

ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ПЛАНЕТЫ БОРТОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. Я. Геча, М. Ю. Жиленев,
С. Ю. Горчаков, С. А. Новоселов

Одним из верных методов недопущения значительного «смаза» и других искажений изображения поверхности планеты при ее орбитальной съемке бортовой оптико-электронной аппаратурой космического аппарата является формирование в его полетном задании расчетных движений проекций осей бортовой оптико-электронной аппаратуры на планету на заданном интервале времени, отвечающих множеству критериев. При этом параметры кинематического закона съемки, которые вычислены для полетного задания космического аппарата, должны задавать скорость движения изображения сообразно с режимом работы фотоприемников данной аппаратуры во время регистрации изображения поверхности планеты. Предложены прямые зависимости, которые в аналитическом виде при верных ограничениях на допустимую ширину полосы захвата бортовой оптико-электронной аппаратурой дают способ рассчитать и задать в полетном задании космического аппарата кинематический закон движений осей космического аппарата для съемки нужного маршрута на поверхности планет с подходящей скоростью движения изображения. Они же позволяют контролировать его выполнение по данным бортовых измерений и задавать компенсацию скорости движения изображения, не подходящей для фотоприемника бортовой оптико-электронной аппаратуры, в целях получения метрически достоверного изображения с заданным радиометрическим и геометрическим качествами. Выведенные формулы можно применять при проектировании космических аппаратов с бортовой оптико-электронной аппаратурой для съемки планет, при анализе процесса формирования получившегося растрового изображения снятой поверхности по результатам съемки с космическим аппаратом, а также в ряде аналогичных задач.

Ключевые слова: орбитальная съемка, дистанционное зондирование планет, бортовая оптико-электронная аппаратура, фотоприемник, полетное задание, время накопления, смещение изображения, компенсация, скорость движения изображения, высокое разрешение, формула.

Основное влияние неподходящей скорости движения изображения при оптико-электронной съемке планеты и актуальность точных зависимостей для ее расчета

Бортовая оптико-электронная аппаратура (БОЭА) космического аппарата (КА), предназначенная для съемки планет (съемочная) с высоким разрешением и с относительно невысокой скоростью движения изображения (СДИ) по ее фотоприемнику (ФП), в ряде случаев не может воспроизводить относительно высокое соотношение сигнал/шум (С/Ш), например, из-за большой дальности до снимаемой поверхности, недостаточной облученности ФП или их низкой квантовой эффективности и т. п., что может приводить к малоконтрастному изображению с невысоким радиометрическим разрешением [1 – 3]. При этом малые СДИ по ФП БОЭА могут быть еще и малопринемлемыми, снижая производительность орбитальной съемки, увеличивая фотонный и другие шумы за время накопления сигнала. Кроме того, при относительно малой глубине потенциальной ямы (ПЯ) ФП, например, в ФП, изготовленных на основе фотоэлектрических приборов с зарядовой связью (ФПЗС) без учета специфики орбитальной съемки, малые СДИ могут породить местно «пересвеченное» изображение, блиндинг, снизить отношение С/Ш, контраст и де-

тальность относительно возможно достижимых при данной съемке, с данным объективом БОЭА в данных физических условиях.

Реализация излишне высокой СДИ тоже породит «смаз», а С/Ш на выходе БОЭА может оказаться недостаточным относительно достижимого, что породит структурные искажения изображения и потери в разрешении.

В обоих случаях порождается «смаз», описываемый функцией передачи модуляции (ФПМ) [4, 9] и несанкционированные геометрические искажения. Таким образом, деградация оптического изображения может происходить во время его формирования при съемке планеты при неверном выборе СДИ по фотозонам ФП БОЭА [1, 4 – 9, 12 – 14], а после съемки такие изображения, как правило, могут восстанавливаться в растровые с порождением артефактов, нелинейностей, снижением С/Ш и других характеристик относительно тех, что были возможны на выходе БОЭА при данной съемке [12 – 19].

В связи с этим задание на управление КА и обработка им оптимальных векторов СДИ средствами БОЭА совместно с движениями ее осей относительно снимаемой сцены играют одну из важнейших ролей в орбитальном дистанционном зондировании планет. То же самое можно сказать о влиянии СДИ на геометрическую точность растрового, оптико-электронного (ОЭ) изображения ландшафтов планеты и на погрешности его координатно-

временной привязки (КВП) в заданных стабильных приборных, барицентрических, планетарных и других системах координат (СК) [5 – 8, 16].

По указанным причинам, чтобы достичь потребного времени накопления сигнала для достижения приемлемого С/Ш при ограничениях на вектор СДИ, применяют различные методы компенсации этого вектора до значений, которые подходят для съемки конкретной территории планеты средствами БОЭА КА. К ним обычно относятся виды компенсации с применением ФПЗС БОЭА с зонами компенсации или с «косым» переносом заряда, или с оптико-механическими компенсаторами СДИ, а также – способы съемки с КА с применением специальных разворотов его осей во время нее в целях компенсации неподходящих векторов СДИ от орбитальной скорости КА и скоростей снимаемых точек планеты, порождаемых вращением данной планеты вокруг ее собственной оси вращения [2, 8, 9, 19]. Поэтому при всех перечисленных и других методах ОЭ съемки через полетное задание (ПЗ) для обработки фактически формируются программные векторы СДИ по ФП БОЭА, которые определяются ее номинальными фотограмметрическими параметрами и заложенными в ПЗ КА движениями его осей на данном интервале времени заданного маршрута съемки (МС) на поверхности планеты.

Программный вектор СДИ по фотозоне ФП задается в ПЗ КА прямо или косвенно (например, через время начала съемки, частоту и направление считывания информации с ФП). Если он неверно задан для совместной обработки бортовыми средствами КА и его БОЭА, или если он реализован с отличиями от верно заданного, то возможны не санкционированные смещения и масштабирование изображения за времена накопления на ФП, формирования условного кадра (УК) или более протяженного растра. Все это порождает рост функции рассеяния точки (ФРТ), падение яркости, снижение ФПМ направленного «смаза» [4, 9, 13, 14, 17] со снижением частотно-контрастной характеристики, геометрической и радиометрической точностей [5, 7, 12 – 14] изображения, а также с порождением артефактов на нем [7, 17]. Поэтому для формирования изображения планеты с высоким качеством параметры управления КА, вычисляемые при планировании съемки заданной территории планеты, должны учитывать точный расчет векторов СДИ по фотозонам ФП БОЭА на всем ее интервале, а сами СДИ должны быть оптимально согласованы со скоростями считывания информации ФП, оцифровки и преобразований видеоданных [4, 9, 14 – 17]. Причем обработка ПЗ во времени

средствами КА и его БОЭА должна точно реализовать заданные СДИ и строго в заданные моменты времени точной шкалы времени (ШВ).

Отличия фактической СДИ от заданной для данного изображения поверхности планеты могут возникать и при восстановлении изображения из видеоданных (ВД) в виде кодов яркости (КЯ) совместно с элементами внешнего ориентирования (ЭВО) осей ФП, измеренными при формировании бортовой целевой информации (БЦИ) и зарегистрированными для КВП БОЭА [13, 14, 16, 17]. В частности, они могут порождаться действием погрешностей конструкции КА, его бортовых средств и БОЭА, включая неверную логику (циклограмму) их взаимодействия, синхронизации, погрешности алгоритмов обработки заданных в ПЗ режимов съемки в соответствующей ШВ и пространстве, реализованном СК с их погрешностями. Кроме того, смещения изображения могут порождаться и вычислительными средствами формирования и обработки служебной, то есть сопроводительной, информации, иногда включаемой в телеметрическую информацию, в части статических и кинематических ЭВО ФП БОЭА, а также корректирующими преобразованиями первичных КЯ изображения планеты, которые были зарегистрированы БОЭА, в отсутствие достаточно точно верифицированной КВП БЦИ на интервале времени съемки заданного МС на поверхности планеты [14]. В настоящей статье получение и обработка БЦИ КА и ее преобразования до снимка для конечного пользователя не рассматриваются.

Ниже предложены зависимости, которые позволяют практически однозначно, по аналитическим формулам, рассчитать и задать в ПЗ КА необходимые соотношения для орбитальной съемки планеты посредством его БОЭА в целях получения необходимой СДИ в центре поля ФП БОЭА и ее контроля. При этом предполагается, что БОЭА КА для заданной съемки планеты должна априори обеспечивать достаточное отношение С/Ш с учетом ФПМ всего канала сквозного информационного тракта (СИТ) получения и визуализации или индексной и других классификаций растрового изображения с характеристиками не хуже требуемых от средств данных каналов СИТ КА и космической системы в целом [1, 3, 6, 7, 14 – 18].

Расчет номинального времени накопления сигнала и компенсации скорости движения изображения для оптико-электронной съемки планеты при достаточном соотношении сигнал/шум

В ПЗ КА обычно задаются различные времена для проведения съемки маршрута на подстилаю-

шей поверхности, включая время экспозиции (накопления) ФП БОЭА, интервал времени МС и другие. На данных временах и на расчетных СДИ должны базироваться расчетные частоты считывания информации с ФП, бортовых измерений ЭВО и всех последующих преобразований первичных данных, зарегистрированных съемочной БОЭА.

В ПЗ КА могут также задаваться непосредственно программные расчетные СДИ по фотозонам БОЭА при конкретной съемке планеты и соответствующие им частоты отработки ПЗ средствами КА и его БОЭА.

Рассмотрим случай задания в ПЗ КА времени накопления сигнала.

Для того, чтобы весь поток спектрально ограниченного излучения, падающий на фоточувствительный элемент (ФЧЭ) ФП, проецировался на него в течение времени накопления сигнала (экспозиции) $\tau_{\text{нак}}$ ФП БОЭА необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$k_{\text{эфф}}\tau_{\text{нак}} \leq k_{\text{погр}}\tau_{\text{кин}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{эфф}}$ – коэффициент, который характеризует эффективность работы фотозоны ФП, то есть параметры геометрического заполнения ее площади фоточувствительным слоем с учетом технологических зазоров, коэффициента заполнения ПЯ, эффективности переноса, точности знания и стабильности спектральных, других фотометрических характеристик ФП и БОЭА в целом на время эксплуатации и данной съемки; $k_{\text{погр}}$ – некоторый суммарный коэффициент знания погрешностей, например, расчета и отработки программной СДИ, который зависит от степени отработанности и верифицированности кинематической, алгоритмической и фотogramметрической частей процесса орбитальной съемки планеты на заданных участках орбиты данным КА с данной БОЭА; $\tau_{\text{кин}}$ – время прохождения проекции точки снимаемой поверхности по фотозоне ФП, то есть, условно говоря, «кинематическое» время накопления фотозонной ФЧЭ БОЭА.

В $\tau_{\text{нак}}$ ФП или оптико-электронного преобразователя БОЭА, в который входит ФП, должна учитываться его инерционность, то есть коэффициент его постоянной времени $\tau_{\text{инер}}$, и другие его временные характеристики и аналогичные параметры БОЭА и движений осей КА [1 – 4].

$k_{\text{эфф}}$ и $k_{\text{погр}}$ могут представлять собой одно числовое значение, но при орбитальной съемке планет, скорее всего, это – некоторые дрейфующие во времени функционалы от множества отдельных параметров конкретной съемки планеты, функционирования КА и

его БОЭА, включая точность учета результатов необходимых их наземных и летных калибровок.

При планировании съемки того или иного участка поверхности планеты и задании в ПЗ КА параметров для нее возникает проблема верной оценки времени $\tau_{\text{кин}}$ и соответствующего задания $\tau_{\text{нак}}$ исполнительным средствам БОЭА КА, с учетом остальных составляющих неравенства (1). При решении данной проблемы для подстановки данных в (1) авторами была выведена следующая формула [1, 4 – 12]:

$$\tau_{\text{кин}} = \frac{H_S(dn)}{(W_S - \omega_{\text{прог}}H_S)f_{\text{БОЭА}}}, \quad (2)$$

где H_S – высота КА над поверхностью планеты при съемке; W_S – текущая относительная линейная скорость КА; $\omega_{\text{прог}}$ – угловая скорость программного углового движения (ПУД) осей КА в пространстве (в той или иной СК), которая должна быть рассчитана и с необходимой точностью задана для ее отработки исполнительными средствами его бортового комплекса управления (БКУ); $f_{\text{БОЭА}}$ – фокусное расстояние БОЭА; d – размер пикселя (фоточувствительного элемента) БОЭА; n – число пикселей дискретного ФП в направлении его столбца (строки) БОЭА, которое соответствует расчетному движению изображения и зарядового облачка по ФПЗС или другого носителя изображения по ФП.

Формула (2), очевидно, не полностью решает задачу орбитальной съемки по времени и компенсации отклонений СДИ от заданной программной за интервал времени $\tau_{\text{нак}}$, так как не учитывает наклонную дальность от ФП БОЭА, на которой должны производиться накопление сигнала при компенсации вектора неподходящей СДИ за допустимое время при ограничениях на реальный размер ФП и интервал времени компенсации, до снимаемой точки при отклонении визирной оси БОЭА от направления на подспутниковую точку планеты.

Для преобразования формулы (2), чтобы она была применима для наклонной орбитальной съемки планеты, запишем известное выражение для наклонной дальности до снимаемой точки поверхности планеты [1]:

$$D_n = (R_p + H_S) \cos(\gamma) - \sqrt{(R_p + H_S)^2 \cos^2(\gamma) - 2R_p H_S - H_S^2}, \quad (3)$$

где R_p – референтный (местный) радиус несферической планеты в подспутниковой точке; γ – угол между визирной осью БОЭА КА и плоскостью орбиты.

Далее рассмотрим процесс компенсации неподходящей СДИ. В линейной постановке такой задачи дистанция компенсации $l_{\text{комп}}$ равна:

$$l_{\text{комп}} = V_{\text{комп}} \tau_{\text{комп}}, \quad (4)$$

где $l_{\text{комп}}$ – длина хода линейной компенсации, как при оптико-механической или электронной, так и при компенсации СДИ с помощью разворотов осей КА его системой управления ориентации и стабилизации (СУОС) БКУ; $V_{\text{комп}}$ – линейная скорость компенсации; $\tau_{\text{комп}}$ – интервал времени компенсации.

Исходя из структуры выражения (2), практически все виды расчета времени накопления сигнала и компенсации СДИ на относительно небольшом интервале времени и на небольшом расстоянии можно свести к формуле:

$$\tau_{\text{кин}} = \frac{D_n (dn + l_{\text{комп}})}{(W_S - \omega_{\text{прог}} D_n) f_{\text{БОЭА}}}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что за счет управления ФП и разворотом КА можно компенсировать перемещение текущего изображения, которое не соответствует смещению на $l_{\text{комп}}$ и которое, например, не успевает зарегистрироваться дискретным ФП. В частности, в режиме $(dn + l_{\text{комп}})$ – при компенсации удлиняется фотозона, на которой происходит накопление сигнала, а значит компенсация работает вдоль СДИ в положительном направлении. При $(dn - l_{\text{комп}})$ – наоборот.

Таким же образом $\tau_{\text{кин}}$ можно регулировать, как требуется условиями съемки, путем подбора $\omega_{\text{прог}}$ КА. Если рассматривать формулы (4) и (5) в приложении к ФПЗС, то формулой (4) можно упрощенно описать работу ФПЗС в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Тогда $l_{\text{комп}}$ реализуется перемещением снимаемого на первом пикселе ФПЗС заряда на соседние с попутным накоплением в заданном направлении. Очевидно, что суммарная величина заряда, накопленного ФПЗС, будет больше, чем при отсутствии подобной компенсации. При этом КВП изображения в визирной системе координат (ВСК) БОЭА, к которой должны быть привязаны ее ФПЗС на конструкции БОЭА, должна учитывать особенности данного вида компенсации с использованием ВЗН, как и других ее видов.

Особенности данных процессов показаны на рис. 1. На нем показана схема номинального расположения пикселей ФПЗС и векторов скоростей $V_{\text{СДИ}}$ и $V_{\text{комп}}$. Также обозначено смещение изображения $l_{\text{комп}}$ по положительному направлению век-

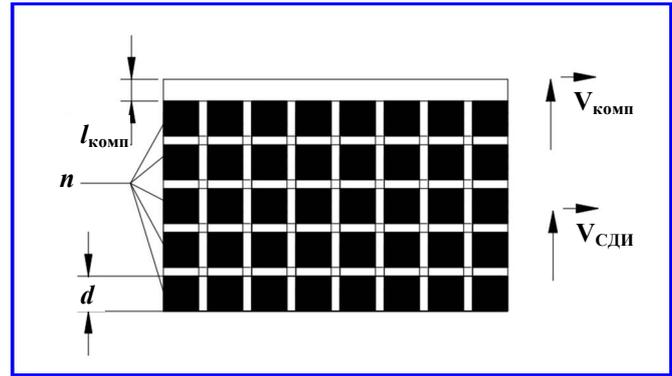


Рис. 1. Схема расположения пикселей на ФПЗС на матрице ПЗС

торов СДИ. Такая схема может служить для выбора знака $V_{\text{комп}}$, то есть своего рода фазы компенсации, что может быть важным при управлении ПУД осей КА во время съемки поверхности планеты при потребных угловых ускорениях при их отработке.

При подстановке (4) в (5) получается:

$$\tau_{\text{кин}} = \frac{D_n [dn + (V_{\text{комп}} \tau_{\text{комп}})]}{(W_S - \omega_{\text{прог}} D_n) f_{\text{БОЭА}}}. \quad (6)$$

В результате, выражение (6) связывает все компоненты, необходимые для расчета основных кинематических параметров орбитальной съемки планеты средствами БОЭА КА. Следовательно, при учете (1), контроле допустимости С/Ш БОЭА, смещений на ее ФП, ФПМ направленного «смаза» изображения и ФПМ СИТ КС в целом на уровне не ниже необходимых [1, 3, 9 – 16] уравнение (6) может использоваться и для расчета компенсации СДИ для обеспечения при данных $\tau_{\text{кин}}$, $\tau_{\text{комп}}$, $\tau_{\text{нак}}$, достаточного С/Ш видеоданных (КЯ), которые будут регистрироваться средствами БОЭА в качестве БЦИ для первичного восстановления растрового изображения планеты до момента его дальнейших преобразований и коррекций.

Исходя из наличия в (6) W_S и D_n , при расчете параметров оптико-электронной орбитальной съемки планеты при выборе и задании в ПЗ КА $\tau_{\text{кин}}$, $\tau_{\text{нак}}$, $\tau_{\text{комп}}$ также должны учитываться вычисляемые по ним с помощью $V_{\text{СДИ}}$ и ее части $V_{\text{комп}}$ смещения и соответствующие геометрические искажения первичного изображения поверхности планеты, которое формируется средствами БОЭА КА до его стандартных и других коррекций, которые производятся в целях предоставления конечному пользователю растровых снимков планеты с определенными радиометрическими и геометрическими качествами [3, 7, 12 – 19].

Формулой (6) можно воспользоваться, в частности, для априорного или апостериорного анализа результатов одновременной съемки с КА, оснащенного одной БОЭА с несколькими разными фокусными расстояниями ее каналов, или КА, оснащенного двумя и более съемочными БОЭА с разными фокусными расстояниями.

Для примера на рис. 2 дан график, показывающий зависимость «кинематического» времени накопления $\tau_{кин}$ на ФП БОЭА КА от $\omega_{прог}$ во время съемки планеты при наличии двух различных фокусных расстояний в данной БОЭА, например, в панхроматическом (PAN) и мультиспектральном (MS) каналах.

График получен для следующих параметров орбитальной съемки Земли:

- съемка производится при высоте КА $H_S \approx 510,00$ км;
- местный радиус Земли $R_E = 6371,0$ км;
- линейная скорость КА относительно снимаемой точки на поверхности планеты $W_S \approx 7,61$ км/с;
- программная угловая скорость разворота осей КА $\omega_{прог} \leq 0,8$ град./с;
- фокусное расстояние PAN-канала БОЭА $f_{PAN} = 2000,0$ мм;
- фокусное расстояние MS-канала БОЭА $f_{MS} = 400,0$ мм;
- заданная скорость компенсации в PAN и MS каналах $V_{комп} = 5,0$ мм/с;
- размер пикселя ФП канала PAN $d_{PAN} = 8,0$ мкм;
- размер пикселя ФП канала MS $d_{MS} = 32,0$ мкм;
- количество пикселей ФП $n = 1$;
- заданный интервал времени компенсации неподходящей СДИ $\tau_{комп} = 10$ мс.

На графике на рис. 2 виден значительный разрыв в «кинематических» временах накопления $\tau_{кин}$, который даже при $\omega_{прог} = 0$ °/с составляет $\tau_{кин} \approx 15$ мс для каналов БОЭА с «коротким» и «длинным» фокусным расстоянием.

Следовательно, при одновременной съемке Земли с КА при таких двух фокусных расстояниях БОЭА и пропорциональных им $V_{СДИ}$ и $V_{комп}$ в каналах при относительно небольшом одинаковом времени компенсации и накопления (10 мс) смещения изображения планеты по ФП каналов БОЭА будут значительно отличаться согласно (6). Соответственно, форма движущихся проекций ФП на поверхность планеты и их размеры также будут значительно отличаться, а сами проекции ФП при протяженной маршрутной съемке будут еще и постоянно смещаться друг относительно друга во время съемки даже без влияния вращения планеты и кривизны ее поверхности. В результате такой

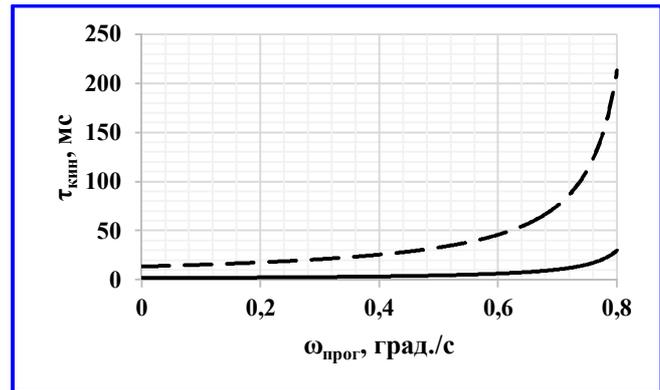


Рис. 2. График зависимости «кинематического» времени накопления сигнала на ФП при использовании БОЭА с $f_{MS} = 400,0$ мм и $f_{PAN} = 2000,0$ мм от $\omega_{прог}$ при средней высоте полета КА $H_S \approx 510,00$ км

способ формирования изображений планеты может породить необходимость очень затратных и, скорее всего, не вполне точных коррекций для формирования финального снимка, поставляемого потребителю. Кроме прочего, при таких коррекциях могут быть снижены радиометрическая верность и геометрическая точность, детальность изображения снимаемой поверхности планеты и его резкость [6, 7, 12 – 19]. Также, при съемке планеты с разными $f_{БОЭА}$ в PAN- и MS-каналах, в частности, сложно ожидать получения снимков (растровых условных примерно прямоугольных кадров) высокого качества, в том числе, цветосинтезируемых с применением методов совмещения изображений, алгоритмов типа PanSharp и аналогичных [16, 19].

График (рис. 2) также демонстрирует увеличение расхождения потребного времени $\tau_{кин}$ и времени $\tau_{нак}$ при разных $f_{БОЭА}$ с увеличением скорости разворота осей КА $\omega_{прог}$ во время съемки планеты, которую выгодно иметь большой для высокой производительности КА.

Подбор подходящих сочетаний времен $\tau_{кин}$, $\tau_{нак}$, $\tau_{комп}$ для одновременной орбитальной съемки с разными $f_{БОЭА}$, для любых целей сложен и малоэффективен по совокупности параметров (смещения, ФПМ изображения, С/Ш и т. д.), в частности, и из-за разности дрейфов конструкций БОЭА с «коротким» и «длинным» $f_{БОЭА}$, относительных погрешностей отработки указанных времен аппаратурой КА и БОЭА, других факторов.

В то же время на примере заданных выше параметров орбитальной съемки планеты видно, что для меньшего $f_{БОЭА}$ при одной и той же угловой скорости вращения КА $\omega_{прог}$ время $\tau_{кин}$ будет меньшим, чем для большего фокусного расстояния. Это значит, что можно дольше «копить» сиг-

нал (заряд на ФПЗС) и часть шумов на выходе ФП БОЭА и увеличивать С/Ш с большим фокусным расстоянием $f_{\text{БОЭА}}$ можно дольше при том же размере d пикселя дискретного ФП. Но при этом не следует допускать смещения изображения более чем на $\approx 1/3 d_i$ (размера пикселя) и снижения ФПМ «смаза» изображения по полю ФП [4, 9, 11 – 14, 18] даже при использовании объектива БОЭА с достаточной светосилой.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что для съемки камерой с одним фокусным расстоянием подбором сочетания оптимальных $\tau_{\text{кин}}$, $\tau_{\text{нак}}$, $\tau_{\text{комп}}$ следует управлять, в том числе, подбирая нужную угловую скорость разворота осей КА при съемке данной территории планеты, например, на заданной широте в целях прогнозных вычислений приемлемого баланса качества изображения планеты и производительности КА. В итоге с помощью (6) можно найти оптимальную угловую скорость разворота осей КА, при которой при возросшем С/Ш, а также при допустимых смещениях и ФПМ направленного «смаза» изображения поверхности планеты вблизи точки проекции главной оптической оси объектива на фокальную плоскость БОЭА оно будет формироваться с приемлемыми качествами. При этом необходимо учитывать, во всех других точках ФП БОЭА СДИ будет другой [4, 6 – 9, 11, 12], смещения изображения будут больше, а его ФПМ «смаза» хуже, чем в данной точке [7, 9, 11, 13, 17, 18] и пропорционально удаленности от нее [4].

Расчет скорости движения изображения и ее составляющих для управления при оптико-электронной съемке планеты и получении снимка

Во многих случаях проектирования и эксплуатации КА, оборудованных БОЭА для съемки планет, требуется знать необходимые СДИ. Это требуется как для задания режимов съемки средствами БОЭА с средствами ее оптически согласованных ФП, включая возможную компенсацию СДИ до подходящей, расчета информационных потоков ВД, регистрируемых БОЭА, параметров аналого-цифрового преобразования, сжатия полученных ВД, так и при восстановлении раstra изображения из ВД, КВП раstra и т. д. [6 – 12, 16, 17].

Для решения данных проблем из уравнения (6) получим требуемую скорость $V_{\text{комп}}$ через описанные выше параметры в виде выражения:

$$V_{\text{комп}} = \frac{(W_S - \omega_{\text{прог}} D_n) f_{\text{БОЭА}} \tau_{\text{кин}}}{\tau_{\text{комп}} D_n} - \frac{dn}{\tau_{\text{комп}}} \quad (7)$$

Если по расчетам с учетом (1) и С/Ш требуется компенсация СДИ, то должно выполняться равенство $V_{\text{СДИ}} = V_{\text{комп}}$, при этом $V_{\text{комп}}$ вычисляется по (7).

В выражении (7) $(W_S - \omega_{\text{прог}} D_n)$ – член уравнения, характеризующий режим компенсации орбитальной скорости КА за счет реализации специально рассчитанной $\omega_{\text{прог}}$, то есть за счет специального разворота КА средствами его СУОС. В таком случае визирная ось ВСК БОЭА программируемо «догоняет» снимаемую точку планеты. При увеличении угловой скорости разворота КА вокруг центра масс (ц. м.) $\omega_{\text{прог}}$ будет происходить уменьшение СДИ по полю ФП, порождаемой линейной относительной W_S , вследствие чего можно оптимизировать время $\tau_{\text{кин}}$, смещения изображения по ФП и ФПМ «смаза», геометрические искажения снимка, которые зависят от кинематических смещений [4, 9, 12]. Для обеспечения такого режима следует произвести расчет параметров орбитальной съемки, который проиллюстрирован на рис. 3.

Из графика видно, что при угловой скорости вращения КА вокруг ц.м. $\approx 0,4$ °/с для «короткого» фокусного расстояния $V_{\text{комп}} = 0,0$ мм/с в центре ФП БОЭА при прочих одинаковых условиях расчета. Для «длинного» $f_{\text{БОЭА}}$ $V_{\text{комп}} = 0,0$ мм/с получено при угловой скорости вращения КА вокруг ц.м. $\approx 0,83$ °/с. Результаты расчета показывают, что специально вычисленные угловые программные скорости разворота осей КА позволяют минимизировать СДИ в центре ФП БОЭА, и, следовательно, компенсация СДИ вблизи центра ее поля зрения не требуется. Это можно использовать для калибровок систем БОЭА и СУОС КА.

Предложенные зависимости позволяют вычислить параметры управления СУОС и БОЭА КА, цифровых преобразований на борту КА и передачи БЦИ, полученной при орбитальной съемке поверхности планеты.

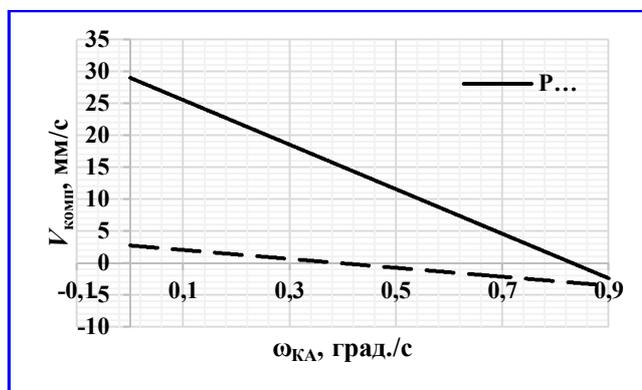


Рис. 3. График зависимости некомпенсированной СДИ $V_{\text{комп}}$ в центре ФП от значений угловой скорости разворота осей КА $\omega_{\text{прог}}$ при съемке

Применение на практике

При учете неравенства (1) формулы (2), (5), (6) и (7) могут применяться на определенных стадиях проектирования КА для орбитальной съемки поверхности планеты с помощью БОЭА, в целях планировании съемок такими КА, а также – для летных калибровок и анализа их результатов и результатов съемок. При этом, исходя из состава данных формул, проектирование связи КА – БОЭА наблюдения, задание управления данной связке при планировании ее функционирования во время съемки поверхности планеты и оценки результатов съемки должно производиться, в том числе, с высокоточной привязкой к выбранной единой ШВ и моделированием векторов СДИ по полю фотозон данной БОЭА. В этом случае D_H , W_S , входящие в (5), (6) или (7), могут быть вычислены по вектору состояния КА $x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$ и угловым элементам внешнего ориентирования ВСК ФП его БОЭА на моменты времени t_i регистрации ВД во время съемки [8, 12]. Причем, так как текущие W_S, D_H , на t_i при орбитальной съемке вращающихся планет жестко связаны и меняются во времени, то несоответствие остальных параметров в (5), (6) или (7) с расчетными или калиброванными значениями, например, из-за отклонения во времени реализации съемки относительно номинального t_i может привести к «смазу» и пропорциональным искажениям геометрии изображения, в частности, в зависимости от планетарной широты снимаемого МС.

С помощью указанных формул можно, в частности, довольно точно определять информационные потоки ВД и других в бортовых системах, БОЭА, КА, в его радиолиниях, предназначенных для передачи зарегистрированной БЦИ потребителям, а также – производительность съемки поверхности планеты с высоким разрешением и другие параметры КС.

Аналогично при помощи соответствующих преобразований на моменты времени произведенной съемки планеты t_i векторы фактических состояний КА на орбите могут быть пересчитаны в W_S, H_S, D_H . С ними вместе в (5), (6) или (7) могут быть подставлены фактически получившиеся значения $\tau_{\text{нак}}, |\omega_{\text{прог}}|, n$ (при использовании в БОЭА ФПЗС с режимом ВЗН точное значение n определяется отдельно), эффективного на момент съемки калиброванного $f_{\text{БОЭА}}$ и другие входящие в них составляющие. Тогда с учетом неравенства (1), становится возможным проверить, верно ли были заданы те или иные значения параметров, при которых производилась съемка планеты, а также проверить верно ли они были отработаны связкой, состоящей из комплекса планирования съемки, систем и конструкции КА и его БОЭА.

Также, соответственно фактически реализованным условиям съемки и параметрам БОЭА формулы (5), (6), (7) могут использоваться:

а) при радиометрических и геометрических калибровках параметров БОЭА по соответствующим полигонам на поверхности планеты;

б) при восстановлении цифрового растрового изображения поверхности планеты из полученного сигнала БОЭА;

в) для анализа изображения в части ФПМ «смаза», роста ФРТ и геометрических искажений изображения в пределах, например, растрового УК, а также – при коррекциях УК.

При учете неравенства (1) уравнение (7) при измерениях фактических СДИ по изображению растрового УК или по нескольким последовательным УК поможет произвести анализ функционирования борта КА во времени по отношению к расчетным величинам, например, к заданным в результате планирования съемки планеты параметрам управления его СУОС и БОЭА как при использовании элементов компенсации неподходящей СДИ, так и без нее.

Кроме того, необходимо отметить, что помимо приведенных выше приложений, уравнения, которые выведены в настоящей статье, могут использоваться для целей создания, верификации и реализации КС, позволяющих формировать растровые изображения поверхности планеты с высоким разрешением и со сверхразрешением [18, 20] при соответствующих конструкции фотозон БОЭА, орбите КА, планировании съемок и математической обработке значений фактических измеренных данных, которые входят, соответственно случаю в (2), (5), (6) или (7).

Заключение

Выведены неравенство и аналитические зависимости, связывающие все основные кинематические параметры орбитальной съемки планет с помощью БОЭА КА, включая параметры обеспечения СДИ, подходящей для регистрации изображения ФП. Представленные формулы могут применяться:

а) при проектировании КА оптико-электронного наблюдения планет с орбиты и учета влияния на изображение, в том числе нескольких $f_{\text{об}}$ его БОЭА;

б) в целях планирования съемки МС на поверхности планеты, калибровок систем КА, его БОЭА и их взаимодействия при съемках, в том числе в целях оптимизации СДИ по ФП;

в) при восстановлении, анализе и коррекциях растрового изображения поверхности планеты, полученного в результате орбитальной съемки данным КА с учетом совместного функционирования его си-

стем, БОЭА и их взаимодействия во время проведенной съемки МС;

г) при расчетно-экспериментальном анализе по результатам съемки функционирования таких систем КА как СУОС, аппаратура навигации, БОЭА при использовании высокоточных бортовых шкал времени;

д) в целях моделирования путем зашумлений динамически меняющихся, дрейфующих во времени и случайных параметров уравнений, представленных в настоящей статье, а также тех, по которым могут быть вычислены параметры, используемые при обработке изображения на выходе с ФП БОЭА;

е) в целях проектирования КА в комплексе с БОЭА для реализации с их помощью орбитальной съемки планет со сверхразрешением, в частности, аналогично КА, рассматриваемым в [20].

Литература

1. Space mission analysis and design / Wiley J. Larson, James R. Wertz // Microcosm Inc. and W. J. Larson. – Third Edition. – 2005. – 987 p.
2. Матричные фоточувствительные приборы с зарядовой связью для приёма движущегося изображения / А.В. Маклаков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 1(222). – С. 49 – 57.
3. Торшина И. П. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора: учебное пособие / И. П. Торшина, Ю. Г. Якушенков. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2017. – 58 с.
4. Бетенски Э. Проектирование оптических систем / Э. Бетенски, Р. Хопкинс, Р. Шеннон ; под ред. Р. Шеннон ; пер. с англ. В. И. Пейсахов. – Москва : Мир, 1983. – 432 с. : ил.
5. Бугаевский Л. М. Теория одиночного космического снимка / Л. М. Бугаевский, А. М. Портнов. – Москва : Недра, 1984. – 280 с.
6. A generic Pushbroom sensor model for high-resolution satellite imagery applied to SPOT 5, QuickBird and ALOS data sets / T. Weser, F. Rottensteiner, J. Willneff [et al.] // Cooperative Research Centre for Spatial Information, Department of Geomatics, The University of Melbourne VIC 3010, Australia. Jan 2007. – 2007.
7. Richards John A. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction / John A. Richards, Xiuping Jia. – 4th Edition. – New York : Springer, 2005. – 439 p. : ill. ; 25 cm.
8. Технология трехосного сканирования в оптико-электронной космической съемке / М. С. Бородин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2008. – Т. 9. – № 3. – С. 75 – 85.
9. Компенсация сдвига изображения при съемке с использованием ПЗС в режиме задержки и интегрирования / Б. М. Миллер, Е. Я. Рубинович // Информационные процессы. – 2007. – Т. 7. – № 1. – С. 45 – 54.
10. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой / М. Ю. Жиленев, В. Н. Винтаев // Телекоммуникации (Telecommunications). – Москва, 2011. – № 7 – С. 2 – 7.
11. Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты / В. Я. Геча, М. Ю. Жиленев, В. Б. Федоров [и др.] // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 65 – 77.
12. Основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при орбитальной оптической съемке с борта МКА / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. Я. Геча [и др.] // Вопросы Электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 160. – № 5. – С. 3 – 19.
13. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разрешения / И. С. Константинов, Н. В. Щербинина, М. Ю. Жиленев [и др.] // Научные ведомости БГУ. – № 8 (179). – 2014. – С. 189 – 199.
14. Техника формирования и коррекции резкости космических изображений высокого разрешения / В. Н. Винтаев, М. Ю. Жиленев, С. И. Маторин [и др.] // Научный результат. – 2016. – Т. 1. – №1 (1). – С. 72 – 80. – (Серия «Информационные технологии»).
15. Метод оценки пороговой частотно-энергетической характеристики оптико-электронного тракта / Д. А. Сикорский // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2003 – С. 1355 – 1368. – URL : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
16. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт ; пер. с англ. А. В. Кириюшина, А. И. Демьяникова. – Москва : Техносфера, 2010. – Сер. V (04) Мир наук о Земле. – 556 с. : 32 с цв. вкл.
17. Цифровая коррекция возмущений в изображениях, формируемых панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратурой космического аппарата «Монитор» / С. В. Блажевич, В. Н. Винтаев, Н. Н. Ушакова [и др.] // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011». – 2011.
18. Restoration technique for Pleiades-HR panchromatic images / C. Latry, S. Fourest, C. Thiebaut // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences ; XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012. – Melbourne, Australia, 2012. – Vol. XXXIX-B1. – P. 555 – 560. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-555-2012.
19. Pleiades-HR innovative techniques for radiometric image quality commissioning / G. Blanchet, L. Lebegue, S. Fourest [et al.] // International Archives of the Photogrammetry. – 2012. – Vol. XXXIX-B1. – P. 513 – 518.
20. From SPOT 5 to Pleiades HR: Evolution of the Instrumental Specifications / A. Rosak, C. Lotry, V. Pascal [et al.] // 5th International Conference on Space Optics (ICSO 2004). Toulouse, France (ESA SP-554, June 2004). – 2004. – P. 141 – 148.

Поступила в редакцию 22.10.2019

Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, зам. генерального директора по научной работе, т.: (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.

Михаил Юрьевич Жиленёв, старший научный сотрудник.
Сергей Юрьевич Горчаков, инженер.
Сергей Александрович Новоселов, инженер.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

FORMULAS FOR CALCULATING THE KINEMATIC PARAMETERS OF THE PLANET'S ORBITAL SURVEY BY THE SPACECRAFT'S ON-BOARD OPTIC IMAGER WHEN TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIRED THE VELOCITY OF THE IMAGE MOTION ON ITS PHOTODETECTOR

V. Ya. Gecha, M. Yu. Zhilenev,
S. Yu. Gorchakhov, S. A. Novosiolov

One of the best ways of preventing significant "blurring" and other images distorted of the planet's surface during its orbital image acquisition optical imager (hereinafter OI) of a spacecraft (SC) is the formation in its focal plan (FP), of the calculated movements of the projection of the axes of OI on the planet at a given time interval that meeting the many criteria set out, for example, in. At the same time, the parameters of the kinematic law of image acquisition, which are calculated for the SC, should set the velocity of the image motion (VIM) according to the mode of operation of the photodetectors (FD) of this devices during the image registration of the planet's surface by its means.

In this article, the authors propose derived direct relation, which in an analytical form with the correct restrictions on the allowable field of view (FV) of OI and others, discussed below, provide a way to calculate and set the kinematic law of the motion of the axes of the SC for image acquisition the desired route on the surface of planets with a suitable VIM. They also allow you to control its performance according to onboard measurements and set compensation VIM, unsuitable for FD OI in order to obtain a metrically reliable image with a given radiometric and geometric qualities. The derived formulae can be applied in the design of SC with OI for the image acquisition of the planet's surface, the analysis of the process of formation of the resulting bitmap of the captured surface according to the results of reception the SC, as well as in several other tasks.

Keywords: orbital reception, remote sensing of planets, optical imager, photodetectors, focal plan, the accumulation time, image shift, compensation, the velocity of the image motion, high resolution, formulas.

References

1. Larson Wiley J. Space mission analysis and design / Wiley J. Larson, James R. Wertz ; Microcosm Inc. and W. J. Larson. – Third Edition. – 2005. – 987 p.
2. CCD scan sensors for detecting of a moving image / A. M. Maklakov // Electronic technology. Series 2. Semiconductor devices. – 2009. – № 1 (222). – P. 49 – 57.
3. Tarasov V. V. Modern problems of optical equipment : textbook / V. V. Tarasov, I. P. Torshina, Iu. G. Iakushenko. – Moscow : Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2014. – 82 p. : with figures. – URL : <http://library.miigaik.ru>.
4. Betensky E. Applied optics and optical engineering / E. Betensky, R. Hopkins, R. Shannon [et al.] ; edited by R. Shannon and J. Wyant; translation from English edited by V. I. Peisakhson. – Moscow : Mir, 1983. – 432 p. : with figures.
5. Bugaevsky L. M. Theory of a single satellite image / L. M. Bugaevsky, A. M. Portnov. – Moscow : Nedra, 1984. – 280 p.
6. A generic Pushbroom sensor model for high-resolution satellite imagery applied to SPOT 5, QuickBird and ALOS data sets / T. Weser, F. Rottensteiner, J. Willneff [et al.] // Cooperative Research Centre for Spatial Information, Department of Geomatics, The University of Melbourne VIC 3010, Australia. Jan 2007. – 2007.
7. Richards John A. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction / John A. Richards, Xiuping Jia. – 4th Edition. – New York : Springer, 2005. – 439 p. : ill. ; 25 cm.
8. Technology of Three-Axis Scanning by Optronik Space Imaging Systems / M. S. Borodin // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2008. – Vol. 9. – № 3. – P. 75 – 82.
9. Image Motion Compensation at Charge-coupled Device Photographing in Delay-Integration Mode / B. M. Miller, E. Ya. Rubinovich // Informatsionnye Protsestry. – 2007. – Vol. 7. – № 1. – P. 45 – 54.
10. The Formula for Calculating the Image Motion of the Planets with Orbital Shooting Optoelectronic Equipment / M. U. Zhilenev, V. N. Vintaev // Telecommunications (Telecommunications and radio engineering). – 2011. – № 7. – P. 2 – 7.
11. The image speed during the optical-electronic surfacing the planet / V. Ya. Gecha, M. Yu. Zhilenev, V. B. Fyodorov [et al.] // Russian technological journal. – 2018. – Vol. 6. – № 4 (24). – P. 65 – 77.
12. The main sources of the decrease in the quality of images of the earth obtained during orbital optical imaging from the ICA board / L. A. Makridenko, S. N. Volkov, V. Ya. Gecha [et al.] // Electromechanical issues. Proceedings of VNIIEМ. – 2017. – Vol. 160. – P. 3 – 19.
13. Adaptive restoration of sharpness on digital space images / V. N. Vintaev, M. J. Zhilenev, S. I. Matorin [et al.] // Magazine of the Russian Academy of Science «Information technologies and computing systems». – 2014. – № 4. – P. 33 – 43.
14. Technique of generation and correction of sharpness of high-resolution space images / V. N. Vintaev, M. Iu. Zhilenev, S. I. Matorin [et al.] // Scientific result. – 2016. – Vol. 1. – № 1(1). – P. 72 – 80. – (Information technologies).

15. Sikorskii D. A. Method for assessing the threshold frequency-energy optic-electronic path characteristics / D. A. Sikorskii // «Researched in Russia». Electron. Log. – 2003. – P. 1355 – 1368. – URL : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>. – (10.10.2019).
16. Shovengerdt R. A. Distancionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenij / R. A. Shovengerdt. – Moskva : Tehnosfera, 2010. – 560 p.
17. Digital correction of disturbances in images taken with panchromatic optoelectronic imaging equipment of Monitor satellite / S. V. Blazhevich, V. N. Vintaev, N. N. Ushakova [et al.] // Proceedings of Scientific and Technical Conference ‘Computer Vision in Control Systems 2011’.
18. Restoration technique for Pleiades-HR panchromatic images / C. Latry, S. Fourest, C. Thiebaut // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences ; XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012. – Melbourne, Australia, 2012. – Vol. XXXIX-B1. – P. 555 – 560. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-555-2012.
19. Pleiades-HR innovative techniques for radiometric image quality commissioning / G. Blanchet, L. Lebegue, S. Fourest [et al.] // International Archives of the Photogrammetry. – 2012. – Vol. XXXIX-B1. – P. 513 – 518.
20. From SPOT 5 to Pleiades HR: Evolution of the Instrumental Specifications / A. Rosak, C. Lotry, V. Pascal [et al.] // 5th International Conference on Space Optics (ICSO 2004). Toulouse, France (ESA SP-554, June 2004). – 2004. – P. 141 – 148.

*Vladimir Iakovlevich Gecha, doctor of technical sciences (D. Sc.), deputy director general,
tel.: (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.
Mikhail Yurevich Zhilenev, senior researcher.
Sergei Yurevich Gorchakhov, engineer.
Sergey Aleksandrovich Novosiolov, engineer.
(JC «VNIEM Corporation»).*