измерений в результате моделирования работы звёздных датчиков;
- расчёт ошибок измерений в результате моделирования работы навигационного приёмника;

- расчёт ошибок результатов обработки измерительной информации;
- расчёт ошибок элементов внешнего ориентирования снимков;
- вывод результатов моделирования в виде графиков зависимости ошибок от времени;
- расчёт ошибок координатной привязки снимков;
- вывод результатов в виде таблицы.

ПК реализует следующие основные функции:
- расчёт ошибок;
- отображение результатов оценки по каждому снимку оптико-электронного наблюдения.

Данный ПК зарегистрирован в государственном реестре РИД как программа для ЭВМ «Программный комплекс априорной оценки точности координатной привязки снимков ОЭН с учётом эволюций КА и наземной обработки результатов измерений» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660183 от 03.05.2024г; правообладатель: Акционерное общество « ракетно-космический центр «Прогресс»; автор: Бутко Александр Владимирович) и используется в деятельности АО «РКЦ «Прогресс» для априорной оценки точности координатной привязки снимков с КА (в том числе малых КА), оборудованных оптико-электронной аппаратурой.

Верификация разработанной методики проведена путём сравнения результатов расчёта с полученными оценками точности геодезической привязки снимков с функционирующего КА.

Данный КА функционирует на орбите со следующими характеристиками:
- высота орбиты – 475 км;
- тип орбиты – солнечно – синхронная;
- освещённая часть орбиты – восходящая.

Для подготовки исходных данных, включающих параметры траектории орбитального и углового движения КА, проведено моделирование съёмки территории всей суши Земли, длительность съёмки (одного включения) составляла 10 секунд. Сжатие информации 4 бит/пиксель.

Для моделирования доставки информации принимался один пункт приёма, расположенный в городе Москва, со скоростью приёма 300 Мбит/с.

К бортовой измерительной информации данного КА предъявлено требование для обеспечения геодезической привязки снимков без использования опорных точек с ошибкой не более 10-15 метров на уровне 1s (с вероятность 65%). На лётных испытаниях реального КА в результате высокоточной обработки измерительной информации получена ошибка геодезической привязки снимков порядка 6-ти метров [19].

Показателем эффективности для оценки степени повышения точности с использованием предлагаемого методического аппарата принято относительное отклонение ошибки для каждого снимка:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{\sigma_{ГП1} - \sigma_{ГП0}}{\sigma_{ГП1}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{ГП0}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) координат точек снимка в результате геодезической привязки с учётом высокоточной обработки измерительной информации; $\sigma_{ГП1}$ – СКО координат точек снимка в результате геодезической привязки без учёта высокоточной обработки измерительной информации.

В результате определения параметров распределения показателей виртуальной (достижимой КА) производительности на комплексной имитационной модели целевого применения КА ОЭН[16-18], используемой для оценивания производительности наблюдения на интервале одних суток, получена программа съёмки из 22 снимков:

на 1 витке - 3 снимка;
на 7 витке - 4 снимка;
на 8 витке - 5 снимков;
на 14 витке - 4 снимка;
на 15 витке - 6 снимков,

и сформированы соответствующие параметры траектории орбитального и углового движения КА.

Оценка ошибок геодезической привязки проведена для полученных модельных снимков с учётом и без учёта высокоточной обработки измерительной информации с номинальным значением параметров звёздного датчика (таблица 1) и параметров навигационного приёмника (таблица 2). Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Анализ результатов показывает повышение точности геодезической привязки до уровня существующего КА от 4 до 12 метров. Это позволяет сделать вывод, что полученные результаты подтверждают достоверность вычислений на математических моделях ошибок синтеза угловых и линейных элементов внешнего ориентирования космических снимков.

Также результаты показывают влияние орбитального движения и движения вокруг центра масс КА на повышение точности геодезической привязки. На 15 витке высокоточная обработка позволи-

ла повысить точность геодезической привязки 19-го снимка с эффективностью 99,7%. Аналогичного результата не удалось достичь на 14 витке при обработке 15-го снимка (таблица 3). Это связано с малым объёмом и низкой точностью измерений.

Таблица 1. Номинальные параметры установки звёздных датчиков и частоты их работы

Номер звёздного датчика	1	2	3	4
Значение азимутального угла (α), градус	65	295	245	115
Значение угла над местным горизонтом (δ), градус	30	30	30	30
Частота работы, Гц	1			

Таблица 2. Номинальные параметры навигационного приёмника

Номер антенного устройства	1	2	3	4
Значение азимутального угла (α), градус	0	90	180	270
Значение угла над местным горизонтом (δ), градус	90	90	90	90
Частота работы навигационного приёмника, Гц	0.1			

Таблица 3. Ошибка геодезической привязки с номинальными значениями параметров КА

№ витка	№ снимка	Значение угла крена γ, градус	Ошибка плановых координат, м		Показатель эффективности (Δ), %
			без учёта высокоточной обработки ($\sigma_{ГП1}$)	с учётом высокоточной обработки ($\sigma_{ГП0}$)	
1	1	-21,1	82,7	6,1	92,7
	2	-31,1	96,7	8,1	91,6
	3	-27,8	116,1	7,4	93,6
7	4	-0,9	52,9	4,9	90,8
	5	-38,6	97,0	10,5	89,2
	6	-38,1	66,9	10,3	84,6
	7	-35,2	70,2	9,6	86,3
8	8	-20,3	53,7	6,0	88,8
	9	-33,3	64,7	8,8	86,5
	10	-28,6	62,8	7,7	87,8
	11	-14,3	57,7	5,4	90,7
	12	-23,8	100,2	6,8	93,3
14	13	-38,9	903,5	11,2	98,8
	14	-2,4	-	-	-
	15	-29,3	1185,3	1185,2	0,0
	16	-35,4	372,1	9,2	97,5
15	17	-15,5	331,8	5,0	98,5
	18	-1,8	426,1	4,9	98,8
	19	-5,1	1169,7	4,1	99,7
	20	-39,4	96,8	10,5	89,2
	21	-35,3	100,1	9,2	90,8
	22	-36,0	85,7	9,5	89,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сквозного контроля точности геодезической привязки снимков на всех этапах создания КА модифицирована «Методика априорной оценки точности координатных определений по космическим снимкам» В.И. Вершинина в части учёта неравноточности определения угловых ЭВО снимка по связанным осям съёмочной аппаратуры. Для учёта наземной обработки бортовой измерительной информации разработана точностная модель синтеза угловых и линейных ЭВО снимка.

По результатам апробирования подтверждена достоверность результатов разработанных моделей синтеза угловых и линейных элементов внешнего ориентирования снимка с учётом наземной обработки и модифицированной методики. Рассмотренные в данной работе модели по функциональным возможностям являются элементами цифрового двойника КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абламейко, С.В.* Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютерных технологий. мех.-мат. и геогр. / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. – Минск : БГУ. 2012. – 159 с.
2. *Соловьев В.А.* Управление космическими полетами : в 2 ч. 2 ч. / В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
3. *Козлов, Д.И.* Конструирование автоматических космических аппаратов / Д.И. Козлов. Г.П. Аншаков. В.Ф. Агарков [и др.]; под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение. 1996. – 448 с.
4. *Филатов, А.Н.* Разработка методов и моделей параллельного нисходящего проектирования ракетно-космической техники в едином информационном пространстве: дисс. … канд. тех. наук: 05.07.02 / Александр Николаевич Филатов. – Самара, 2014. – 163 с.
5. *Ахметов, Р.Н.* Научный подход к повышению точности геодезической привязки изображений от космических аппаратов высокодетальной оптико-электронной съёмки Земли / Р.Н. Ахметов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 43–52.
6. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2013 – 69.
7. ГОСТ 59478-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень требований к данным дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне – М.: Стандартинформ, 2021 – 11 с.
8. *Самойлов, С.Ю.* Метод выбора проектных параметров космических аппаратов дистанционного зондирования Земли по заданной погрешности привязки космических снимков /. С.Ю. Самойлов // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2011. – № 5. – С. 18-25.
9. *Вершинин, В.И.* Априорная оценка точности координатных определений по космическим снимкам / В.И. Вершинин. – М.: Типография «Новости». 2011. – 250 с.
10. *Бутко, А.В.* Точностная модель определения элементов внешнего ориентирования космических снимков для поддержки принятия решения при создании космических аппаратов оптико-электронного наблюдения / А.В. Бутко // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – № 1. – С.73-79.
11. *Тучин, Д.А.* Автономное определение орбиты на борту космического аппарата / Д.А. Тучин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2019. – № 7. – 36 с.
12. *Аванесов, Г.А.* Исследование смещения энергетического центра изображений звёзд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки / Г.А. Аванесов, Т.В. Кондратьева, А.В. Никитин // Механика, управление и информатика. – 2009. – № 1. – С. 421-446.
13. *Бард, Й.* Нелинейное оценивание параметров / Й. Бард. – М.: Статистика, 1979.
14. Глобальная навигационная спутниковая система. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0. М.: – АО «Российские космические системы», 2016.
15. *Поваляев, А.А.* Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат / А.А. Поваляев. – М.: Радиотехника. 2008, – 328 с.
16. *Кащеев А.А.* Системный подход к моделированию основных узлов сквозного информационного тракта космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.А. Кащеев, С.А. Ларин, А.В. Бутко, Р.В. Тишкин // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании. Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет – 2010 – С. 297-301.
17. *Светников, О.Г.* Система автоматизированного проектирования основных узлов сквозного информационного тракта космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / О.Г. Светников, А.А. Кащеев, А.В. Бутко, В.К Скирмунт // Актуальные проблемы ракетно-космической техники (II Козловские чтения) – 2011. – Самара: Самарский научынй центр РАН, 2011. – 667 с.
18. *Баженов, В.И.* Моделирование основных характеристик и процессов функционирования космических аппаратов / В.И. Баженов, М.И. Осин. Ю.В. Захаров. – М.: Машиностроение. 1985.
19. *Ахметов, Р.Н.* Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П» / Р.Н. Ахметов, И.И. Зинина , А.А. Юдаков , В.В. Еремеев , А.Е. Кузнецов, В.И. Пошехонов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т.17. – №3. – С.41-47.

METHOD OF END-TO-END MONITORING OF THE GEOREFERENCING ACCURACY OF THE SPACEBORNE PICTURES

© 2026 A.V. Butko

Joint-stock company «Space-rocket center «Progress»

When developing optoelectronic observation spacecraft, it is necessary to carry out end-to-end monitoring of the achievable accuracy of georeferencing spaceborne pictures. Existing methods do not make it possible to predict the achievable value of the georeferencing error of spaceborne pictures taking into account ground high-precision processing of on-board measuring information and to formulate recommendations for ensuring the permissible level of georeferencing error. The paper describes the developed method of end-to-end monitoring taking into account the mathematical model of errors in the synthesis of elements of external orientation of the image and a model of errors in the synthesis of elements of external orientation of the image is developed taking into account the high-precision ground processing of on-board measuring information. A description is given of the modernization of the existing methodology for assessing the accuracy of georeferencing to take into account the results of calculation according to the model of errors in the synthesis of elements of external orientation. The results of calculation were compared according to the developed method of end-to-end monitoring of georeferencing accuracy with practical results. Reliability of the results of the developed procedure is shown.

Keywords: accuracy, error, measuring information, georeferencing, spaceborne pictures, statistics, optimization, ground high-precision processing.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-316-325
EDN: EVHMGK

REFERENCES

1. *Ablamejko, S.V.* Malye kosmicheskie apparaty: posobie dlya studentov fakul'tetov radiofiziki i komp'yuternyh tekhnologij. mekh.-mat. i geogr. / S. V. Ablamejko, V. A. Saechnikov, A. A. Spiridonov. – Minsk : BGU. 2012. – 159 s.
2. *Solov'ev V.A.* Upravlenie kosmicheskimi poletami : v 2 ch. 2 ch. / V.A. Solov'ev, L.N. Lysenko. – M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2010.
3. *Kozlov, D.I.* Konstruirovanie avtomaticheskih kosmicheskih apparatov / D.I. Kozlov. G.P. Anshakov. V.F. Agarkov [i dr.]; pod red. D.I. Kozlova. – M.: Mashinostroenie. 1996. – 448 s.
4. *Filatov, A.N.* Razrabotka metodov i modelej parallel'nogo niskhodyashchego proektirovaniya raketno-kosmicheskoj tekhniki v edinom informacionnom prostranstve: diss. ... kand. tekh. nauk: 05.07.02 / Aleksandr Nikolaevich Filatov. – Samara, 2014. – 163 s.
5. *Ahmetov, R.N.* Nauchnyj podhod k povysheniyu tochnosti geodezicheskoj privyazki izobrazhenij ot kosmicheskih apparatov vysokodetal'noj optiko-elektronnoj s'yomki Zemli / R.N. Ahmetov // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2021. – T. 18. – № 1. – S. 43–52.
6. RMG 29-2013. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya. – M.: Standartinform, 2013 – 69.
7. GOST 59478-2021. Dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Trebovaniya k dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Perechen' trebovanij k dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, poluchaemym s kosmicheskih apparatov optiko-elektronnogo nablyudeniya v vidimom i blizhnem infrakrasnom diapazone – M.: Standartinform, 2021 – 11 s.
8. *Samojlov, S.Yu.* Metod vybora proektnyh parametrov kosmicheskih apparatov distancionnogo zondirovaniya Zemli po zadannoj pogreshnosti privyazki kosmicheskih snimkov /. S.Yu. Samojlov // Vestnik FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. – 2011. – № 5. – S. 18-25.
9. *Vershinin, V.I.* Apriornaya ocenka tochnosti koordinatnyh opredelenij po kosmicheskim snimkam / V.I. Vershinin. – M.: Tipografiya «Novosti». 2011. – 250 s.
10. *Butko, A.V.* Tochnostnaya model› opredeleniya elementov vneshnego orientirovaniya kosmicheskih snimkov dlya podderzhki prinyatiya resheniya pri sozdanii kosmicheskih apparatov optiko-elektronnogo nablyudeniya / A.V. Butko // Cifrovaya obrabotka signalov. – 2023. – № 1. – S.73-79.
11. *Tuchin, D.A.* Avtonomnoe opredelenie orbity na bortu kosmicheskogo apparata / D.A. Tuchin // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha. – 2019. – № 7. – 36 s.
12. *Avanesov, G.A.* Issledovanie smeshcheniya energeticheskogo centra izobrazhenij zvyozd otnositel›no geometricheskogo centra na PZS-matrice i korrekciya metodicheskoj oshibki / G.A. Avanesov, T.V. Kondrat›eva, A.V. Nikitin // Mekhanika, upravlenie i informatika. – 2009. – № 1. – S. 421-446.
13. *Bard, J.* Nelinejnoe ocenivanie parametrov / J. Bard. – M.: Statistika, 1979.
14. Global'naya navigacionnaya sputnikovaya sistema. Interfejsnyj kontrol›nyj dokument. Obshchee opisanie sistemy s kodovym razdeleniem signalov. Redakciya 1.0. M.: – AO «Rossijskie kosmicheskie sistemy», 2016.
15. *Povalyaev, A.A.* Sputnikovye radionavigacionnye sistemy: vremya, pokazaniya chasov, formirovanie izmerenij i opredelenie otnositel'nyh koordinat / A.A. Povalyaev. – M.: Radiotekhnika. 2008, – 328 s.
16. *Kashcheev A.A.* Sistemnyj podhod k modelirovaniyu osnovnyh uzlov skvoznogo informacionnogo trakta kosmicheskih apparatov distancionnogo zondirovaniya Zemli / A.A. Kashcheev, S.A. Larin, A.V. Butko, R.V. Tishkin // Novye informacionnye tekhnologii v nauchnyh issledovaniyah i obrazovanii. Materialy XV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov, molodyh uchenyh i specialistov. – Ryazan': Ryazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet – 2010 – S. 297-301.
17. Svetnikov, O.G. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya osnovnyh uzlov skvoznogo informacionnogo trakta kosmicheskih apparatov distancionnogo zondirovaniya Zemli / O.G. Svetnikov, A.A. Kashcheev, A.V. Butko, V.K Skirmunt. // Aktual›nye problemy raketno-kosmicheskoj tekhniki (II Kozlovskie chteniya) – 2011.
18. Bazhenov, V.I. Modelirovanie osnovnyh harakteristik i processov funkcionirovaniya kosmicheskih apparatov / V.I. Bazhenov, M.I. Osin. Yu.V. Zaharov – M.: Mashinostroenie. 1985.
19. Ahmetov, R.N. Tochnostnye harakteristiki vyhodnoj produkcii vysokogo razresheniya KA «Resurs-P» / R.N. Ahmetov, I.I. Zinina , A.A. Yudakov , V.V. Eremeev , A.E. Kuznecov, V.I. Poshekhonov i dr. // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2020. – T.17. – №3. – S.41-47.

Alexander Butko, Sector Chief of Design Department. E-mail: sandrbut@yandex.ru