Научный подход к повышению точности геодезической привязки изображений от космических аппаратов высокодетальной оптико-электронной съёмки Земли

Р. Н. Ахметов [1], А. В. Филатов [1], Г. Н. Мятов [1], А. А. Юдаков [1], А. С. Нонин [1], А. Н. Козлов [1], Я. М. Клебанов [2], В. В. Еремеев [3], А. Е. Кузнецов [3]

[1] *Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, 443009, Россия*
E-mail: miatov@mail.ru

[2] *Самарский государственный технический университет, Самара, 443100, Россия*

[3] *Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина Рязань, 390005, Россия*

Эксплуатируемые в настоящее время высокодетальные оптико-электронные космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают потребителей информацией с разрешающей способностью снимков менее одного метра и с точностью геодезической привязки снимков на уровне единиц метров. В ближайшей перспективе планируется запуск отечественных сверхвысокодетальных КА ДЗЗ нового поколения с улучшенными тактико-техническими характеристиками, что требует разработки новых научно-прикладных подходов в области проектирования, испытаний и эксплуатации КА ДЗЗ. Одна из основных тактико-технических характеристик систем ДЗЗ состоит в точности определения координат объектов изображения. В настоящей работе представлен подход к повышению этой точности. Он основан на строгом математическом описании координатного соответствия одноимённых точек земной поверхности и полученного снимка, на систематическом мониторинге и калибровке бортовой измерительной и целевой аппаратуры и использовании модели термодеформации конструкции КА. Представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению основных факторов, влияющих на точность геодезической привязки: точность знания пространственного положения и угловой ориентации КА, относительного изменения конструктивных углов съёмочной и бортовой измерительной аппаратуры, геометрической нестабильности параметров конструкции КА. Эти результаты получены на статистически достоверной информации в ходе эксплуатации КА «Ресурс-П» и «Аист-2Д». В результате точность геодезической привязки (СКО) данных от КА «Ресурс-П» № 2, 3 достигнута в 7–9 м.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный телескопический комплекс, точность геодезической привязки объектов на снимке

Одобрена к печати: 27.11.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-43-52

Введение

Глобальный рынок космической съёмки Земли растёт вместе с характеристиками изображений, получаемых со спутников. Сегодня с оптико-электронных космических аппаратов (КА) поступает информация, которая достигает по разрешению доли метра и единиц метров по точности определения координат объектов на снимках. США и Франция первыми запустили сверхвысокодетальные КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют наблюдать земную поверхность с разрешающей способностью менее полуметра и в перспективе планируют довести точность геопривязки снимков до первых единиц метров (Agugiaro et al., 2012; Meguro, Fraser, 2010; Topan, Maktav, 2014).

Достижение высокой точности геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены требует учёта взаимосвязи и взаимовлияния конструктивных особенностей и деформаций элементов КА, точностных характеристик бортовых измерительных систем. При этом должны быть учтены фотограмметрические характеристики съёмочной аппаратуры, геометрические модели съёмки земной поверхности, результаты калибровки целевой и измерительной аппаратуры КА.

Результаты эксплуатации отечественных высокодетальных оптико-электронных КА ДЗЗ типа «Ресурс» дают основание сделать вывод о правильности представленного ниже подхода, который обеспечит для следующего поколения сверхвысокодетальных КА ДЗЗ типа «Ресурс-ПМ» повышение точности геодезической привязки снимков. Теоретические и экспериментальные работы, проведённые в рамках космической системы (КС) «Ресурс-П» с КА № 2 и 3, позволили повысить точность геопривязки снимков на 25–30 % относительно требуемого показателя с доведением среднеквадратического отклонения (СКО) до 7–9 м.

Положительные экспериментальные результаты были достигнуты на основе разработанной методики орбитальной отработки КС «Ресурс-П», основанной на выявлении системных связей и закономерностей функционирования подсистем КС, а также на геометрической полётной калибровке съёмочной аппаратуры КА и новых бортовых и наземных алгоритмах сбора и обработки бортовой измерительной информации.

Предлагаемый ниже подход основан: на строгом аналитическом описании координатного соответствия точек земной поверхности и пикселей изображения; уточнении параметров этого соответствия путём калибровки бортовой аппаратуры по наземным полигонам; учёте термодеформации конструкции космического аппарата.

Базовые положения

Широкое практическое применение при стандартной обработке снимков с КА типа «Ресурс-П» и «Аист-2Д» нашла математическая модель координатно-временного обеспечения, представленная в работах (Ахметов и др., 2017, 2020; Мятов, 2014; Современные..., 2015).

Геодезическая привязка снимка, формируемого съёмочной аппаратурой КА, осуществляется на основе математической модели (*рис. 1*), которая описывает перемещение в пространстве визирного луча телескопа и позволяет рассчитать для каждого пикселя снимка с координатами (m, n) его геодезические координаты (λ, φ) с учётом высоты местности в системах координат WGS-84, ПЗ-90, СК-42 и др.

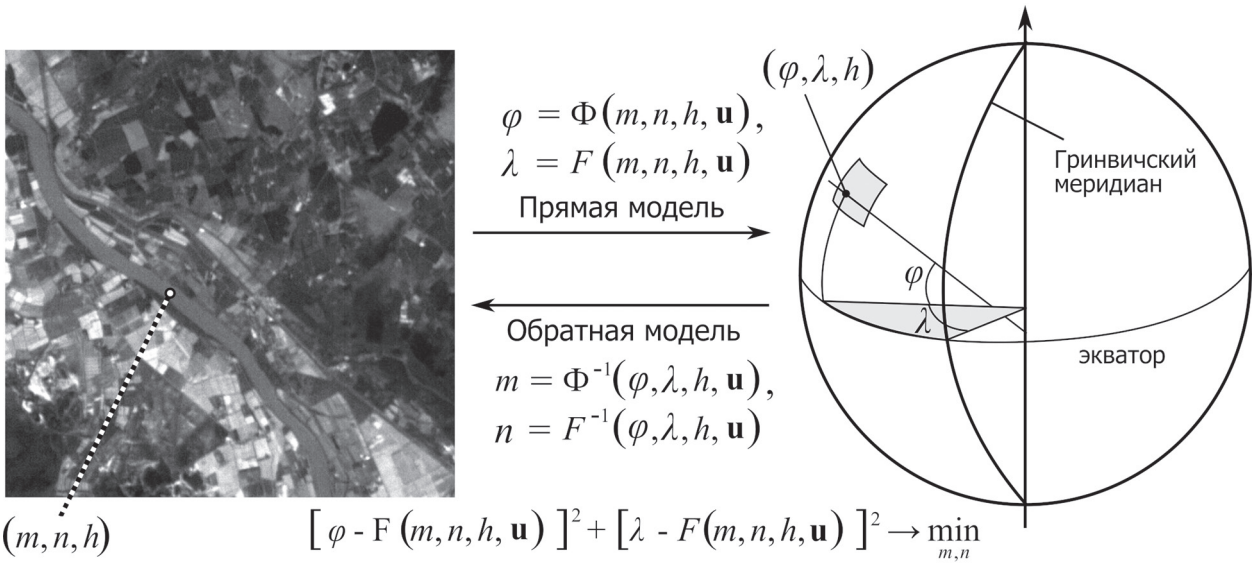


Рис. 1. Модель координатно-временного обеспечения: (m, n) — координаты пикселя; h — высота местности на выбранном референц-эллипсоиде; $\mathbf{u}$ — вектор входных параметров, описывающий элементы внутреннего и внешнего ориентирования съёмочной аппаратуры КА

Уравнение, определяющее координаты $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ сканируемой в момент времени t точки земной поверхности в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК) (*рис. 2*, см. с. 45), имеет вид:

$$\mathbf{p}_G(t) = \mathbf{p}(t) + \mathbf{r}(t), \tag{1}$$

где $\mathbf{r}(t)$ — вектор, определяющий положение точки земной поверхности относительно КА в гринвичской геоцентрической системе координат; $\mathbf{p}(t)$ — вектор, определяющий пространственное положение КА в момент времени $t = t_0 + t_c(n - 1)$, соответствующий формированию строки с номером n. Здесь t_0 — условное время съёмки первой строки изображения; t_c — интервал съёмки.

Уточним уравнение (1) в части $\mathbf{r}(t) = s\mathbf{r}_G(t)$, где s — масштабный коэффициент, и определим для произвольного момента времени в гринвичской геоцентрической системе координат единичный вектор $\mathbf{r}_G(t)$ направляющих косинусов визирного луча, а также пространственное положение съёмочного устройства $\mathbf{p}(t)$. Вектор $\mathbf{r}_G(t)$ рассчитаем по формуле:

$$\mathbf{r}_G(t) = \mathbf{R}_{\text{ГС}}(t)\mathbf{R}_{\text{КУ}}(t)\mathbf{r}_{\text{В}}(t), \tag{2}$$

где $\mathbf{R}_{\text{КУ}}(t)$ — матрица перехода от визирной системы координат (ВСК) к связанной системе координат (ССК), определяемая конструктивными углами между съёмочной аппаратурой и звёздным датчиками, которые измеряют угловое положение КА на момент съёмки земной поверхности; $\mathbf{R}_{\text{ГС}}(t)$ — матрица перехода от ССК к ГСК в заданный момент времени, характеризующая угловую ориентацию КА; $\mathbf{r}_{\text{В}}(t)$ — вектор направляющих косинусов в ВСК, определяемый моделью съёмочной аппаратуры. Вектор $\mathbf{r}_{\text{В}}(t)$ задаётся как:

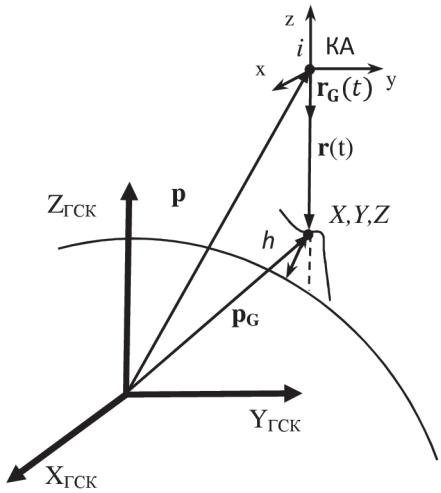


Рис. 2. Определение геоцентрических координат точки снимка

$$r_B(t) = \begin{pmatrix} \text{tg}(\Psi_y) \\ \text{tg}(\Psi_x) \\ -1 \end{pmatrix} \frac{f}{K},$$

где Ψ_y, Ψ_x — углы луча в ВСК, определяющие положение соответствующего сканируемой точке земной поверхности пикселя; f — фокусное расстояние; K — множитель, выбираемый так, чтобы $\left|\mathbf{r}_{\text{В}}(t)\right| = 1$.

Вектор $\mathbf{p}(t)$ определяет пространственное положение съёмочной системы по результатам обработки навигационных измерений датчиков ГЛОНАСС/GPS (ГЛОНАСС — Глобальная навигационная спутниковая система; GPS — *англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования).

Следовательно, вектор r(t) направляющих косинусов визирного луча в гринвичской геоцентрической системе координат рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{r}(t) = s\,\mathbf{r}_G(t) = s\mathbf{R}_{\text{ГС}}(t)\mathbf{R}_{\text{КУ}}(t)\mathbf{r}_{\text{В}}(t).$$

Обратные соотношения по отношению к функциям $\varphi = \Phi(m, n, h, \mathbf{u})$, $\lambda = F(m, n, h, \mathbf{u})$, определяющим проекцию точки с заданными геодезическими координатами в планарной системе координат снимка, имеют вид:

$$m = \Phi^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{u}), \quad n = F^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{u}), \tag{3}$$

где вектор $\mathbf{u}$ характеризует статические и динамические параметры векторов $\mathbf{p}(t)$ и $\mathbf{r}_G(t)$. Параметры в формуле (3) рассчитываются численно путём минимизации функционала:

$$\left[\varphi - \Phi(m, n, h, \mathbf{u})\right]^2 + \left[\lambda - F(m, n, h, \mathbf{u})\right]^2 \to \min_{m,n}.$$

Пути повышения точности геопривязки

На стадии проектирования КА типа «Ресурс-П» выявлены основные факторы (*таблица*), влияющие на точность геодезической привязки снимков: элементы внутреннего ориентирования (ЭВнО) (Ψ_y, Ψ_x), элементы внешнего ориентирования (ЭВО) ($\mathbf{R}_{ГС}(t)$, $\mathbf{p}(t)$) и конструктивные углы ($\mathbf{R}_{КУ}(t)$). Точность оценки этих параметров определяется, во-первых, адекватностью аналитической модели координатного соответствия одноимённых точек земной поверхности и снимка (Ахметов и др., 2017, 2020; Мятов, 2014; Современные..., 2015), во-вторых — учётом деформации конструкции КА.

Факторы, влияющие на точность геодезической привязки

№ п/п	Фактор	Значение	
		проектное	требуемое
1	Погрешность определения пространственного положения КА (одномоментные векторы)	5 м	0,5 м
2	Погрешность элементов внутреннего ориентирования съёмочной аппаратуры	1,8″	0,4″
3	Погрешности определения положения осей связанной системы координат по измерениям звёздных датчиков	2,5″	1″
4	Нестабильность параметров, характеризующих конструктивные углы между оптическими осями съёмочной аппаратуры и звёздными датчиками:		
4.1	• нестабильность параметра конструкции съёмочной аппаратуры (оптико-электронного телескопического комплекса)	15″	не более 2″
4.2	• нестабильность параметра конструкции обеспечивающего модуля	16″	не более 2″

Точность, с которой определяются эти характеристики на борту КА, не обеспечивает требуемого качества геодезической привязки снимков.

Из *таблицы* следует, что основное влияние на точность геопривязки снимков оказывают два фактора: погрешность определения ЭВнО и погрешность определения угла между оптическими осями съёмочной аппаратуры и звёздными датчиками (конструктивные углы). Точность определения углового положения КА минимизируется за счёт установки на борт КА более совершенных звёздных датчиков. В рамках предполётной наземной калибровки выполняются работы по определению значений конструктивных углов. Однако изменения при перегрузках, которые претерпевает конструкция КА при выводе на рабочую орбиту, и влияние температурных деформаций конструкции в процессе полёта не позволяют с необходимой точностью определить ориентацию визирной системы координат съёмочной аппаратуры, зная ориентацию звёздных датчиков. В связи с этим возникает необходимость проведения полётной калибровки как отдельных приборов, так и КА в целом на орбите.

Точность определения пространственного положения КА (см. *таблицу*, п. 1) с помощью методов высокоточного определения параметров движения низкоорбитальных КА с использованием данных аппаратуры спутниковой навигации можно довести до 0,5 м (Пасынков, 2015).

В целях уточнения параметров ЭВнО и конструктивных углов разработана методика орбитальной отработки КС «Ресурс-П» (Ахметов, 2010; Ахметов и др., 2017; Eremeev et al., 2014), которая включает ряд организационно-технических и методических мероприятий:

- установку на борту КА системы сбора измерительной информации;
- создание наземного аппаратно-программного комплекса обработки измерительной информации;
- внедрение методики высокоточной геодезической привязки снимков и калибровки съёмочной аппаратуры КА в части уточнения ЭВнО и конструктивных углов между телескопическим комплексом и астродатчиками с использованием наземных полигонов;
- реализацию специальных калибровочных режимов съёмки земной поверхности КА.

В результате проведённых мероприятий погрешность определения положения ПЗС-матриц (прибор с зарядовой связью, *англ*. CCD — Charge-Coupled Device) в фокальной плоскости с учётом дисторсии и фокусного расстояния объектива не превысила 1 пикселя, а углы ориентации приборных систем координат звёздных датчиков относительно визирной системы координат съёмочной аппаратуры были получены с ошибкой менее 1″ (см. *таблицу*, п. 2, 3).

Найденные поправки к ЭВнО были учтены в моделях геопривязки $\Phi(m, n, h, \mathbf{u})$ и $F(m, n, h, \mathbf{u})$. По результатам многократных съёмок опорных полигонов установлено, что ошибка измерения координат объектов на панхроматических и спектрозональных изображениях, получаемых от КА «Ресурс-П» № 2 и 3, не превышает 9 м (Ахметов и др., 2020).

Из *таблицы* следует, что при условии снижения погрешностей измерений ЭВнО и конструктивных углов до 1″ и установки на борт КА более точных звёздных датчиков (на перспективном сверхвысокодетальном КА «Ресурс-ПМ» устанавливаются звёздные датчики разработки Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) БОКЗ-МР (блок определения координат звёзд)) точность оценки ориентации визирующего луча съёмочной аппаратуры определяется конструктивными особенностями КА. В первую очередь точность геопривязки зависит от стабильности конструкций оптико-электронного телескопического комплекса (ОЭТК) и обеспечивающего модуля (ОМ), в частности стабильности кронштейнов крепления звёздных датчиков и конструкции посадочных мест под эти приборы.

Смещение акцента погрешности, влияющей на точность геопривязки в сторону конструкции КА, объясняется тем, что с приближением требований по точности геопривязки снимков к первым единицам метров необходимо учитывать погрешности на прецизионном уровне, которые ранее были «поглощены» более грубыми ошибками. Вопрос стабильности конструкции требует отдельного детального исследования в связи с тем, что разработчик элементов конструкции КА не имеет возможности подтвердить требуемую стабильность на уровне единиц секунд (в общемировой практике не существует систем, которые позволяют проводить измерения сложных и крупногабаритных конструкций с такой точностью).

Для уменьшения влияния указанных погрешностей необходимо комплексное решение задач, включающих в себя повышение компактности расположения аппаратуры, оптимизацию несущей конструкции и снижение неоднородности температурных полей, вызывающих её перекосы, использование материалов с наиболее благоприятным сочетанием физико-механических свойств: минимальным коэффициентом температурного линейного расширения, низким удельным весом, стабильностью и конструкционной прочностью. Важно также располагать возможностью корректировки параметров зависимостей (3) в соответствии с измеренными и расчётными характеристиками температурных полей оптической аппаратуры и несущей конструкции.

Поэтому приведённые в *таблице* (п. 4.1 и 4.2) параметры в графе «проектное значение» носят оценочный характер с учётом исходных данных разработчиков ОЭТК и ОМ, которые, как показывают результаты лётных испытаний, на порядок ниже на этапе орбитальной отработки КА. Например, аналогичная съёмочная аппаратура, установленная на КА «Аист-2Д», демонстрирует высокую стабильность конструкции на протяжении всего срока эксплуатации на уровне не более 1–2″. Возникшее несоответствие, характеризуемое параметрами в графе «требуемое значение», подлежит устранению согласно методике, приведённой ниже.

Для решения всех перечисленных выше задач в части определения стабильности конструкции требуется создание математических моделей, позволяющих подтверждать выполнение жёстких требований к термостабильности конструкции с учётом малого изменения геометрии конструкции, не фиксируемого измерительными системами.

Для определения влияния на точность привязки термоаберраций необходима разработка интегрированных термооптикомеханических моделей ОЭТК (Клебанов и др., 2014), позволяющих рассчитывать параметры внутреннего ориентирования Ψ_y, Ψ_x в соответствии с текущими тепловыми воздействиями. С этой целью сначала методом конечных элементов рассчитываются нестационарные температурные и деформационные поля всей конструкции ОЭТК. Затем в оптическом пакете определяются возникающие при этом поперечные оптические аберрации и соответствующие им углы Ψ_y и Ψ_x.

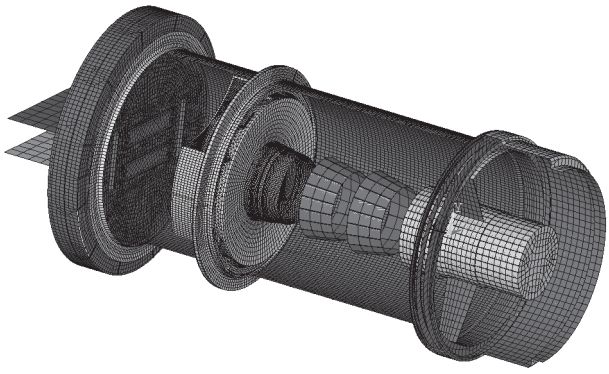


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели конструкции ОЭТК «Аврора», установленного на МКА «Аист-2Д»

Пример реализации такого подхода — разработка модели ОЭТК «Аврора», установленного на малом космическом аппарате (МКА) «Аист-2Д». Особенности конструкции «Авроры» изложены в работе (Кирилин и др., 2017). Общий вид конечно-элементной модели конструкции ОЭТК «Аврора», построенной в многодисциплинарном комплексе для инженерного анализа CAE ANSYS, показан на *рис. 3*. Изменённые вследствие термодеформаций форма и положение оптических деталей затем были переданы в программный пакет Zemax (Клебанов и др., 2014). В качестве примера на *рис. 4* показаны рассчитанные в Zemax пятна рассеяния для недеформированной и деформированной под воздействием температурных полей оптической системы телескопа. Здесь следует обратить внимание на разные масштабы представления данных на *рис. 4* (см. с. 49). Смещение центров пятен рассеяния позволяет достаточно точно рассчитать влияние термоабберацій на координаты наблюдаемого объекта (Miks, Novak, 2012). Определённая сложность состоит в том, что разные авторы по-разному определяют положение центров пятен рассеяния, используя, например, отличающиеся друг от друга способы нахождения центров тяжести изображения или выбирая наиболее яркие места (Михельсон, 1995). Предпочтение тому или иному способу может быть отдано по результатам экспериментальной верификации.

Необходима также системная разработка термодеформационных конечно-элементных моделей части несущей конструкции КА, которая влияет на точность геопривязки, — тракта крепления звёздных датчиков относительно ОЭТК.

С учётом поправки к конструктивным углам между съёмочной аппаратурой и звёздными датчиками в этом случае получим:

$$\mathbf{R}_{\text{КУ}}(t) = \Lambda_1(t)\Lambda_2(t)\Lambda_3(t)\Lambda_{\text{ЗД}}^{-1}\Lambda_{\text{ОЭТК}},$$

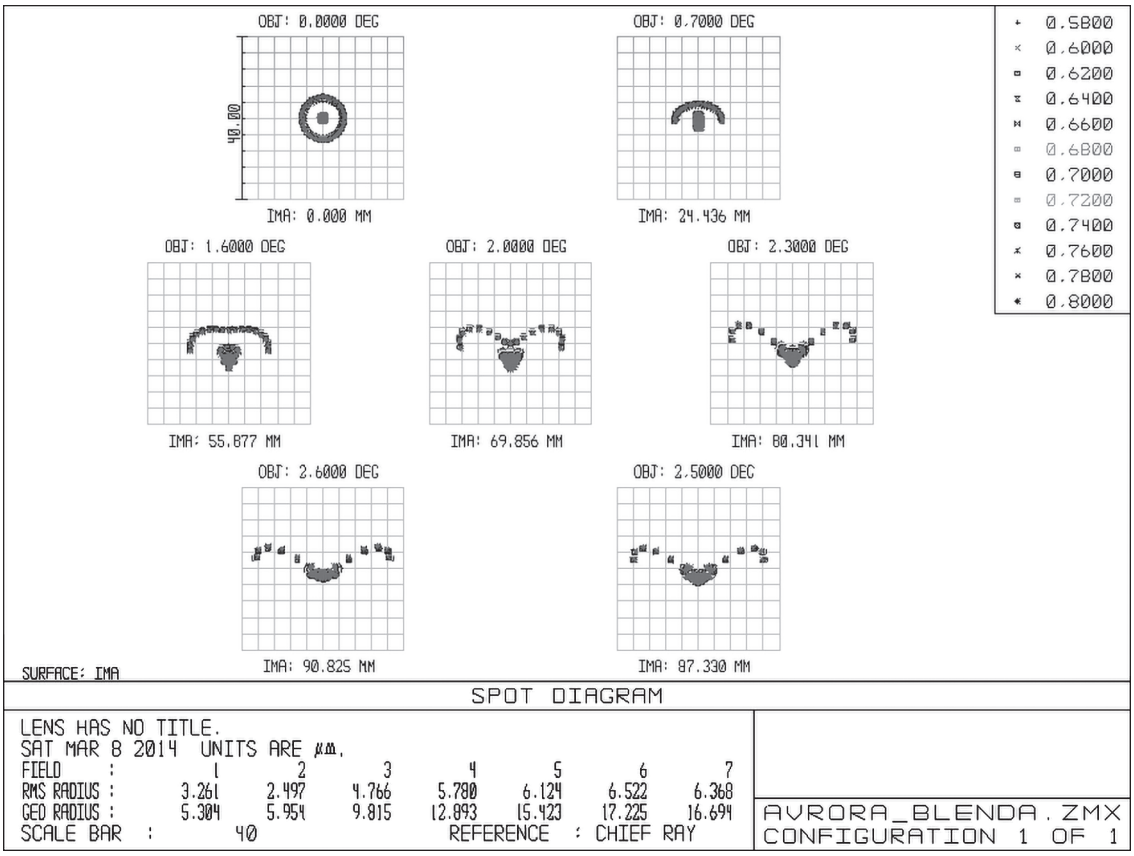
где $\Lambda_{\text{ЗД}}^{-1}$ — кватернион положения осей ССК по измерениям звёздных датчиков; $\Lambda_{\text{ОЭТК}}$ — кватернион ориентации ВСК ОЭТК; Λ_1, Λ_2, Λ_3 — кватернионы положения осей связанной системы координат, учитывающие термоупругие деформации конструкции КА:

$$\Lambda_1(t) = \begin{pmatrix} \sin\frac{\alpha}{2} \\ \cos\frac{\alpha}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Lambda_2(t) = \begin{pmatrix} \sin\frac{\beta}{2} \\ \cos\frac{\beta}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Lambda_3(t) = \begin{pmatrix} \sin\frac{\gamma}{2} \\ \cos\frac{\gamma}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

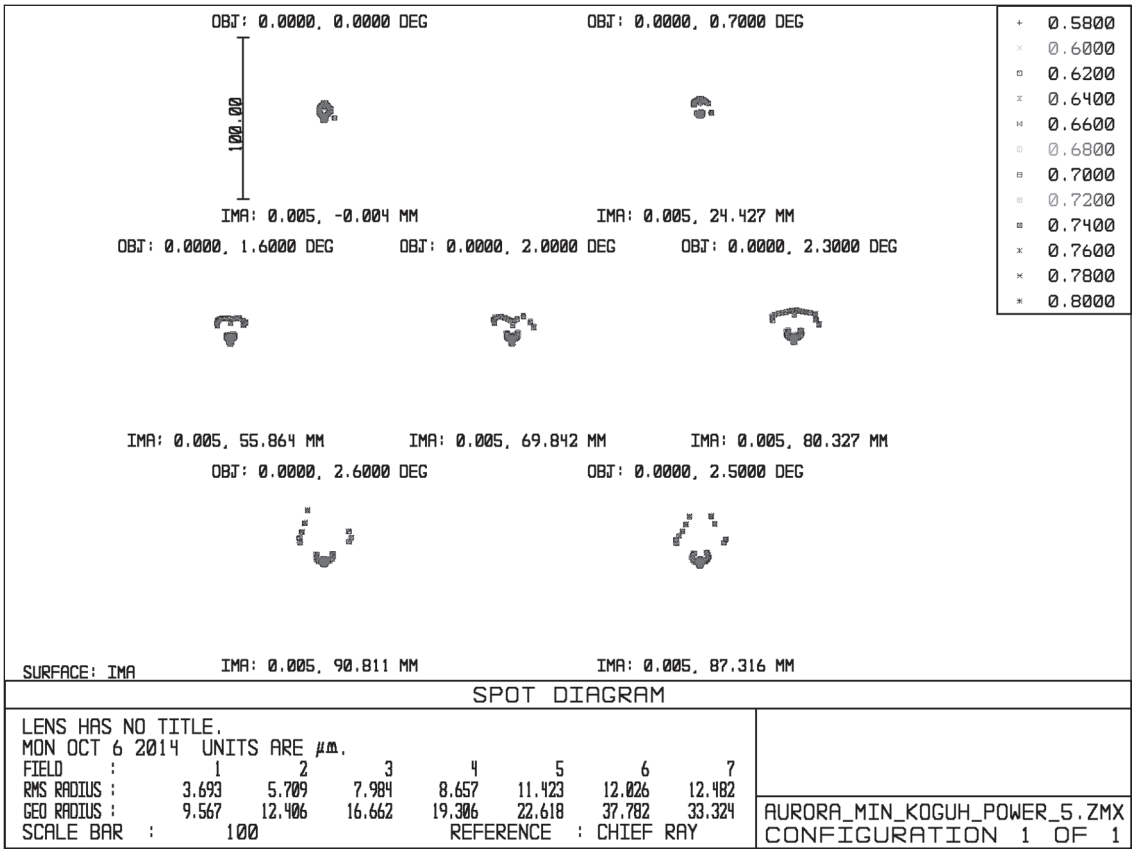
где α, β, γ — углы поворотов вокруг осей ВСК, вызванных термоупругими деформациями. В качестве примера на *рис. 5* (см. с. 50) показаны рассчитанные в пакете ANSYS углы поворотов для случая относительно небольшого градиента температур. Материал несущей конструкции — углепластик на основе эпоксидного связующего и наполнителя из углеродной ленты.

Верификация термооптикомеханических моделей оптической аппаратуры и термодеформационных моделей несущей конструкции должна проходить на стадии наземной отработки путём верификации отдельных составляющих конструкции ОЭТК, элементов конструкции и КА в целом.

В дальнейшем полученную модель на стадии лётных испытаний следует использовать для выявления влияний термодеформаций на качество изображения и изменения конструктивных углов конструкции.



а



б

Рис. 4. Пятна рассеяния недеформированной оптической системы (*а*) и при наличии значительных термодеформаций (*б*) для видимого диапазона длин волн

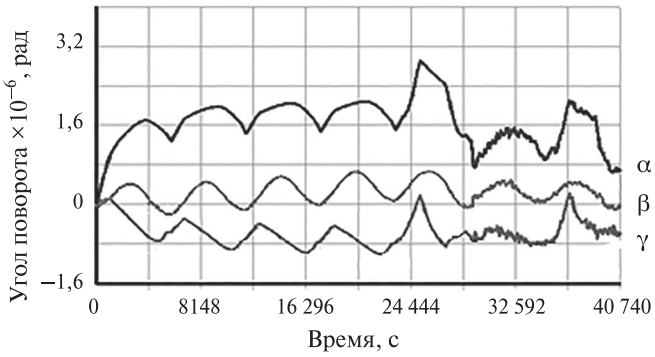


Рис. 5. Изменения углов поворота вокруг осей ВСК, вызванные термоупругими деформациями

При этом, исходя из опыта эксплуатации КА «Ресурс-П» № 1–3, необходимо учитывать и предъявлять требования к стабильности конструкции (тепловым нагрузкам), в первую очередь в режиме съёмки подстилающей поверхности КА и перехода КА из зоны «тень – свет».

Заключение

Представленный научный подход к повышению точности геодезической привязки изображений от космических систем высокодетального наблюдения Земли включает математические модели координатно-временного обеспечения съёмки с учётом деформаций конструкций КА в процессе проектирования, вывода на орбиту и его эксплуатации.

Рассмотрены базовые положения подхода, основанные на строгом математическом описании геометрического соответствия координат точек на снимке и на поверхности Земли. Представлена технология уточнения параметров внешнего ориентирования КА и внутреннего ориентирования съёмочной аппаратуры.

Определены пути повышения точности оценки координат объектов наблюдаемой сцены на основе полётной калибровки бортовой аппаратуры и учёта термодеформации конструкции КА.

Литература

1. *Ахметов Р. Н.* Управление живучестью низкоорбитальных автоматических КА ДЗЗ // Аэрокосмический курьер. 2010. № 6. С. 2–4.
2. *Ахметов Р. Н.*, *Еремеев В. В.*, *Кузнецов А. Е.*, *Мятов Г. Н.*, *Пошехонов В. И.*, *Стратилатов Н. Р.* Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 48–53.
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. *Кирилин А. Н.*, *Ахметов Р. Н.*, *Шахматов Е. В.*, *Ткаченко С. И.*, *Бакланов А. И.*, *Салмин В. В.*, *Семкин Н. Д.*, *Ткаченко И. С.*, *Горячкин О. В.* Опытно-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
5. *Клебанов Я. М.*, *Кирдина Л. Н.*, *Поляков К. А.*, *Давыдов А. Н.* Преобразование результатов конечно-элементного анализа перемещений оптических поверхностей для использования в пакетах оптического анализа // Оптич. журн. 2014. Т. 81. № 7. С. 34–38.
6. *Михельсон Н. Н.* Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физматлит, 1995. 333 с.
7. *Мятов Г. Н.* Координатно-временная модель процесса дистанционного зондирования Земли оптоэлектронным космическими аппаратами // Научно-техн. сб. НИИ ТП. 2014. № 7. С. 98–105.
8. *Пасынков В. В.* Высокоточное навигационное обеспечение низкоорбитальных КА по данным аппаратуры спутниковой навигации ГЛОНАСС // 4-я Всероссийская научно-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («IV Козловские чтения»): сб. тез. Самара: АО «РКЦ «Прогресс», 2015. С. 126–127.
9. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. Еремеева В. В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
10. *Agugiaro G.*, *Poli D.*, *Remondino F.* Testfield Trento: Geometric evaluation of very high resolution satellite imagery // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. V. 39(1). P. 191–196.

11. *Eremeev V.*, *Kuznecov A.*, *Myatov G.*, *Presnyakov O.*, *Poshekhonov V.*, *Svetelkin P.* Image structure restoration from sputnik with multi-matrix scanners // Image and Signal Processing for Remote Sensing XX: Proc. SPIE. 15 Oct. 2014. 92440F. DOI: 10.1117/12.2066631.
12. *Meguro Y.*, *Fraser C. S.* Georeferencing accuracy of Geoeye-1 stereo imagery: Experiences in a Japanese test field // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. V. 38. Pt. 8. P. 1069–1072.
13. *Miks A.*, *Novak J.* Dependence of camera lens induced radial distortion and circle of confusion on object position // Optics and Laser Technology. 2012. V. 44. No. 4. P. 727–1190.
14. *Topan H.*, *Maktav D.* Efficiency of orientation parameters on georeferencing accuracy of Spot-5 HRG level-1A stereoimages // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 6. pp. 3683–3694.

Scientific approaches for increase of georeferencing accuracy of images from high resolution optoelectronic Earth remote sensing spacecrafts

R. N. Akhmetov [1], A. V. Filatov [1], G. N. Myatov [1], A. A. Yudakov [1], A. S. Nonin [1], A. N. Kozlov [1], Ya. M. Klebanov [2], V. V. Eremeev [3], A. E. Kuznetsov [3]

[1] *Space Rocket Centre „Progress“, Samara 443009, Russia*
E-mail: miatov@mail.ru

[2] *Samara State Technical University, Samara 443100, Russia*

[3] *Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin*
Ryazan 390005, Russia

Currently operated high-resolution optoelectronic Earth remote sensing (ERS) spacecrafts provide users with information with spatial resolution less than one meter and georeferencing accuracy within several meters. In the near perspective there are plans to launch a new generation of domestic super-high-resolution ERS spacecrafts with improved performance characteristics which require development of new scientific applied approaches to design and testing of ERS spacecrafts. One of the most significant performance characteristics of an ERS system is accuracy of georeferencing of objects in images. An approach to increase this accuracy is described in the present work. The approach is based on strict mathematical description of coordinate dependency between ground points and points in the obtained picture; on systematic monitoring and calibration of on-board measurement equipment and main imaging payload; utilization of spacecraft structure thermodeformation models. The results of experimental research on identifying the main factors impacting accuracy of georeferencing are presented: accuracy of spatial and angular position of spacecraft, relative changes of interior angles of imaging and measurement equipment, geometrical instability of structure parameters of spacecraft. These results are based on statistically reliable information gathered during exploitation of the Resurs-P and Aist-2D satellites. As a result, the accuracy of georeferencing (RMSE) of data from Resurs-P No. 2 and 3 is 7–9 m.

Keywords: Earth remote sensing, optoelectronic telescopic complex, georeferencing accuracy of objects

Accepted: 27.11.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-43-52

References

1. Akhmetov R. N., Upravlenie zhivuchest’yu nizkoorbital’nykh avtomaticheskikh KA DZZ (Managing of survivability of low-orbit automatic ERS spacecrafts), *Aerokosmicheskii kur’er*, 2010, No. 6, pp. 2–4.
2. Akhmetov R. N., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti ot KA “Resurs-P” (Organization of high-precision geolocation of Earth surface images from the Spacecraft “Resurs-P”), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53.

3. Akhmetov R. N., Zinina I. I., Yudakov A. A., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., Svetelkin P. N., Tochnostnye kharakteristiki vykhodnoi produktsii vysokogo razresheniya KA "Resurs-P" (Precision characteristics of high resolution output products from Resurs-P spacecraft), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 41–47.
4. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Shakhmatov E. V., Tkachenko S. I., Baklanov A. I., Salmin V. V., Semkin N. D., Tkachenko I. S., Goryachkin O. V., *Opytno-tekhnologicheskii malyi kosmicheskii apparat "Aist-2D"* (Experimental small spacecraft "Aist-2d"), Samara: SamNSC RAN, 2017, 324 p.
5. Klebanov Ya. M., Kirdina L. N., Polyakov K. A., Davydov A. N., Preobrazovanie rezul'tatov konechno-elementnogo analiza peremeshchenii opticheskikh poverkhnostei dlya ispol'zovaniya v paketakh opticheskogo analiza (Tranformation of results of optical surfaces movement end-point analysis for use in optical analysis software), *Opticheskii zhurnal*, 2014, Vol. 81, No. 7, pp. 34–38.
6. Mikhelson N. N., *Optika astronomicheskikh teleskopov i metody ee rascheta* (Optics of astronomical telescopes and design method), Moscow: Fizmatlit, 1995, 333 p.
7. Myatov G. N., Koordinatno-vremennaya model' protsessa distantsionnogo zondirovaniya Zemli optoelektronnymi kosmicheskimi apparatami (Coordinate-time model of Earth remote sensing process by optoelectronic space systems), *Nauchno-tekhnicheskii sbornik NII TP*, 2014, No. 7, pp. 98–105.
8. Pasynkov V. V., Vysokotochnoe navigatsionnoe obespechenie nizkoorbital'nykh KA po dannym apparatury sputnikovoi navigatsii GLONASS (High precision navigational support of low-orbit space systems by data from GLONASS satellite navigational system), *4th Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki"* (4th All-Russia Scientific and Technical Conf. "Actual problems of rocket and space technics"), Book of abstr., Samara: JSC SRC Progress, 2015, pp. 126–127.
9. *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Actual technologies of Earth remote sensing data processing), Eremeev V. V. (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2015, 460 p.
10. Agugiaro G., Poli D., Remondino F., Testfield Trento: Geometric evaluation of very high resolution satellite imagery, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, Vol. 39(1), pp. 191–196.
11. Eremeev V., Kuznecov A., Myatov G., Presnyakov O., Poshekhonov V., Svetelkin P., Image structure restoration from sputnik with multi-matrix scanners, *Image and Signal Processing for Remote Sensing XX: Proc. SPIE*, 15 Oct., 2014, 92440F, DOI: 10.1117/12.2066631.
12. Meguro Y., Fraser C. S., Georeferencing accuracy of Geoeye-1 stereo imagery: Experiences in a Japanese test field, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, Vol. 38, Part 8, pp. 1069–1072.
13. Miks A., Novak J., Dependence of camera lens induced radial distortion and circle of confusion on object position, *Optics and Laser Technology*, 2012, Vol. 44, No. 4, pp. 727–1190.
14. Topan H., Maktav D., Efficiency of orientation parameters on georeferencing accuracy of Spot-5 HRG level-1A stereoimages, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 6, pp. 3683–3694.