

УДК 528.855

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОПТИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАЗЕМНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Мятов Г.Н., д.т.н., зам. главного конструктора АО «РКЦ «Прогресс», e-mail: miatov@mail.ru

Юдаков А.А., к.т.н., начальник отдела АО «РКЦ «Прогресс»

*Кузнецов П.К., д.т.н., зав. отделом, Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
e-mail: kurnesov@mail.ru*

Мартемьянов Б.В., к.т.н., доц., СамГТУ, e-mail: bvmart@rambler.ru

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru

Кузнецов А.Е., д.т.н., зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ

MONITORING OF TECHNICAL CONDITIONS OF ON-BOARD OPTICAL EARTH OBSERVATION SATELLITE SYSTEMS IN SUPPORT OF AUTOMATIC GROUND-BASED IMAGE PROCESSING

Myatov G.N., Udakov A.A., Kuznechov P.K., Martemiyarov B.V., Eremeev V.V., Kuznechov A.E.

Within the framework of activities aimed at increasing the competitiveness of domestic species products of remote sensing of the Earth, an integrated approach to the diagnosis of on-board systems of optical-electronic satellite (OES) is proposed for consideration in order to determine the suitability of information obtained by the OES spacecraft for the automatic creation of high-quality geof ormation products.

Key words: monitoring, remote sensing of the Earth, diagnosis of on-board systems, high-quality geof ormation products.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронный телескопический комплекс, наземная обработка информации, линейное разрешение, точность геодезической привязки.

Введение

Сегодня трудно найти отрасль народного хозяйства, в которой не использовалась бы видеоинформация, получаемая спутниками ДЗЗ. Область применения этой информации расширяется по мере улучшения характеристик доставляемых на Землю снимков по разрешению, точности определения географических координат наблюдаемых объектов, а также с появлением бортовых мультиспектральных и гиперспектральных фотопреобразователей. Новейшие оптико-электронные КА получают видеоданные с разрешением на местности, достигающих долей метра, с точностью определения координат объектов порядка единиц метров. Поставщики видеоинформации, в первую очередь разработчик космической системы (КС) ДЗЗ, и ее потребители заинтересованы в получении исходной информации ДЗЗ с гарантированными показателями качества. Для этого в рамках наземной инфраструктуры КС создается система предварительной обработки видеоинформации, позволяющая проводить оценку ее качества, а также диагностировать состояние бортовых систем КА [1-3], входящих в контур получения и первичного преобразования видеоданных. Такой подход позволяет на ранней стадии процесса обработки и передачи видеоданных сохранять только ту часть, которая пригодна для создания в автоматическом режиме качественных геоинформационных

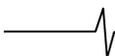
В рамках деятельности, направленной на повышение конкурентоспособности отечественной видовой продукции дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), предлагается к рассмотрению комплексный подход к диагностике бортовых систем оптико-электронных космических аппаратов (КА) в целях определения пригодности информации, поступающей с КА ДЗЗ, для создания в автоматическом режиме качественных геоинформационных продуктов.

продуктов, например, высокоточных геопространственных данных.

В ряде работ, посвященных исследованию высокодетальных оптоэлектронных автоматических КА ДЗЗ показана связь качества получаемой сигнальной и координатной информации об объектах наблюдаемой сцены с эффективностью работы бортовых систем КА, обеспечивающих функционирование целевой аппаратуры [4, 5].

Для контроля качества функционирования КА на орбите необходимо в составе наземного комплекса обработки информации реализовать комплексную диагностику состояния бортовых навигационных систем и оптико-электронного телескопического комплекса (ОЭТК). Такая диагностика должна быть ориентирована на использование комплексной информации, поступающей с бортовых приборов КА: сигнальной, координатной, телеметрической, а также видеоданных.

Методология диагностирования качества функционирования КА базируется на двух методах. Первый метод направлен на уточнение и диагностирование состояния элементов внутреннего и внешнего ориентирования КА. Метод позволяет системно увязать процесс геометрической полетной калибровки КА по выявлению пространственного и углового положения визирной оси съемочной



аппаратуры относительно приборной системы координат звездных датчиков по тестовым наземным полигонам и процесс наземной обработки бортовой измерительной информации (БИИ) и видеоинформации (ВИ).

Схема уточнения и диагностирования состояния элементов внутреннего и внешнего ориентирования КА приведена на рис. 1, на котором введены следующие дополнительные обозначения: НА-ВРЛ – наземная аппаратура высокоскоростной радиолинии; БССИ – бортовая система сбора измерительной информации; НССИ – наземная система сбора измерительной информации; РП КА – рабочая программа для космического аппарата; СА – съемочная аппаратура; РП ВА – рабочая программа для специальной аппаратуры; ПСП – план сеансов приема.

В обеспечение наземной обработки БИИ в целях достижения требуемого качества геопространственной продукции на борту КА с помощью БССИ проводится получение исходных измерений, характеризующих угловое и линейное положение КА, а также угловую скорость КА. Собранная БИИ передается в сеансе связи с использованием НА-ВРЛ, после чего она выделяется из основного потока информации и поступает в комплекс обработки БИИ, где проводится уточнение и синтез элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Результаты обработки представляют собой файл с метаданными, использование которых обеспечивает требуемые фотограмметрические характеристики получаемых высоко детальных снимков.

Геометрическая полетная калибровка по одноименным точкам, проводимая для определения параметров внутреннего и внешнего ориентирования КА, реализуется на основе метода самокалибровки [6-8]. Периодическое проведение процедуры калибровки позволяет определять углы ориентации приборных систем координат звездных датчиков относительно визирной системы координат съёмочной аппаратуры с ошибкой менее одной угловой секунды, а погрешность определения положения ПЗС-матриц в фокальной плоскости, с учётом

дисторсии и фокусного расстояния, с ошибкой, не превышающей одного пикселя.

Калибровка каждой точки изображения включает измерения пиксельных координат изображения «эталонных» (калибруемых) объектов местности, геодезические координаты которых известны на двух и более изображениях [9-12]. Проводимые операции калибровки позволяют определить значения элементов внешнего и внутреннего ориентирования КА с точностями, которые обеспечивают требуемое качество геоинформационных продуктов и на которые следует ориентироваться в процессе диагностирования состояния бортовых систем КА. Файл метаданных, содержащий сопроводительную информацию к обрабатываемому снимку с указанной точностью, обеспечивает возможность автоматической обработки снимков.

Таким образом, использование «эталонных» значений параметров ориентации КА на момент съёмки поверхности Земли позволяет реализовать фильтрацию входных данных, поступающих с борта КА в сеансе приема информации, и проводить высокоточную обработку изображений в автоматическом режиме. На основе изложенного подхода разработан и реализован в космической системе «Ресурс-П» программный продукт по автоматической обработке изображений в наземном комплексе приема, обработки и распространения информации (НКПОР-РП).

Опыт эксплуатации КА «Ресурс-П» № 1, 2, 3 показал, что разработанная компоновочная схема и элементы конструкции КА обладают высокой динамической стабильностью на момент съёмки поверхности Земли. Динамическая стабильность конструкции оценивается на уровне «шумовой» работы звездных датчиков и составляет менее 3 угловых секунд. В связи с этим возникает возможность повысить точность геодезической привязки снимков путем установки более точных навигационных приборов и доработки наземного программного обеспечения. Такая доработка, помимо учета особенностей сбора и синтеза информации, поступающей с навига-

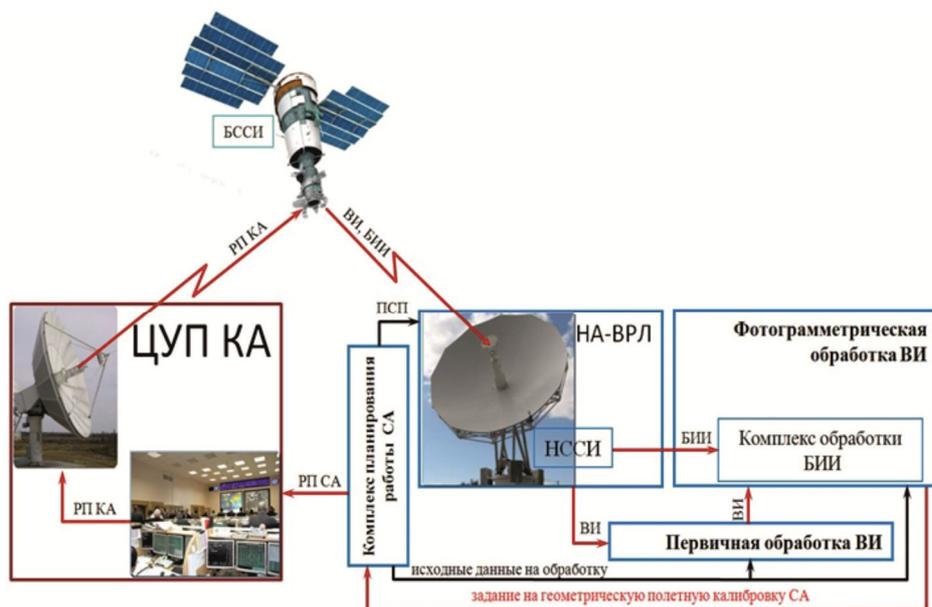


Рис. 1. Схема уточнения и диагностирования элементов внутреннего и внешнего ориентирования

ционных приборов, касается, в том числе, и совершенствования методики обработки калибровочных данных. В частности, геометрическая полетная калибровка целевой аппаратуры КА с датчиками сканового принципа действия, размещаемыми в фокальной плоскости в «шахматном» порядке, имеет ряд особенностей, которые заметно проявляются при возрастании требований к точности привязки. В процессе регистрации последовательности изображений с подвижного основания, которым является КА, возникают непрерывные изменение ракурса съемки, что приводит к появлению заметных (на субпиксельном уровне) проективных различий в обрабатываемых строках двух, полученных последовательно во времени кадров изображений одной и той же местности. Кроме того, в процессе формирования наборов видеоданных из-за дискретного передвижения зарядовых пакетов по столбцам ПЗС матриц, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), а также вибраций бортовой аппаратуры вызванных дисбалансами вращающихся роторов силовых гироскопов либо маховиков, возникает «смаз» видеоданных. Проективные геометрические искажения и «смаз» видеоданных затрудняют автоматическое совмещение фрагментов изображений. Чем более высокие требования предъявляются к точности координатной привязки снимков, тем более существенным становится влияние рассогласования проективных параметров совмещаемых фрагментов снимка, а также эффекта смаза изображения.

Помимо указанных причин, на рассогласование координат сопряженных точек на наблюдаемых и эталонных изображениях влияют как случайные, так и систематические ошибки измерений углового и линейного положения КА в процессе съемки, разделить которые можно только обрабатывая достаточно большую серию снимков.

В связи с этим, создание эталонов геопривязанных изображений осуществляется идентификацией одноименных точек не на единичных снимках, а на серии снимков наземных полигонов, объекты на которых имеют известные координаты геопривязки. Идентификация одноименных точек изображений, точнее говоря малых фрагментов, накрывающих эти точки, производится поиском и высокоточным совмещением их с имеющимися изображениями «опорных» точек, географические координаты которых известны. При обработке серии изображений опорных полигонов должно быть идентифицировано достаточно большое количество опорных точек местности с известными геодезическими координатами и высотой. Точность совмещения изображений при использовании взаимно корреляционной функции в значительной степени зависит от ее крутизны в окрестности экстремума. Поэтому при использовании корреляционного метода при нечетко выраженном экстремуме [9], например, для фрагментов изображений типа облаков, полей, вызывает определенные затруднения. В результате поле совмещенных фрагментов для подобных сюжетов получается сильно разреженным, что не всегда удовлетворяет требованиям практических задач. Ниже рассматривается более точный метод совмещения изображений, названный методом функционализации,

который в определенной степени, свободен от этого недостатка [13-16].

Высокоточное совмещение изображений – метод функционализации

Будем считать, что ракурсные искажения достаточно малы, чтобы можно было совмещать изображения простым плоским смещением одного изображения относительно другого. При таком условии рассмотрим методику решения практически важной задачи идентификации параметров вибраций фокальной плоскости ОЭТК и значений параметров вектора смаза получаемых изображений на примере данных от КА типа «Ресурс-П». Информация о значениях указанных параметров позволит точнее производить апостериорное вычисление кинематических параметров КА и, соответственно, улучшить точность геопривязки космических изображений.

Процедура совмещения изображений использует специфику конструкции оптико-электронного преобразователя (ОЭП) видеоаппаратуры КА. ОЭП составлен из размещенных на фокальной плоскости в шахматном порядке нескольких десятков линейных фоточувствительных матриц (ПЗС линеек), поля зрения которых на краях матриц пересекаются на 2-3 десятка пикселей. Изображения в области пересечения полей зрения пзс-матриц создают последовательность двух кадров с периодом, равным времени перемещения («пролета») точек изображений между ПЗС-матрицами. Время пролета оценивается с использованием процедуры совмещения таких пар кадров. Причем, время пролета в процессе съемки маршрута может непрерывно и достаточно быстро меняться, что повышает требования к быстродействию и точности алгоритмов совмещения. Указанных двукадровых последовательностей изображений получается достаточно много, всего на единицу меньше количества пзс-матриц, составляющих ОЭП. Это дает возможность соответствующей обработкой повысить достоверность оценок параметров относительного сдвига изображений и вычислять для фиксированного момента времени эпюр распределения этих параметров вдоль ОЭП. По этой информации, с использованием экспертных оценок, возможно выявить источники возмущений и принять конструктивные или алгоритмические меры по их нейтрализации.

Предлагаемая методика совмещения изображений апробирована при решении задачи определения параметров «смаза» изображения [13, 14], причиной появления которого являлась несинхронность движения изображения по фокальной плоскости ОЭТК и движения зарядовых пакетов по столбцам ПЗС матриц, составляющих ОЭП. Методика базируется на так называемом методе функционализации параметров изображений [15, 16]. Метод функционализации, в отличие от широко используемых в аналогичных задачах экстремально-корреляционных и градиентных методов, позволяет достаточно просто реализовать быстрые итерационные процедуры высокоточного совмещения изображений. В основе метода лежит соотношение, устанавливающее связь идентифицируемых параметров покадрового сдвига изображений с их измеримыми характеристика-

ми. Под измеримой характеристикой фрагмента изображения понимается усредненное некоторым образом значение освещенности этого фрагмента.

Суть метода функционализации следующая. Анализируются два полученных последовательно во времени изображения подвижной сцены. Обозначим их как E_0, E_1 : $E_0 = E(x, t_0), E_1 = E(x, t_1)$,

где $x = (x, y)$ – декартовы координаты системы координат Oxy , привязанной к фокальной плоскости изображительной системы ОЭТК; $t_0 < t_1$.

Необходимо найти преобразование: $E_0 \rightarrow E_1$. При этом наложим ограничение на допустимое преобразование: будем считать, что изображение E_1 образуется плоско-параллельным синхронным смещением всех точек изображения E_0 с параметрами вектора смещения, одинаковыми для всех его точек. В таком случае можно записать:

$$E_1(x, t) = E_0(x - s(t)),$$

$$\frac{ds}{dt} = v(t), \quad s(t_0) = 0, \quad 0 = (0 \ 0), \quad (1)$$

где $v = (v, u)$ – вектор скорости движения изображения (так называемый оптический поток); $t \in R^1$; v, u – соответственно проекции вектора скорости v на оси Ox и Oy ;

$s = (s_x, s_y)$ – соответственно проекции на оси Ox и Oy вектора сдвига s изображения, происшедшего на интервале времени $[t_0, t_1]$. Соотношение (1) называется уравнением движения изображения [15].

В большинстве работ, например [9], посвященных анализу движения изображения, для вычисления оценок оптического потока используются операция дифференцирования. Но реальные изображения в подавляющем большинстве случаев представляются функциями распределения яркостей, имеющими разрывы первого рода. Такие разрывы имеют место, например, на переходах свет/тьма, крыша здания/земля, автомобиль/дорожное покрытие и т.п. Поэтому перед дифференцированием изображение подвергается операции сглаживания, например, гаусс-фильтром. Этот прием делает дифференцирование корректным, но «уничтожает» мелкие, часто очень важные, детали в изображениях и, соответственно, приводит к локальным ошибкам в получаемых оценках оптического потока. С целью преодоления этого недостатка в [14, 15, 16] предложено совмещать не сами изображения, а индуцируемые ими поля значения функционала специального вида $F(E(t))$, обладающего свойством дифференцируемости. Функционал $F(E(t))$ строится как комбинация регулярных обобщенных функций, определенных на совмещаемых изображениях как

$$F(E(t)) = \int_D K(x) E(x, t) dx dy, \quad (2)$$

где функция веса $K(x)$ функционала стеснена следующими условиями: а) $K(x): R^2 \Rightarrow R^1$; б) $\forall x \in \Gamma(D) K(x) = 0$; D – область определения функционала (далее, окно анализа), Γ – граница без особенностей окна D ; в) непрерывна, ограничена и дифференцируема почти всюду по всем своим аргументам; г) $\iint_D K(x, y) dx dy = 0$.

Свойство г) обеспечивает нулевое среднее поля значений функционала. В рассматриваемой задаче равенство нулю среднего значения отсчетов изображений значительно упрощает процедуру совмещения.

Функционал (2) называется основным функционалом излагаемого здесь метода функционализации. Основной

функционал корректно дифференцируем по всем своим аргументам, поскольку дифференцирование выражения (2) по пространственным координатам сводится [17] к дифференцированию функции веса $K(x)$, которая по определению дифференцируема по всем своим аргументам.

Очевидно, что функционал (2) обладает фильтрующими свойствами и его применение сглаживает изображение, но, как известно [17], сжатием области определения D функционала всегда можно достичь желаемого компромисса между точностью дифференцирования и степенью сглаживания.

Рассмотрим сначала случай непрерывного движения изображения. Для получения соотношения, связывающего вектор скорости движения динамического изображения с его измеримыми характеристиками, вычислим полную производную функционала (2) по времени, учитывая, что его значения изменяются только в силу уравнения движения изображения (1) (условие постоянства яркости динамического изображения):

$$\dot{F}(E(t)) = F_x(E(t)) v + F_y(E(t)) u, \quad (3)$$

$$\text{где } \dot{F} = \frac{dF}{dt}, \quad F_x = \iint_D K_x(x, y) dx dy, \quad F_y = \iint_D K_y(x, y) dx dy.$$

Соотношение (3) и есть искомое уравнение связи параметров движения изображений с их измеримыми характеристиками. Функционалы F_x и F_y называются индуцированными функционалами.

Дискретный вариант соотношения (3), использующий пок кадровое представление последовательности изображений, может быть записан как

$$F(E((N+1)T)) - F(NT) =$$

$$= \widetilde{F}_x(E(NT)) \widetilde{s}_x + \widetilde{F}_y(E(NT)) \widetilde{s}_y, \quad (4)$$

где T – кадровый период; N – номер кадра; $\widetilde{s}_x, \widetilde{s}_y$ – оценки смещений изображения по координатам; $\widetilde{F}_x, \widetilde{F}_y$ – усредненные по кадрам N и $(N+1)$ значения соответствующих индуцированных функционалов. Далее будем называть кадр с номером N первым, а с номером $(N+1)$ – вторым.

Система уравнений, разрешимая относительно компонент оптического потока, строится параметризацией соотношения (4). Одним из вариантов параметризации является изменение значения координат положения на изображениях областей определения функционала F . При таком подходе целесообразно, для построения требуемой по условиям разрешимости системы уравнений, назначить на анализируемых изображениях идентичные по форме и размерам подобласти анализа: A_1 на первом, A_2 – на втором кадре; и каждую из этих областей покрыть идентичной системой окон анализа: Dk_i ; $k = 1, 2$ – номер подобласти, на которой организовано покрытие; $i = 1, 2, \dots, m$ – номер окна анализа. Для каждой пары окон анализа $D1_i$ и $D2_i$ с идентичным номером i строится уравнение вида (4). В результате, в общем случае получается переопределенная система уравнений, решение которой дает искомые оценки $\widetilde{s}_x, \widetilde{s}_y$ относительного смещения подобластей A_1 и A_2 в кадрах. Методика решения указанной системы уравнений и итерационная процедура высокоточного совмещения изображений приведена в [15]. В результате такого пофрагментного совмещения изображений формируется векторное поле скорости движения фрагментов изображе-

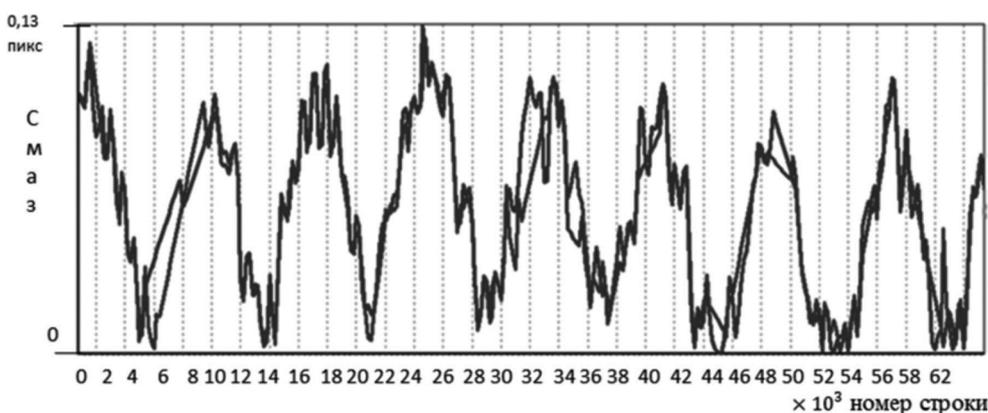


Рис. 2. Пример колебаний изображения, проецируемого на фокальную плоскость КА «Ресурс-П»

ния – оптический поток. Оптический поток характеризуется как параметрами векторов скорости движения фрагментов изображения, так и плотностью, то есть количеством вычисленных векторов на единицу площади изображения. Метод функционализации позволяет варьированием размерами области определения D функционала вычислять оптический поток с предельно возможной плотностью.

При контроле качества получаемых изображений интерес представляет не сама скорость движения изображения, имевшая место при съемке, а смаз видеоданных, получившийся за счет отклонения этой скорости от программно задаваемого значения. Поэтому ординаты всех графиков, приведенных ниже, градуированы в пикселях значения смаза.

На рис. 2 представлены графики колебаний изображения подстилающей поверхности на маршруте съемки КА типа «Аист-2». Полученные графики смаза на маршруте съемки показывают, что изображение в фокальной плоскости движется с колебаниями, вызванными внешними возмущающими воздействиями, к которым относятся воздействия со стороны системы управления движением КА, колебания солнечных батарей, высокочастотные вибрации устройств с вращающимися роторами. Амплитуда колебаний калибрована в пикселях смаза получаемого изображения, возникающего из-за колебаний изображения относительно заданного закона сканирования. По оси абсцисс – время, калиброванное в строках изображения, получаемого при сканирующей съемке. Частота получения данных измерений – 1843 Гц.

На рис. 2: ордината – это пиксели смаза изображения; абсцисса – это время, калиброванное в строках изображения, получаемого при сканирующей съемке. Различные графики соответствуют колебаниям изображения на краях различных фоточувствительных матриц, составляющих ОЭП.

Частотный спектр колебаний изображения на фокальной плоскости (рис. 2) представлен на рис. 3.

Проведенные экспертные оценки показывают: низкочастотные колебания 0,11 Гц вызваны процессом входа КА на маршрут съемки; частота 0,56 Гц обусловлена отработкой программы наведения системой управления КА; частота 11,5 Гц соответствует собственной частоте колебаний солнечных батарей. Частота 159,8 Гц вероятнее всего вызвана дисбалансом вращающихся роторов маховиков системы управления движением. Как

видно из приведенных графиков, вибрации изображения в фокальной плоскости приводят к появлению весьма незначительного смаза изображения.

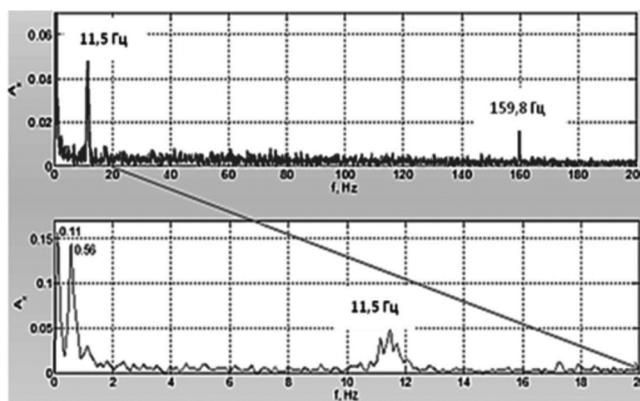


Рис. 3. Амплитудная частотная характеристика колебания изображения

В [18] предложена методика восстановления угловых скоростей движения оптической оси КА на основе информации о поле скоростей движения изображения (оптическом потоке) и положения центра масс КА на маршруте съемки. Полученное уточнённое значение угловой скорости движения оптической оси ОЭТК на маршруте съемки перспективно применять в задаче уточнения геодезической привязки космических изображений.

Заключение

Представлена комплексная технология диагностики состояния бортовой измерительной и целевой съемочной аппаратуры систем ДЗЗ.

Рассмотрено два аспекта при реализации такой технологии. Первый аспект связан с диагностированием и уточнением элементов внутреннего и внешнего ориентирования бортовой аппаратуры и КА в целом на основе анализа данных по наземным опорным полигонам. Второй аспект основан на прецизионном анализе параметров движения изображения в фокальной плоскости телескопа с использованием метода функционализации. Этот метод позволил определить частотный спектра колебаний фокальной плоскости целевой аппаратуры КА, вызванных внешними и внутренними возмущениями.

Представлены статистически достоверные данные по точности технологии комплексной диагностики с использованием натурной информации, полученной в



ходе эксплуатации космических систем ДЗЗ «Ресурс-П» и «Аист-2».

Литература

1. Кровотынцев В.А., Успенский С.А., Семериков А.Н., Леонов М.С. Наземный комплекс приема, обработки и распространения информации «Конопус-В» [Электронный ресурс] – jurnal.vniiem.ru/text/148/24-35.pdf, 2015.

2. Ромашкин В.В. Комплексы приема, обработки, распределения и доведения до потребителей информации дистанционного зондирования Земли. Разработки ОАО «НИИ ТП» для космического комплекса «Ресурс-П» [Электронный ресурс] <http://www.niitp.ru/component/content/article/56-dzz>, 2017.

3. Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М., Шишкин О.Г. Высокопроизводительная нейросетевая система мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным [Электронный ресурс] http://psta.psiras.ru/read/psta2017_3_109-131.pdf, 2017.

4. Ахметов Р.Н. Управление живучестью низкоорбитальных автоматических КА ДЗЗ. // *Аэрокосмический курьер*. 2010. №6. С.2-4.

5. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях. // *Механика и машиностроение. Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2009. № 3. С.165-176.

6. Grodecki J. and Dail G. IKONOS Geometric Accuracy [Электронный ресурс] <https://legacy.satimagingcorp.com/media/pdf/IKONOSGeometricAccuracyValidation-ISPRS2002.pdf>, 2002.

7. Kwoh L.K., Tan W.J. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, Development of Camera Model and Geometric Calibration/Validation of XSAT IRIS Imagery. 2012. Vol. XXXIX-B1. pp. 239-243.

8. Malthus T., Fuqin Li. Calibration of Optical Satellite and Airborne Sensors [Электронный ресурс]. – <http://www.science.org.au/reports/index>, 2014.

9. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. Еремеева В.В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.

10. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мяттов Г.Н., Пошехонов В.И., Стратилатов Н.Р. Высокоточ-

ная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 1. С. 44-53.

11. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Мяттов Г.Н. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков ДЗЗ // *Цифровая обработка сигналов*. № 3. 2015. С. 15-22.

12. 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*. № 3 Т.17. 2020. С. 142-148.

13. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Мяттов Г.Н., Юдаков А.А. Методика вычисления оценок параметров смаза изображений, получаемых целевой аппаратурой КА типа «Ресурс» // Тез. докл. междунар. научн.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань: РГРТУ. 2017. С. 289-290.

14. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Ращупкин А.В. Техническое зрение подвижных объектов. Методика совмещения изображений, полученных при наблюдении с подвижных объектов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2014. № 3. С. 3-10.

15. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Семавин В.И. Техническое зрение подвижных объектов. Метод анализа поля скоростей динамического изображения // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2014. № 1-М. С. 3-9.

16. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В. Математическая модель формирования видеоданных, получаемых с использованием сканирующей съемки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. №6. С. 292-299.

17. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – изд. 4-е. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. – 512 с.

18. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В. Методика уточнения угловой ориентации автономной мобильной платформы на основе комплексирования измерительной и наблюдательной информации, не содержащей реперов // 5 российская мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2012. С. 810-813.