

УДК 528.852.3

АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ «СШИВКИ» ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ ДАТЧИКОВ, ВЫПОЛНЯЕМОЙ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ КА

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

A PRIORI ESTIMATION OF ACCURACY OF TDI CCD IMAGES STITCHING BASED ON SPACECRAFT MEASUREMENT EQUIPMENT DATA

Presnyakov O.A.

This article presents the method for geometric accuracy estimation in the task of stitching of images obtained by staggered TDI CCD. The method can be applied in design of spacecraft cameras to check the ability of automatic images stitching based on spacecraft measurement equipment data. It has been tested on real images from "Aist-2D" small spacecraft.

Key words: remote sensing, stitching accuracy, staggered TDI CCD.

Ключевые слова: «сшивка» изображений, многоматричный датчик, точность, оценка.

Введение

На спутниках ДЗЗ высокого пространственного разрешения для повышения времени экспонирования и обеспечения большой полосы захвата часто применяют сборки из установленных в шахматном порядке ПЗС-матриц, работающих в режиме временной задержки и накопления [1-4]. Каждая матрица формирует отдельное изображение (скан). Соседние сканы имеют небольшое перекрытие между собой. Изображения от всех ПЗС-матриц необходимо объединить («сшить») в непрерывный снимок (рис. 1). Одноименные точки в соседних сканах сняты в разное время, поэтому на их смещение влияют конструктивные параметры КА, вращение Земли, орбитальное и угловое движение спутника, рельеф местности [2].

Наиболее эффективно задача «сшивки» решается, если удается установить геометрическое соответствие сканов с заданной точностью автоматически, по данным

Рассмотрена методика оценки геометрической точности «сшивки» изображений, полученных многоматричными сканерными датчиками ДЗЗ. Она может быть использована при проектировании съемочных устройств космических аппаратов для проверки возможности «сшивки» в автоматическом режиме изображений от ПЗС-матриц по данным измерительной аппаратуры спутника. Методика проверена на реальных снимках от МКА «Аист-2Д».

измерительной аппаратуры КА. В противном случае необходимо использовать видеоданные, чему мешают облачность, плохоидентифицируемые сюжеты и т.д. Рассмотрим методику, позволяющую при проектировании КА проверить, позволяет ли точность измерительной аппаратуры выполнить «сшивку» в автоматическом режиме без привлечения видеоданных.

Исходные данные для расчета точности «сшивки»

В методике для расчета точности «сшивки» используются следующие исходные данные:

- параметры, позволяющие оценить орбитальную скорость КА;
- параметры земного эллипсоида;



Рис. 1. Фрагменты исходных сканов и «сшитого» изображения от МКА «Аист-2Д» (виток 14655, стык изображений от 5 и 6-й ПЗС-матриц мультиспектрального оптико-электронного преобразователя)

– угол съемки (угол отклонения оптической оси от направления в надира);

– конструктивные параметры съемочного устройства (параметры внутреннего ориентирования);

– точность измерительной аппаратуры КА;

– точность используемой для «сшивки» ЦМР;

– параметры колебаний (вибраций) КА;

– методическая точность геометрической обработки.

Для оценки скорости спутника используются радиус его орбиты в апогее r_a и перигее r_p , а также геоцентрическая гравитационная постоянная $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$.

Параметры земного эллипсоида и угол съемки используются при нахождении интервала между съемкой одной и той же точки поверхности Земли четными и нечетными ПЗС-матрицами. Этот интервал определяет степень влияния на точность «сшивки» различных ошибок измерений. Без значительной потери точности при оценке ошибки «сшивки» сканов Земля может быть представлена в виде сферы среднего радиуса $R = 6371 \text{ км}$. Угол съемки обозначим через γ .

В предлагаемой методике использованы следующие конструктивные параметры съемочного устройства: фокусное расстояние f , расстояние между центрами соседних фотоприемников (размер пикселя) p , расстояние между строками четных и нечетных ПЗС-матриц, с которых происходит съем заряда, L , ширина фотозоны B_ϕ , а также среднеквадратическая ошибка определения положения ПЗС $\sigma_{ПЗС}$.

Методика разработана для спутников, оснащенных для определения углового положения звездными датчиками (блоками определения координат звезд, БОКЗ) и датчиками угловых скоростей (ДУС). Один БОКЗ характеризуется точностями $\sigma_{ХДЗ}$, $\sigma_{УДЗ}$, $\sigma_{ЗДЗ}$ измерения углов поворота вокруг осей его приборной системы координат (ПСК). Чтобы найти ошибку отдельного измерения ориентации КА по данным одномоментного измерения несколькими звездными датчиками, необходимо для всех S БОКЗ знать дополнительно параметры их размещения. Представим их в виде матриц перехода из ПСК в связанную систему координат КА (ССК) $\mathbf{R}_{ССК \leftarrow ПСКs}$, $s = 1, \dots, S$ [5]. На точность «сшивки» влияет также общее количество измерений $N_{ДЗ}$, выполненных с интервалом $\Delta T_{ДЗ}$ (будем считать, что измерения выполняются равномерно и без пропусков на интервале съемки). Точность датчиков угловых скоростей может быть представлена случайными среднеквадратическими ошибками измерений скоростей тангажа, крена и рысканья $\sigma_{V\alpha}$, $\sigma_{V\omega}$ и $\sigma_{V\kappa}$ либо шумовыми составляющими выходного сигнала $\sigma_{Vш\alpha}$, $\sigma_{Vш\omega}$ и $\sigma_{Vш\kappa}$, измеряемыми в $^\circ/\sqrt{\text{с}}$; также должен быть известен интервал дискретизации ДУС $\Delta T_{ДУС}$.

Для оценки ошибки «сшивки», вызванной рельефом местности, используется среднеквадратическая ошибка высоты ЦМР σ_H , характеризующая ошибку в районах с

наиболее сложным рельефом.

Колебания (вибрации) КА характеризуются размахом по тангажу $\varepsilon_{\text{виб.}\alpha}$, крену $\varepsilon_{\text{виб.}\omega}$ и рысканью $\varepsilon_{\text{виб.}\kappa}$. В методике также рассмотрен случай, когда появляется информация о заранее не предусмотренных колебаниях углов ориентации с периодом T_m и амплитудой по тангажу, крену и рысканью $A_{M\alpha}$, $A_{M\omega}$, $A_{M\kappa}$.

Методическую точность аппроксимации функции геометрического трансформирования при «сшивке» будем характеризовать среднеквадратической ошибкой σ_{mp} и максимальной ошибкой $\varepsilon_{\text{max mp}}$.

Точность определения орбиты для современных спутников обычно достаточно высока и не оказывает влияния на ошибку «сшивки».

Вычисление зависимости ошибки «сшивки» от величины возмущающих воздействий и точности измерительной аппаратуры

Сложный характер изменения продольного смещения сканов и их поперечного перекрытия обусловлен тем, что съемка ПЗС-матрицами одной и той же точки поверхности Земли ведется с некоторым интервалом dT . За интервал dT происходит изменение углов ориентации КА, поворот Земли, перемещение КА по орбите. Из-за перемещения по орбите возникают в том числе параллактические искажения между сканами.

Для оценки величины интервала dT сначала найдем орбитальную скорость спутника $V_{КА}$ по формуле:

$$V_{КА} = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)},$$

где $a = (r_a + r_p)/2$ – большая полуось орбиты КА, r – расстояние от центра Земли до спутника. Т.к. r изменяется от r_p до r_a , то $V_{КА}$ достигает максимума в перигее и минимума в апогее. В этих точках ошибка «сшивки» будет принимать крайние значения. Ниже будет показано, что одни факторы, вносящие вклад в эту ошибку, минимальны в апогее и максимальны в перигее, другие – наоборот. Если известен рабочий участок орбиты, следует выполнять расчеты в его пределах.

Получив $V_{КА}$, определим скорость перемещения подспутниковой точки V_p и скорость бега изображения

v . Без учета сжатия Земли $V_p = V_{КА} \frac{R}{r}$, а скорость бега

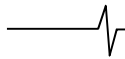
изображения в фокальной плоскости $v = V_p \frac{f}{D}$, где D –

наклонная дальность, $D = \frac{r - R}{\cos \gamma}$.

$$\text{Тогда } dT = \frac{L}{v}.$$

Разность скорости движения подспутниковой и снимаемой точек из-за отклонения сканирующего луча от надира незначительна и не учитывается в приведенных формулах.

Среднеквадратические ошибки «сшивки», вызванные случайными ошибками измерения скорости тангажа и



крена, составят соответственно

$$\sigma_{\text{сш.}V\alpha} = \frac{\sigma_{V\alpha} \cdot dT \cdot f}{p} \text{ никс.},$$

$$\sigma_{\text{сш.}V\omega} = \frac{\sigma_{V\omega} \cdot dT \cdot f}{p} \text{ никс.} \quad (1)$$

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» в кадровом направлении на краю снимка из-за случайной ошибки измерения скорости рысканья составит

$$\sigma_{\text{сш.}V\kappa} = \frac{\sigma_{V\kappa} \cdot dT \cdot B_{\phi}}{2p} \text{ никс.} \quad (2)$$

Ошибки $\sigma_{V\alpha}$, $\sigma_{V\omega}$, $\sigma_{V\kappa}$ могут быть рассчитаны на основе $\sigma_{V_{ш\alpha}}$, $\sigma_{V_{ш\omega}}$, $\sigma_{V_{ш\kappa}}$ по формулам:

$$\sigma_{V\alpha} = \sigma_{V_{ш\alpha}} / \sqrt{\Delta T_{\text{ДУС}}}, \quad \sigma_{V\omega} = \sigma_{V_{ш\omega}} / \sqrt{\Delta T_{\text{ДУС}}},$$

$$\sigma_{V\kappa} = \sigma_{V_{ш\kappa}} / \sqrt{\Delta T_{\text{ДУС}}}.$$

Измерения датчиками угловых скоростей характеризуются, как правило, высокой систематической ошибкой (дрейфом). Чтобы исключить его влияние, используются совместно измерения звездных датчиков и датчиков угловых скоростей.

Для расчета дрейфа измерений ДУС сначала определим ошибку одиночного измерения тангажа, крена и рысканья спутника $\sigma_{\text{ор.}\alpha}$, $\sigma_{\text{ор.}\omega}$ и $\sigma_{\text{ор.}\kappa}$ при одновременном измерении всеми БОКЗ по формуле [5]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\text{ор.}\omega}^2 & \dots & \dots \\ \dots & \sigma_{\text{ор.}\alpha}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \sigma_{\text{ор.}\kappa}^2 \end{bmatrix} = \quad (3)$$

$$= \left(\sum_s \mathbf{R}_{\text{ССК} \leftarrow \text{ПСК}_s} \mathbf{W}_{\text{ПСК}_s}^{-1} \mathbf{R}_{\text{ССК} \leftarrow \text{ПСК}_s}^T \right)^{-1},$$

где $\mathbf{W}_{\text{ПСК}_s} = \begin{pmatrix} \sigma_{X_{\text{ДЗ}}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y_{\text{ДЗ}}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z_{\text{ДЗ}}}^2 \end{pmatrix}$ – ковариационная

матрица измерений звездного датчика.

Точность определения дрейфа угловых скоростей зависит от способа обработки измерений БОКЗ и ДУС в строгой модели съемки. В модели, используемой в российском программном обеспечении обработки данных от спутников высокого разрешения, дрейф определяется с использованием метода наименьших квадратов по уравнениям разности измерений БОКЗ и интеграла угловых измерений ДУС [6]. Для этой модели, допуская, что измерения следуют без пропусков, среднеквадратическую ошибку определения дрейфа можно оценить по формуле [7]:

$$\sigma_{V_{\text{ср.}\alpha}}^2 = \left[\left(\mathbf{H}^T \mathbf{V}_{\alpha}^{-1} \mathbf{H} \right)^{-1} \right]_{2,2} \quad (4)$$

где элементы матрицы \mathbf{V}_{α} и матрица \mathbf{H} формируются следующим образом:

$$V_{\alpha i,j} = \begin{cases} \sigma_{\text{ор.}\alpha}^2 + i \cdot \Delta T_{\text{ДЗ}} \cdot \Delta T_{\text{ДУС}} \cdot \sigma_{V\alpha}^2, & \text{при } i = j, \\ \min(i, j) \cdot \sigma_{V\alpha}^2 \cdot \Delta T_{\text{ДЗ}} \cdot \Delta T_{\text{ДУС}}, & \text{при } i \neq j, \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, N_{\text{ДЗ}}, \quad j = 1, \dots, N_{\text{ДЗ}},$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 0 & \dots & (i-1)\Delta T_{\text{ДЗ}} & \dots & (N_{\text{ДЗ}}-1)\Delta T_{\text{ДЗ}} \end{pmatrix}^T. \quad (5)$$

Аналогично вычисляются СКО скорости изменения крена $\sigma_{V_{\text{ср.}\omega}}$ и рысканья $\sigma_{V_{\text{ср.}\kappa}}$.

Влияние ошибки измерения тангажа и крена звездными датчиками на ошибки «сшивки» в кадровом и строчном направлении $\sigma_{\text{сш.}\alpha}$, $\sigma_{\text{сш.}\omega}$ можно оценить по формулам:

$$\sigma_{\text{сш.}\alpha} = \frac{\sigma_{V_{\text{ср.}\alpha}} \cdot dT \cdot f}{p} \text{ никс.},$$

$$\sigma_{\text{сш.}\omega} = \frac{\sigma_{V_{\text{ср.}\omega}} \cdot dT \cdot f}{p} \text{ никс.} \quad (6)$$

Влияние ошибки измерения рысканья на ошибку «сшивки» в кадровом направлении на краю снимка можно определить по формуле:

$$\sigma_{\text{сш.}\kappa} = \frac{\sigma_{V_{\text{ср.}\kappa}} \cdot dT \cdot B_{\phi}}{2p} \text{ никс.} \quad (7)$$

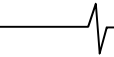
Для проверки адекватности приведенных формул выполнены эксперименты на реальных маршрутах съемки от МКА «Аист-2Д» [4]. Из 5 маршрутов были выделены фрагменты, сопровождающиеся одинаковым количеством измерений БОКЗ (60 измерений). Для экспериментов использовались изображения первой фотозоны мультиспектрального оптико-электронного преобразователя. Измерения БОКЗ для отобранных маршрутов прореживались в 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 10 раз, чтобы оставалось соответственно 30, 20, 15, 12, 10, 8, 7 и 6 измерений; лишние измерения отбрасывались. Для каждого коэффициента прореживания K формировалось K независимых выборок. В выборку с номером k , $k = 1, \dots, K$, входили измерения с номерами $k, K+k, 2K+k, \dots$. Из измерений ДУС также формировались независимые выборки на интервале фрагмента путем прореживания. Для каждой выборки оценивалась средняя ошибка «сшивки» в кадровом направлении по общим точкам на соседних сканах, идентифицированным при помощи корреляционно-экстремального анализа [8]. По полученным K оценкам рассчитывалось их среднеквадратическое отклонение. График (рис. 2) показывает, что форма прогнозной кривой совпадает с данными измерений, при этом измеренное среднеквадратическое отклонение среднего значения ошибки «сшивки» меньше определенного по приведенным выше формулам в среднем в 1,3-1,4 раза. Последнее может говорить о том, что точность измерительной аппаратуры несколько превышает заявленную либо что ошибки соседних измерений БОКЗ и ДУС коррелированы.

Среднеквадратическую ошибку «сшивки» в кадровом направлении из-за ошибки высоты ЦМР можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{сш.}H} = N \frac{\sigma_H}{D} \text{ никс.}, \quad (8)$$

где N – расстояние между ПЗС-матрицами в строках, $N = L/p$.

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» из-за не точного определения положения ПЗС-матриц составит



$$\sigma_{\text{сш.ПЗС}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{ПЗС}} \text{ пикс.} \quad (9)$$

Множитель $\sqrt{2}$ обусловлен тем, что перекрытие или продольное смещение («скоба») определяется как разность координат одноименных точек на соседних сканах.

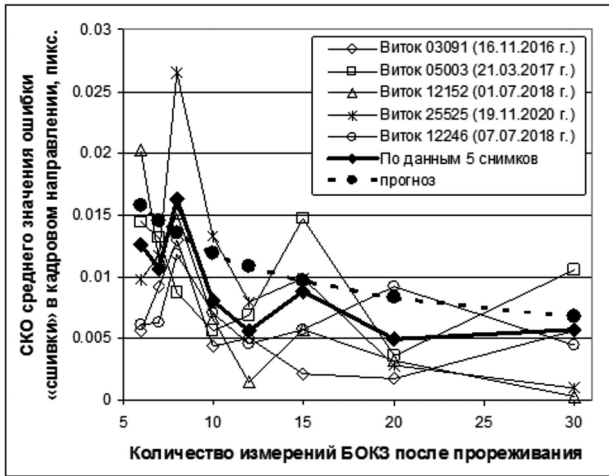


Рис. 2. График зависимости средней ошибки «сшивки» от количества измерений БОКЗ

Методическая ошибка при трансформировании приводит к среднеквадратической ошибке «сшивки»

$$\sigma_{\text{сш.мп}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{мп}} \text{ пикс.}, \quad (10)$$

и максимальной ошибке «сшивки»

$$\varepsilon_{\text{max сш.мп}} = 2\varepsilon_{\text{max mp}} \text{ пикс.} \quad (11)$$

Для спутников, получающих снимки высокого пространственного разрешения, незначительные отклонения угла ориентации могут приводить к снижению качества изображений. Оценим влияние на точность «сшивки» колебаний углового положения КА.

Можно показать, что если размах колебаний по тангажу, крену и рысканью равен $\varepsilon_{\text{виб.}\alpha}$, $\varepsilon_{\text{виб.}\omega}$, $\varepsilon_{\text{виб.}\kappa}$, то средний квадрат разности углов в момент съемки четными и нечетными ПЗС-матрицами составит соответственно $\sigma_{\text{виб.}\alpha} = \varepsilon_{\text{виб.}\alpha}/2$, $\sigma_{\text{виб.}\omega} = \varepsilon_{\text{виб.}\omega}/2$, $\sigma_{\text{виб.}\kappa} = \varepsilon_{\text{виб.}\kappa}/2$. Среднеквадратическая ошибка «сшивки», вызванная колебаниями по тангажу, составит при этом

$$\sigma_{\text{сш.виб.}\alpha} = \sigma_{\text{виб.}\alpha} \frac{f}{p} \text{ пикс.}, \quad (12)$$

максимальная ошибка –

$$\varepsilon_{\text{max сш.виб.}\alpha} = \varepsilon_{\text{виб.}\alpha} \frac{f}{p} \text{ пикс.} \quad (13)$$

По аналогичным формулам находятся $\sigma_{\text{сш.виб.}\omega}$ и $\varepsilon_{\text{max сш.виб.}\omega}$.

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» на краю снимка из-за вибрационных колебаний по рысканью составит

$$\sigma_{\text{сш.виб.}\kappa} = \sigma_{\text{виб.}\kappa} \frac{B_{\phi}}{2p} \text{ пикс.}, \quad (14)$$

максимальная ошибка –

$$\varepsilon_{\text{max сш.виб.}\kappa} = \varepsilon_{\text{виб.}\kappa} \frac{B_{\phi}}{2p} \text{ пикс.} \quad (15)$$

На практике возникают ситуации, когда становится известно о заранее не предусмотренных колебаниях с периодом T_m и амплитудой $A_{m\alpha}$, $A_{m\omega}$, $A_{m\kappa}$. Оценим вызванную ими дополнительную ошибку «сшивки», с учетом которой должны быть скорректированы $\sigma_{\text{виб.}\alpha}$,

$$\sigma_{\text{виб.}\omega}, \sigma_{\text{виб.}\kappa}, \varepsilon_{\text{max сш.виб.}\alpha}, \varepsilon_{\text{max сш.виб.}\omega}, \varepsilon_{\text{max сш.виб.}\kappa}.$$

Примем в качестве модели этих колебаний углы, изменяющиеся по закону синуса с периодом T_m . Если объекты в области перекрытия сканов фиксируются нечетными ПЗС-матрицами в некоторые случайные относительно фазы колебаний моменты времени t , а четными, соответственно, в моменты времени $t + dT$, то дополнительная разность угла тангажа в момент съемки четными и нечетными ПЗС-матрицами будет равна

$$\begin{aligned} d_{m\alpha}(t) &= A_{m\alpha} \sin\left[\frac{2\pi}{T_m}(t + dT)\right] - A_{m\alpha} \sin\left(\frac{2\pi}{T_m}t\right) = \\ &= 2A_{m\alpha} \sin\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T_m}t + \frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right). \end{aligned}$$

Множитель $2A_{m\alpha} \sin\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right)$ определяет амплиту-

ду этой величины. Среднеквадратическую и максимальную ошибки «сшивки» из-за непредусмотренных колебаний тангажа определим по формулам:

$$\sigma_{\text{сш.ма}} = \sqrt{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} d_{m\alpha}^2(t) dt} \cdot \frac{f}{p} = \quad (16)$$

$$= A_{m\alpha} \sqrt{2 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right)} \cdot \frac{f}{p} \text{ пикс.},$$

$$\varepsilon_{\text{max сш.ма}} = \left| 2A_{m\alpha} \sin\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right) \right| \cdot \frac{f}{p} \text{ пикс.} \quad (17)$$

По аналогичным формулам находятся $\sigma_{\text{сш.м}\omega}$,

$$\varepsilon_{\text{max сш.м}\omega}.$$

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» на краю снимка из-за непредусмотренных колебаний по рысканью составит

$$\sigma_{\text{сш.м}\kappa} = A_{m\kappa} \sqrt{2 \sin^2\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right)} \frac{B_{\phi}}{2p} \text{ пикс.}, \quad (18)$$

максимальная ошибка –

$$\varepsilon_{\text{max сш.м}\kappa} = \left| 2A_{m\kappa} \sin\left(\frac{\pi \cdot dT}{T_m}\right) \right| \cdot \frac{B_{\phi}}{2p} \text{ пикс.} \quad (19)$$

На рис. 3 представлен график отклонения смещения сканов в кадровом направлении («скобы») от номинального значения, полученный при помощи корреляционной идентификации для фрагмента реального снимка от МКА «Аист-2Д». Также приведен участок спектров таких отклонений для нескольких изображений, снятых с временным интервалом до двух лет (рис. 4). Данные получены для стыка 5 и 6 ПЗС-матриц мультиспектрального оптико-электронного преобразователя. На графиках хорошо различимы гармонические искажения с частотой около 1,4 Гц. Эта частота находится вблизи частоты измерений ДУС 2 Гц, поэтому искажения из-за таких колебаний не могут

быть в полной мере устранены по данным измерений. Приведенные в литературе [9] результаты исследований не позволяют судить о природе колебаний, т.к. охватывают диапазон 5-130 Гц. Амплитуда колебаний в данном случае находится в пределах, позволяющих получать визуально незаметную линию стыка сканов (рис. 1).

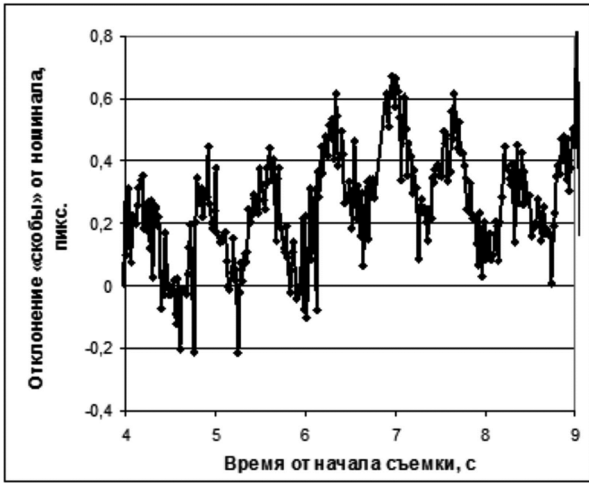


Рис. 3. Отклонения смещения сканов в кадровом направлении от номинала (виток 14655, 11.12.2018 г.)

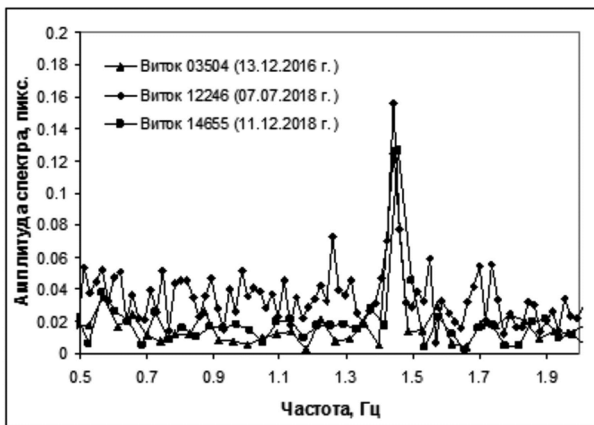


Рис. 4. Пространственные спектры смещения сканов в кадровом направлении

Объединяя вклад в ошибку «сшивки» рассмотренных искажений, получим следующие формулы для оценки ошибки «сшивки».

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» в кадровом направлении (ошибка «скобы») в центре снимка $\sigma_{ск.ц}$ находится из уравнения:

$$\sigma_{ск.ц}^2 = \sigma_{си.V\alpha}^2 + \sigma_{си.\alpha}^2 + \sigma_{си.H}^2 + \sigma_{си.ПЗС}^2 + \sigma_{си.виб.\alpha}^2 + \sigma_{си.мп}^2 \quad (20)$$

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» в кадровом направлении (ошибка «скобы») на краю снимка $\sigma_{ск.к}$ находится из уравнения:

$$\sigma_{ск.к}^2 = \sigma_{си.V\alpha}^2 + \sigma_{си.\alpha}^2 + \sigma_{си.V\kappa}^2 + \sigma_{си.\kappa}^2 + \sigma_{си.H}^2 + \sigma_{си.ПЗС}^2 + \sigma_{си.виб.\alpha}^2 + \sigma_{си.виб.\kappa}^2 + \sigma_{си.мп}^2 \quad (21)$$

Среднеквадратическая ошибка «сшивки» в строчном направлении (ошибка поперечного перекрытия) $\sigma_{пер}$ находится из уравнения:

$$\sigma_{пер}^2 = \sigma_{си.V\omega}^2 + \sigma_{си.\omega}^2 + \sigma_{си.ПЗС}^2 + \sigma_{си.виб.\omega}^2 + \sigma_{си.мп}^2 \quad (22)$$

Максимальная ошибка (по критерию «3σ», за исключением учета искажающих факторов гармонического характера, которые оцениваются по размаху) «сшивки» в кадровом направлении (ошибка «скобы») в центре снимка $\varepsilon_{\max ск.ц}$ находится из уравнения:

$$\varepsilon_{\max ск.ц}^2 = 9\sigma_{си.V\alpha}^2 + 9\sigma_{си.\alpha}^2 + 9\sigma_{си.H}^2 + 9\sigma_{си.ПЗС}^2 + \varepsilon_{\max си.виб.\alpha}^2 + \varepsilon_{\max си.мп}^2 \quad (23)$$

Максимальная ошибка «сшивки» в кадровом направлении (ошибка «скобы») на краю снимка $\varepsilon_{\max ск.к}$ находится из уравнения:

$$\varepsilon_{\max ск.к}^2 = 9\sigma_{си.V\alpha}^2 + 9\sigma_{си.\alpha}^2 + 9\sigma_{си.V\kappa}^2 + 9\sigma_{си.\kappa}^2 + 9\sigma_{си.H}^2 + 9\sigma_{си.ПЗС}^2 + \varepsilon_{\max си.виб.\alpha}^2 + \varepsilon_{\max си.виб.\kappa}^2 + \varepsilon_{\max си.мп}^2 \quad (24)$$

Максимальная ошибка «сшивки» в строчном направлении (ошибка поперечного перекрытия) $\varepsilon_{\max пер}$ находится из уравнения:

$$\varepsilon_{\max пер}^2 = 9\sigma_{си.V\omega}^2 + 9\sigma_{си.\omega}^2 + 9\sigma_{си.ПЗС}^2 + \varepsilon_{\max си.виб.\omega}^2 + \varepsilon_{\max си.мп}^2 \quad (25)$$

Определение точности «сшивки» на примере МКА «Аист-2Д»

Для проверки рассмотренной методики с ее использованием выполнена оценка априорной точности «сшивки» спектрозональных изображений от съемочной аппаратуры «Аврора» МКА «Аист-2Д» [4] для случая надирной съемки.

В расчетах использовались следующие данные: $r_a = 6864,8 \text{ км}$; $r_p = 6848,2 \text{ км}$; $\gamma = 0^\circ$; $f = 2000 \text{ мм}$; $p = 18 \text{ мкм}$; $L = 7,4 \text{ мм}$; $B_\phi = 162,2 \text{ мм}$; $\sigma_{ПЗС} = 0,05 \text{ пикс.}$; $\sigma_{ХДЗ} = 0,8''$; $\sigma_{УДЗ} = 0,8''$; $\sigma_{ЗДЗ} = 7''$; $\Delta T_{ДЗ} = 0,5 \text{ с}$; $N_{ДЗ} = 10$ (минимальное); на основании $\mathbf{R}_{ССК \leftarrow ПСКs}$, $s = 1, \dots, S$ рассчитаны $\sigma_{ор.\alpha} = 0,7909^\circ$; $\sigma_{ор.\omega} = 0,5657^\circ$; $\sigma_{ор.\kappa} = 0,7988^\circ$; $\sigma_{Ви\alpha} = \sigma_{Ви\omega} = \sigma_{Ви\kappa} = 3 \cdot 10^{-3} \circ / \sqrt{4}$; $\Delta T_{ДУС} = 0,5 \text{ с}$; $\sigma_H = 25,1 \text{ м}$ (оценка точности SRTM 3" для местности с уклоном более 20° [10]); $\varepsilon_{виб.\alpha} = 2,3 \cdot 10^{-5} \circ$; $\varepsilon_{виб.\omega} = 2,3 \cdot 10^{-5} \circ$; $\varepsilon_{виб.\kappa} = 2,3 \cdot 10^{-5} \circ$; присутствуют колебания по тангажу с периодом $T_m = 0,714 \text{ с}$ и амплитудой $A_{M\alpha} = 4,3 \cdot 10^{-5} \circ$ (оценки параметров колебаний получены по результатам анализа видеоданных); $\sigma_{mp} = 0,035 \text{ пикс.}$, $\varepsilon_{\max mp} = 0,05 \text{ пикс.}$

Результаты расчета приведены в табл. 1. Полученные оценки подтверждаются измерениями.

Таблица 1 – Априорная оценка точности «сшивки» изображений от КА «Аист-2Д»

Ошибка	Оценка для МКА «Аист-2Д», пикс.	
	в апогее	в перигее
$\sigma_{сш.V\alpha}, \sigma_{сш.V\omega}$	0,0355	0,0342
$\sigma_{сш.V\kappa}$	0,0014	0,0014
$\sigma_{сш.\alpha}$	0,0273	0,0262
$\sigma_{сш.\omega}$	0,0214	0,0205
$\sigma_{сш.\kappa}$	0,0011	0,0011
$\sigma_{сш.H}$	0,0209	0,0217
$\sigma_{сш.ПЗС}$	0,0707	
$\sigma_{сш.виб.\alpha}$	0,1071	0,1049
$\sigma_{сш.виб.\omega}$	0,0223	0,0223
$\sigma_{сш.виб.\kappa}$	0,0009	0,0009
$\varepsilon_{\max сш.виб.\alpha}$	0,1515	0,1483
$\varepsilon_{\max сш.виб.\omega}$	0,0446	0,0446
$\varepsilon_{\max сш.виб.\kappa}$	0,0018	0,0018
$\sigma_{сш.тp}$	0,05	
$\varepsilon_{\max сш.тp}$	0,1	
$\sigma_{ск.ц}$	0,1481	0,1460
$\sigma_{ск.к}$	0,1481	0,1461
$\sigma_{пер}$	0,0986	0,0979
$\varepsilon_{\max ск.ц}$	0,3193	0,3161
$\varepsilon_{\max ск.к}$	0,3194	0,3162
$\varepsilon_{\max пер}$	0,2692	0,2670

Заключение

Рассмотрение методики позволяет сделать вывод, что при конструировании спутников ДЗЗ, оснащенных многоматричными датчиками, необходимо внимательно относиться к выбору измерительной аппаратуры и ее согласованности с конструктивными параметрами съемочного устройства, контролировать предельные значения колебаний (вибраций).

Действие большинства рассмотренных искажающих факторов растёт при увеличении расстояния между соседними ПЗС-матрицами, которое в рамках конструкции с их шахматным расположением желательно минимизировать.

Значительный вклад в ошибку «сшивки» могут вносить колебания съемочного устройства, как это оказалось в случае с МКА «Аист-2Д». В рассмотренном примере частота колебаний с наибольшей амплитудой находится вблизи частоты измерений ДУС. Увеличение последней позволит снизить ошибку «сшивки».

Современные звездные датчики обеспечивают точ-

ность «сшивки» при штатной работе и правильном выборе количества и расположения.

Параметры внутреннего ориентирования, такие как положение ПЗС-матриц в фокальной плоскости, имеют консервативный характер, и после того, как точно измерены в процессе фотограмметрической калибровки, не вносят существенного вклада в ошибку «сшивки».

При использовании ЦМР SRTM 3" ошибка «сшивки» изображений высокого разрешения от МКА «Аист-2Д» из-за ошибки определения высоты составляет порядка 0,02 пикселя. Однако для других КА эта составляющая ошибки «сшивки» может пропорционально расти при увеличении расстояния между соседними ПЗС-матрицами или съемке с более низкой орбиты.

Литература

1. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие / А.И. Бакланов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
2. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Мятлов Г.Н. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков дистанционного зондирования Земли. Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 29-36.
3. Tang, X.; Hu, F.; Wang, M.; Pan, J.; Jin, S.; Lu, G. Inner FoV Stitching of Spaceborne TDI CCD Images Based on Sensor Geometry and Projection Plane in Object Space. Remote Sens. 2014, 6, pp. 6386-6406.
4. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В. и др. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
5. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Структурно-параметрический синтез компонентов малого космического аппарата картографического назначения. Вестник РГРТУ. 2019. № 69.
6. 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.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 1/Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. М, 1986. 366 с.
8. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. под ред. В.В. Еремеева М., Физматлит, 2015.
9. Иголкин А.А., Сафин А.И., Филипов А.Г. Модальный анализ динамического макета малого космического аппарата «Аист-2Д». Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 100-108.
10. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. Remote Sens. Environ., 2011, vol. 115, no. 6, pp. 1576-1587. DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.017.