

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 681.7.069.32:528.835.042

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ОРБИТАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЪЁМКЕ С БОРТА МКА

Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. Я. Геча,
М. Ю. Жилёнв, С. Г. Казанцев

Рассмотрен комплекс основных процессов формирования изображений Земли с помощью съёмочной бортовой оптико-электронной аппаратуры МКА, включая его функционирование и влияние при съёмке системы управления движениями осей МКА при съёмке заданных маршрутов. Показано, что на изображение, формируемое фотоприёмными устройствами, существенное влияние оказывают параметры движения МКА. Исходя из параметров этих движений, предложено условное разделение по их источникам на статические, кинематические и динамические. Такая формализация источников воздействий и их проявлений позволяет структурировать задачу получения численных оценок результатов космической съёмки, отнести их к определённому уровню качества изображения, и обозначить методы анализа соответствующего уровня сложности.

Ключевые слова: космические системы высокоточного наблюдения Земли, линейное разрешение на местности, функция передачи модуляции, вектор скорости движения изображения, топология фокальной плоскости оптико-электронной аппаратуры, сборка страйпа из микрокадров, маршрут съёмки, условный кадр.

Введение

Влияние турбулентности и непрозрачности атмосферы Земли, других фундаментальных, технологических и возмущающих факторов при функционировании космического аппарата (КА) приводит к тому, что техническим пределом линейного разрешения снимка, получаемого при съёмке оптическими средствами из космоса, считается величина 0,25 – 0,3 м [1 – 4]. Поэтому создание малого космического аппарата (МКА), который позволяет средствами бортовой съёмочной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) и обработки результатов съёмки получать снимки Земли с высоким линейным разрешением на местности (ЛРМ), является сложнейшей научно-технической проблемой.

Наиболее распространёнными при орбитальной съёмке поверхности Земли являются методы WhiskBroom и PushBroom [2, 4, 7, 29, 35].

При использовании метода WhiskBroom в ОЭА, неподвижно закреплённой на МКА, в качестве её входной апертуры (ВА) используются собственные подвижные элементы (зеркала, призмы и т. д.) для сканирования земной поверхности.

При съёмке методом PushBroom в ОЭА как правило отсутствуют подвижные элементы, а съёмка Земли производится за счёт движения МКА по орбите и его необходимых вращений вокруг собственного центра масс (ЦМ) [2, 4, 7, 28].

Особенности формирования изображения покровов Земли при орбитальной съёмке бортовой оптико-электронной аппаратурой МКА

Орбитальная съёмка земной поверхности производится в условиях, когда линейная орбитальная скорость носителя съёмочной аппаратуры значительно выше скорости снимаемой движущейся земной поверхности [8]. Это может приводить к различающимся по величине смещениям изображений земной поверхности в системе координат (СК) поля фотоприёмного устройства (ФПУ) за время экспозиции, в том числе в зависимости от наклонных дальностей до точек снимаемой поверхности. Кроме того, движения МКА происходят в беспорядочном пространстве при воздействии на МКА множества естественных сил [9, 10, 13, 15, 29, 32, 37] и их разнонаправленных моментов при отработке заданных программных угловых движений МКА вокруг его ЦМ бортовыми средствами системы ориентации и стабилизации (СОС).

Известно [1, 2, 7, 8, 11, 16 – 18, 20 – 22, 26 – 31], что качество снимков Земли из космоса определяется не только разрешающей способностью ОЭА, но и влиянием множества других факторов, таких как:

– погрешности измерительных и прогнозных (экстраполированных) по времени данных о положении на орбите и угловых движений в пространстве главной оптической оси и осей ФПУ ОЭА во время экспонирования, т. е. погрешностями определения по

измерениям движений осей ОЭА относительно Земли;

- погрешности задания расчётных программных угловых движений (ПУД) осей МКА и/или ошибочно заданные угловые скорости или/и ускорения ПУД МКА в пространстве во время съёмки;

- погрешностями реализации СК, в которых заданы исходные векторы и обрабатываются движения осей МКА;

- погрешностями материализации приборных СК;

- влияние на геометрию формируемого изображения вращения, кривизны Земли, рельефа, рефракции и турбулентности атмосферы;

- погрешности отработки бортовыми системами заданных движений осей МКА и ОЭА при компенсации нестабильности размеров конструкций или её отсутствии, отклонениях и дрейфах в работе соответствующих бортовых навигационных приборов и оборудования, в том числе взаимной временной привязки;

- дисторсия, отклонения в величинах оптических, фотограмметрических и геометрических параметрах оптико-механического модуля (ОММ) ОЭА относительно номинальных или калиброванных значений, которые используются в соответствующих бортовых и наземных алгоритмах;

- несоответствия фактических векторов скорости движения изображения (СДИ) по полю многоэлементного ФПУ заданным режимам его функционирования в связке с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), обычно входящим в состав оптико-электронных преобразователей (ОЭП) ОЭА и служащим для формирования первичных видеоданных (ВД), из которых в результате обработки сэмпляется и восстанавливается изображение;

- возможные вибрации – несанкционированные и относительно быстрые движения конструкции посадочных мест (ПМ) ФПУ ОЭА на частотах выше 1 Гц (более низкие должны не допускаться конструкцией ОЭА и обрабатываться СОС МКА), в том числе, на частотах съёма информации с ФПУ или резонансных им (источниками вибраций могут быть, например, консольные нежёсткие конструкции

МКА с люфтами, динамический дебаланс двигателей-маховиков (ДМ) или других осцилляторов в виде различных двигателей, приводов и т. д.);

- влияние бортовых алгоритмов обработки и формирования навигационно-временных данных, которые входят в сопроводительную бортовую целевую информацию (БЦИ) к ВД и которые получены по измерениям средствами СОС, бортовой аппаратуры спутниковой навигации (АСН) и другими средствами;

- влияние алгоритмов обработки БЦИ при восстановлении изображения, а также величин погрешностей самих измерений данных величин и их временной привязки;

- влияние алгоритмов кодирования, передачи сформированной БЦИ с МКА в наземный специальный комплекс (НСК) и атмосферных и иных помех в тракте передачи-приёма БЦИ в НСК во время сеанса связи и при декодировании и т. д.;

- влияние свойств алгоритмов бортовой и наземной обработки бортовых ВД из состава БЦИ с учётом данных штатных калибровок параметров ОЭА и её взаимодействия с СОС МКА, в том числе в части контроля взаимного углового положения осей данной ОЭА с осями звёздных датчиков (ЗД), волоконно-оптического датчика угловых скоростей (ВОДУС) или других приборов ориентации и временной привязки данных приборов;

- влияния всех перечисленных выше факторов на функцию рассеивания точки (ФРТ) на конкретных фотоприёмниках, функцию передачи модуляции (ФПМ) соответствующих составляющих информационного канала (тракта) получения изображения Земли с помощью МКА и средств НСК.

Современные космические системы высокодетального наблюдения Земли для получения изображений в оптическом диапазоне, в основном, используют съёмочные ОЭС на основе линеек фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) [2, 4, 25, 39], имеющих режим временной задержки и накопления (ВЗН), либо без такого режима при достаточной светосильности оптики ОЭА.

В данной статье рассматривается бортовая специализированная аппаратура (БСПА), в которой предусмотрен кадровый режим съёмки одновременно N -прямоугольными матрицами ФПЗС (без режима ВЗН и без антиблуминга), которые при этом расположены в «шахматном порядке» на конструкции в её фокальной плоскости. Изображение Земли, одновременно зарегистрированное всеми N -матрицами ФПЗС (МФПЗС), принято называть «страйп». Его примерный вид без некоторых стандартных коррекций при визуализации может иметь вид, который представлен на рис. 1.



Рис. 1. Фрагмент изображения в градациях серого от ФПЗС ОЭА, расположенных в «шахматном порядке» [33]

При подготовке к сборке («сшивке» [1, 2, 33]) страйпа из микрокадров за счёт вращения и кривизны Земли и неоптимальных векторов скоростей движения изображения (СДИ) по фотозоне каждой и всех N МФПЗС может возникнуть непрямолинейность в расположении границ проекций экспонированных микрокадров, которая представлена на рис. 2. Очевидно, что указанная непрямолинейность и некоторые относительные развороты микрокадров друг относительно друга при конкретных маршрутах съёмки будут зависеть от соответствующего влияния кривизны, вращения Земли, дальностей и возможной разности векторов СДИ по полям каждого из микрокадров.

Изображение, приведённое на рис. 2, является результатом проецирования фокальной плоскости с ФПЗС аналогичной, например, той, которая показана на рис. 3, где изображены ФПЗС, расположенные в шахматном порядке с заданным перекрытием формируемых ими следов (трасс) на земной поверхности.

Кроме того, каждый зарегистрированный из N -микрокадров по полю ФПУ ОЭА, может иметь свой разворот, который будет индивидуальным относительно некоторого, выбранного общим, вектора СДИ и вектора фактически отработанного программного углового движения осей МКА во время съёмки или начала некоторой базовой СК, например, визирной СК (ВСК), связанной с конструкцией МКА или ФПУ ОЭА. Данный случай взаимного положения микрокадров показан на рис. 4.

Причём неравные углы разворота ε_i ($i = 1, \dots, N$) в общем случае цифровой съёмки зависят от дальности и от точности наведения осей данной ОЭА и

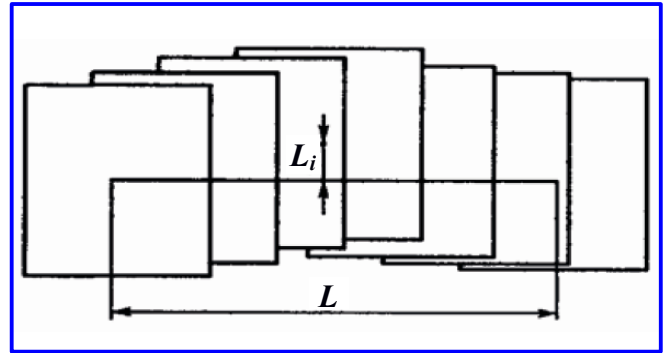


Рис. 2. Индивидуальные сдвиги микрокадров L_i ($i = 1, \dots, N$), одновременно зарегистрированных всеми МФПЗС ОЭА; непрямолинейность осей страйпа

погрешностей знания фокусного расстояния и границ эффективной (действительной) фотозоны ФПУ, точности временной привязки зарегистрированных оптических изображений и от того, как расположены орты фактических векторов СДИ в осях каждого поля ФПУ ОЭА. Такой разворот, помимо факторов орбитальной съёмки с помощью ОЭА, может обуславливаться ещё и погрешностями знания (измерения и эксплуатационных деформаций) взаимных положений МФПЗС в осях ОЭА.

Из получившихся растровых страйпов должны формироваться («сшиваться» в один растр) маршруты съёмки (МС), которые затем могут делиться на условные кадры (УК) или из УК формироваться МС. Для данных N МФПЗС не предусмотрен режим ВЗН и для каждой из них оптическая схема обеспечивает свое фокусное расстояние, а следовательно, векторы СДИ, «смазы» ФРТ и смещения изображения Земли за время экспозиции по каждой

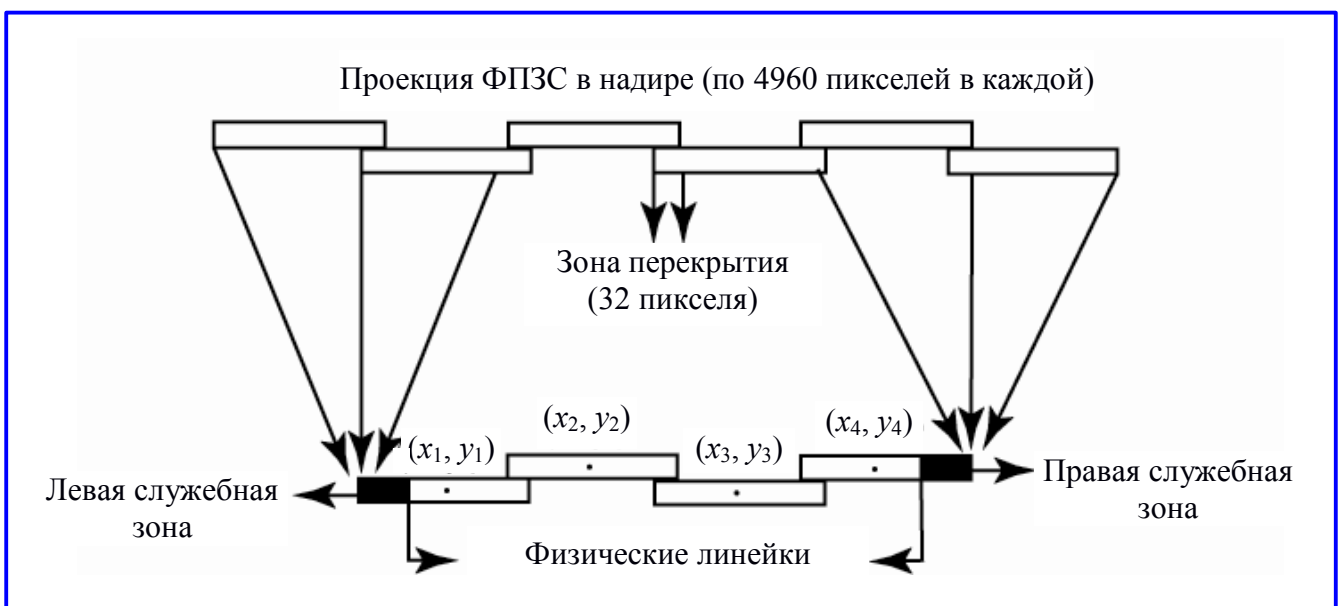


Рис. 3. Топология фокальной плоскости ОЭА «PRIZM» МКА «ALOS» [39]

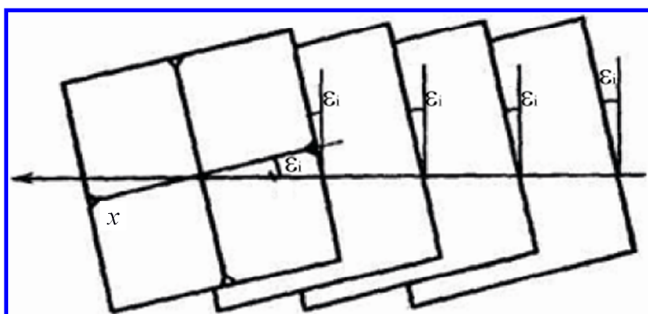


Рис. 4. Возможные индивидуальные развороты осей микрокадров, зарегистрированных набором ОЭП ОЭА одновременно

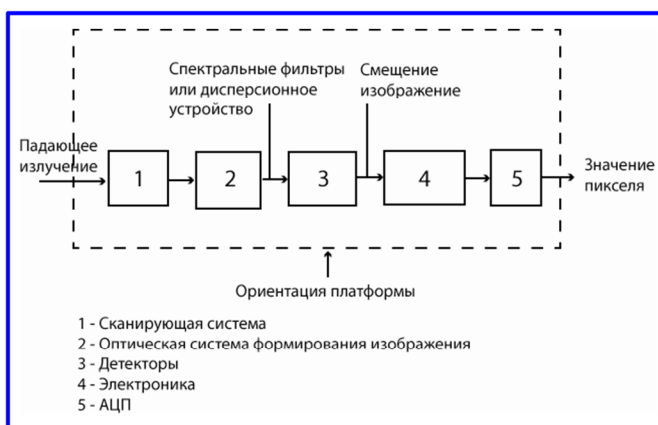


Рис. 5. Упрощённая диаграмма процесса формирования оптического изображения и регистрации видеоданных [2]

МФПЗС будут также уникальны. Данное обстоятельство резко усложняет требования к точности юстировок ОЭА и сохранности их результатов в полёте (или лётных калибровок), а также обработку до «сшитого» поля страйпа и УК тех видеоданных, которые были зарегистрированы данными МФПЗС.

В результате действия геометрических и кинематических факторов, (рис. 1 – 4), «сшивки» (склейка) микрокадров в страйпы (строки) и страйпов в УК и/или в растры МС может быть значительно осложнена. При этом могут «не работать» методы, предложенные в [28], способ Люси – Ричардса и многие другие.

На рис. 5 в упрощённом виде показан процесс регистрации изображения ФПУ ОЭА в виде кодов яркости (КЯ).

При экспонировании кадровой МФПЗС, аналогово-цифровом преобразовании оптико-электронного изображения средствами ОЭП и регистрации в виде видеоданных в целях получения набора микрокадров (а из них страйпов) для формирования МС условного кадра может возникнуть ситуация, когда при недостаточной согласованности (синхронности или в других параметрах) движений осей МКА и средств ОЭП, используемых для формирования

изображения и кодов яркости массива ВД, могут появиться некоторые промежутки («невидимые зоны») L_S между микрокадрами и/или страйпами. Условия возникновения такого случая проецирования ФПУ на снимаемую поверхность показаны на рис. 6 [34].

Такие относительно небольшие промежутки при восстановлении изображения могут быть заполнены интерполированными кодами яркости, например, по методу «ближайшего соседа» или иными, но при этом снизится качество изображения Земли, включая его частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), детальность и достоверность. При этом причин несинхронности может быть множество, включая зависимость от ширины точки съёмки, отклонения от оси визирования ОЭА от надира (подспутниковой точки). Также, например, при определённой компоновке МКА этому может способствовать дискретность системы управления ориентации и стабилизации (СОС). Особенно, если ОЭА имеет малый угловой размер проекции пикселя МФПЗС, равный $\arctan(d_{ФЧЭ} / f_{ОС})$, и при значительном дискрете по времени средств СОС при управлении монотонностью программного разворота во время его отработки для изменения положения осей МКА в пространстве при съёмке бортовой ОЭА. Кроме того, такая ситуация может возникнуть, если исполнительные органы СОС МКА будут его вращать с переменным ускорением в целях компенсации недопустимых отклонений от заданных программных угловых движений осей базовой системы координат (БСК) СОС, в которой производится отработка маршрутного полётного задания.

Также возможно возникновение противоположной ситуации, при которой страйпы будут иметь взаимное перекрытие больше необходимого расчётного, в том числе в результате обработки при проецировании на Землю и восстановлении растрового изображения из ВД. Причём индивидуальные сдвиги и завороты микрокадров и страйпов между собой также будут нерасчётными, что может привести ко множеству проблем в подборе алгоритмов для процессов «сшивки» микрокадров в страйпы, страйпов в УК или МС, последующим внеплановым коррекциям резкости, контраста, тоновой неравномерности и других параметров раstra с соответствующими искажениями и потерями детальности и разрешения растровых стандартных изображений Земли.

Из необходимости учёта показанных выше и изложенных ниже статических кинематических и других особенностей формирования микрокадров, страйпов или скановых изображений Земли, которые были первично зарегистрированы ОЭП в виде

кодов яркости, при их обработке для формирования растровых УК и МС возникает необходимость производства радиометрических и геометрических коррекций первичных ВД, которые должны быть стандартными для данной ОЭА и МКА. Они также будут снижать качество изображения Земли и его резкость, которую затем корректируют [1, 2, 17, 18].

Наряду с перечисленными выше, при съёмке вращающейся Земли с движущегося МКА, как правило, возникает кинематический «смаз» первичного изображения большей или меньшей степени. Он, в первую очередь, связан с разностью дальностей до точек снимаемой поверхности, разностью линейных скоростей их собственного движения и порождаемых ими эпюр векторов СДИ по полю фотозоны набора из N МФПЗС. Результат может быть аналогичным тому, который показан на рис. 7 [13]. На данном рисунке отображены взаимно перпендикулярные оси приборной системы координат (ПСК) ОЭА, связанной с конструкцией фокальной плоскости. Показаны продольный и поперечный размеры ФП без указания местоположения ФПЗС.

Также показана трасса (след) фотоприёмников на земной поверхности.

В работах [12 – 14] на примере трёх разных способов съёмки показано, что скорости движения изображения и порождённые ими линейные смещения и «смазы» оптического изображения по полю ФП ОЭА, которые в наибольшей степени зависят от закона управления ориентацией и стабилизацией осей МКА в пространстве, а также от точности

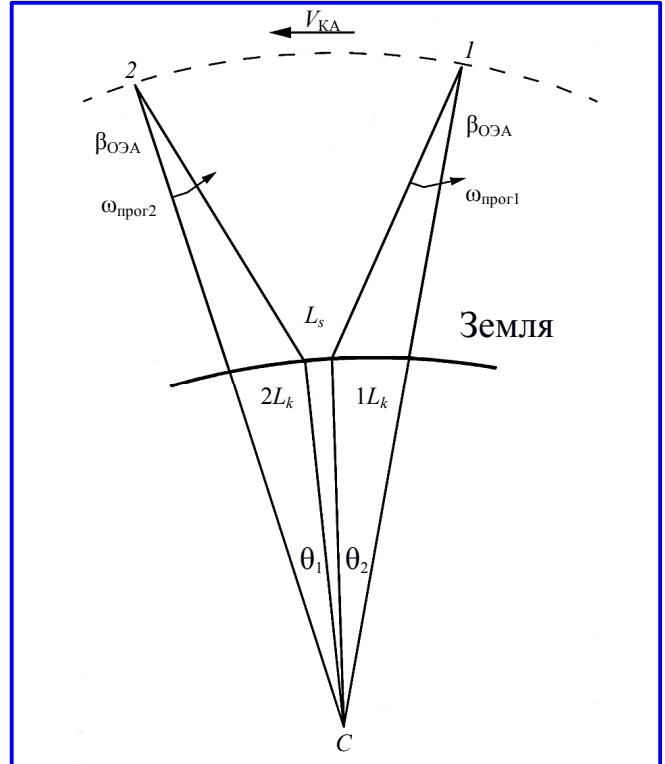


Рис. 6. Появление «невидимой зоны» между страйпами L_s , вид в плоскости орбиты [34]: $V_{КА}$ – орбитальная скорость МКА; $\omega_{прог1}$, $\omega_{прог2}$ – угловые скорости вращения МКА вокруг его ЦМ в 1-й и во 2-й точках на орбите; $\beta_{ОЭА}$ – половина углового размера поля обзора ОЭА; θ_1 и θ_2 – геоцентрические углы в 1-й и во 2-й точках на орбите

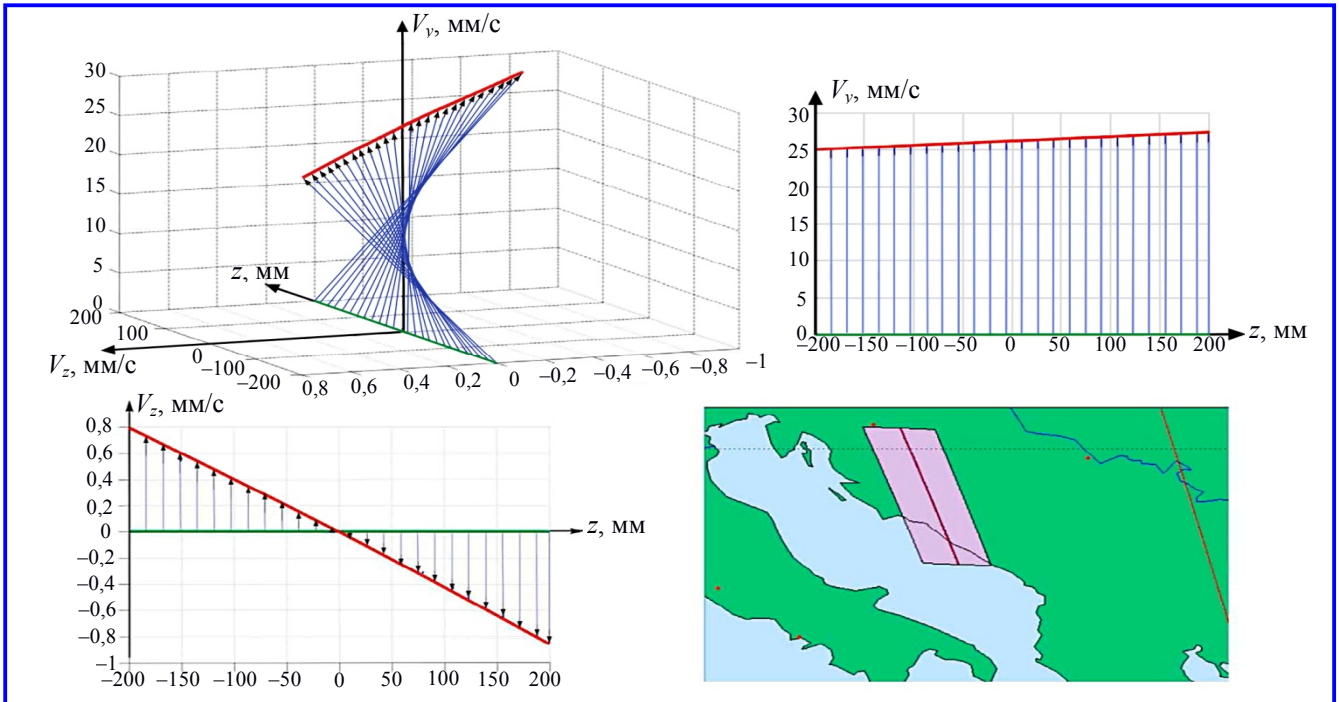


Рис. 7. Поле составляющих векторов СДИ по полю фокальной плоскости съёмочной ОЭА высокого разрешения путём их оптимизации за счёт вращения с МКА вокруг его ЦМ при съёмке и след (маршрут съёмки) на земной поверхности [13]

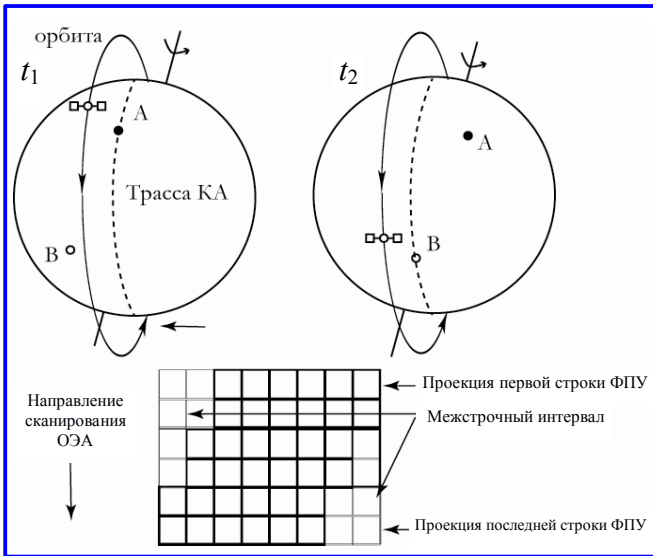


Рис. 8. Смещение точек Земли за время проецирования на фотоприёмник

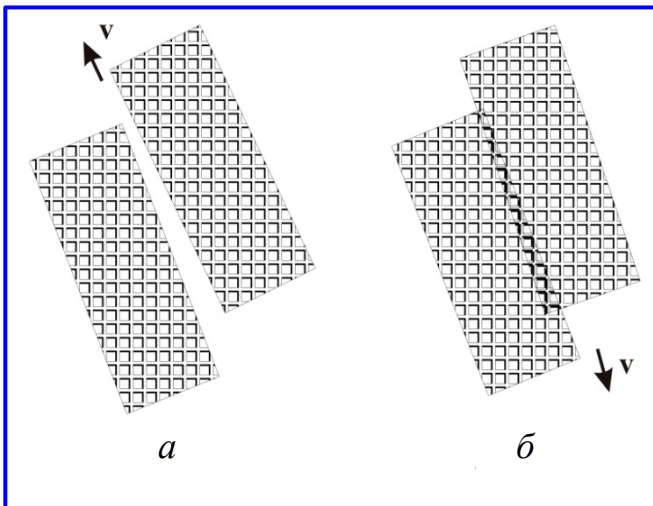


Рис. 9. Поведение проекций соседних фотоприёмников при съёмке маршрута в направлении от экватора и к экватору (сдвиг-разворот): V – вектор орбитальной скорости МКА; a – съёмка на восходящем витке; b – съёмка на нисходящем витке

его обработки, включая указанные выше погрешности наведения на маршруте съёмки.

В целях предотвращения появления значительных и разнонаправленных «смазов» из-за различий векторов СДИ по полям фоточувствительных элементов (ФЧЭ) МФПЗС во время экспозиции, то есть в режиме накопления видеосигнала, необходимо, чтобы скорости всех движений осей МКА, ОЭА и её соответствующих подвижных частей были достаточно точно согласованы со скоростью считывания каждой МФПЗС. Также при планировании съёмки и её обработки МКА, особенно при кадровой съёмке, необходимо не допускать появ-

ления «слепых зон» между смежными страйпами или излишних надвигов с разворотом разновременных страйпов друг на друга, осевые линии которых будут развёрнуты пропорционально фактическому вектору СДИ. Данные необходимые условия должны обеспечиваться взаимодействием СОС МКА и средств управления экспозицией ФПУ ОЭА при достаточной точности расчёта кинематики съёмки МС средствами планирования работы МКА (рис. 8, 9).

Направление смещения и сужения либо расширения проекции полосы захвата на снимаемую земную поверхность зависят ещё и от направления движения МКА по орбите при съёмке маршрута в северном и южном полушариях Земли.

Например, при съёмке МС в северном полушарии на нисходящей ветви витка (с северо-востока на юго-запад) или на восходящей (с юго-востока на северо-запад) проекции ФПУ на поверхность Земли и их перекрытия между собой в случае «шахматного» расположения будут разными по геометрическим размерам, особенно, при наклонной съёмке.

Также разными будут и взаимные относительные развороты проекций ФПЗС на земную поверхность и, следовательно, развороты растровых фрагментов, которые получаются при сэмплинге кодов яркости на снятую поверхность при восстановлении первичного растрового изображения.

Данное обстоятельство отражено на рис. 9: в результате восстановления изображения при одних и тех же заданных размерах проекции ФЧЭ ФПУ на поверхность Земли на одной и той же широте без проведения специальных коррекций, получится разное количество пикселей «сшитого» изображения.

На практике данные условия могут нарушаться ещё и из-за следующих причин:

- ошибочного выбора кинематических математических алгоритмов (т. е. расчёта задаваемых программных угловых скоростей и ускорений разворотов МКА при наведении осей бортовой ОЭА на линии МС и отслеживания ими поверхности Земли при орбитальной съёмке), не учитывающего геометрических, фотограмметрических и других особенностей ОЭА;
- погрешностей обработки программных угловых скоростей и ускорений вращения МКА вокруг его собственного ЦМ;
- погрешностей вычисления скорости МКА, параметров его поворота вокруг собственного ЦМ при съёмке;
- погрешностей знания фокуса ОЭА, относительной скорости осей ОЭА, задания частоты опроса ФПЗС, дискретизации сигнала средствами АЦП ОЭП и т. д. [17].

В результате могут получаться нерезкие смазанные изображения с периодическим изменением контраста в виде полос от одного до другого края растра, не связанные с неравномерностью чувствительности МФПЗС (рис. 10).

Кроме того, из-за рассогласования работы ФПУ и фактического вектора СДИ могут возникать искажения геометрии изображений ландшафта Земли в виде скоростных сдвигов и разворотов по полю объектов ландшафта, которые зависят от фактического времени интегрирования видеосигнала на ФПЗС, векторов СДИ по полю ФПУ, а также от интервала времени съёмки заданного МС, так как при больших протяжённостях накапливаются погрешности СОС и формирования изображения [11, 36]. Чтобы их минимизировать, также необходимо соответствующим образом рассчитывать и производить съёмку земной поверхности, в том числе минимизируя погрешности исходных данных планирования, погрешностей его алгоритмов, СОС МКА и др.

Почти все перечисленные выше артефакты изображения могут корректироваться при обработке растра, принося снижение разрешения, другие искажения, сводящие к минимуму метрические свойства и значительно уменьшающие детальность и верность растрового результирующего изображения ландшафта. Например, могут утрачиваться контуры (высокие пространственные частоты) на снимке и тени, которые крайне важны как дешифровочные признаки и значительно влияют на ЛРМ.

Причём, параметры кинематического «смаза» по полю ФПУ могут существенно варьироваться по форме, спектру частот и его длине (от долей до десятков и сотен пикселей сэмпированного растрового изображения) и иметь разные пространственно-частотные составляющие [2, 4, 16, 21], в частности, систематическую (направленную) и случайную. Последняя, при определённых частотах считывания заряда ФПЗС, может быть, например, следствием случайных погрешностей стабилизации угловых движений МКА относительно заданных для данной конкретной съёмки и/или вибрации. При этом, какое именно влияние скажется сильнее на формируемом изображении – неточно подобранные параметры вращения МКА или погрешность стабилизации, во многом зависит от сочетания высоты съёмки с параметрами размеров и, отчасти, величины облучённости фоточувствительных элементов ОЭА и вращения МКА вокруг его ЦМ при съёмке.

Вибрации конструкций МКА и ОЭА во время съёмки необходимо рассматривать как отдельный

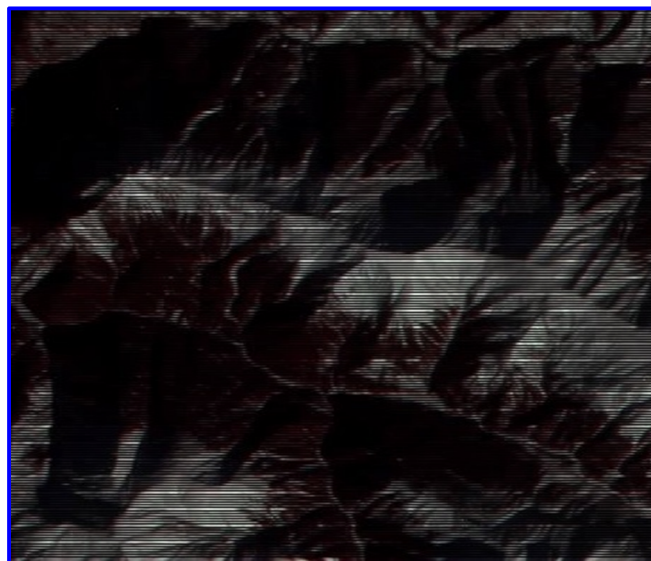


Рис. 10. Периодическая «полосатость» в результате несогласованности угловых скоростей (направление вектора СДИ перпендикулярно периодическим «полосам»)

динамический источник ухудшения изображения, так как в отличие от других факторов (кроме физической дефокусировки) они обычно приводят к общему падению резкости («замыливанию») контуров и снижению контраста примерно одинаково по всему полю фотозоны ФПЗС. Основные физические и математические описания основных видов вибрации даны в ГОСТ 24346-80 [6], а их используемые параметры могут быть определены по результатам соответствующих испытаний конструкции МКА и по измерениям параметров его угловых движений вокруг собственного ЦМ при летной эксплуатации (ЛЭ).

Кроме влияний МКА и ОЭА, снижение резкости и разрешения изображения может быть следствием шумов от стандартных коррекций «сырых» видеоданных, алгоритмов сжатия-декомпрессии, а также вторичных коррекций, т. е. ресэмпинга (повторного сэмпинга), затем компенсации аласинга, эффектов Гиббса, блочности, других артефактов, снижения резкости, контраста и т. д. [22].

В итоге все перечисленные выше факторы приводят к снижению частотно-контрастной характеристики, т. е. общей ФПМ изображения Земли, его детальности и достоверности, и, соответственно, к снижению его ЛРМ.

На рис. 11 показана разница в действии на сформированное изображение Земли без «смаза», с кинематическим (всегда имеющим направление) «смазом» и «смазом» от вибрации, т. е. из-за влияний быстрых по отношению ко времени накопления сигнала движений МФПЗС во время съёмки.

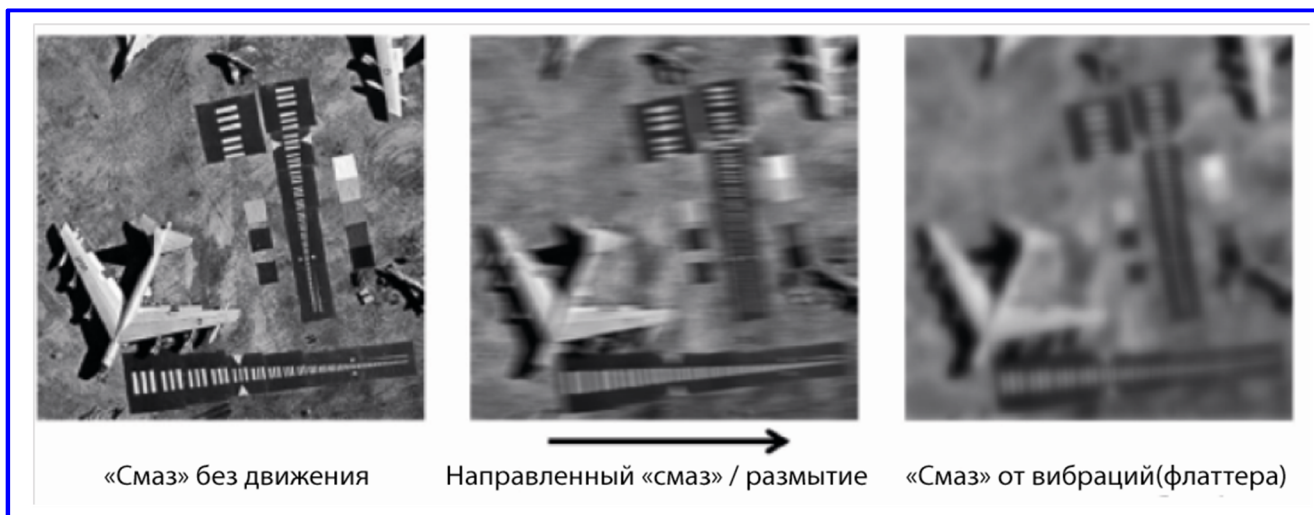


Рис. 11. Действие «смазов» разного происхождения на изображение земной поверхности [16]

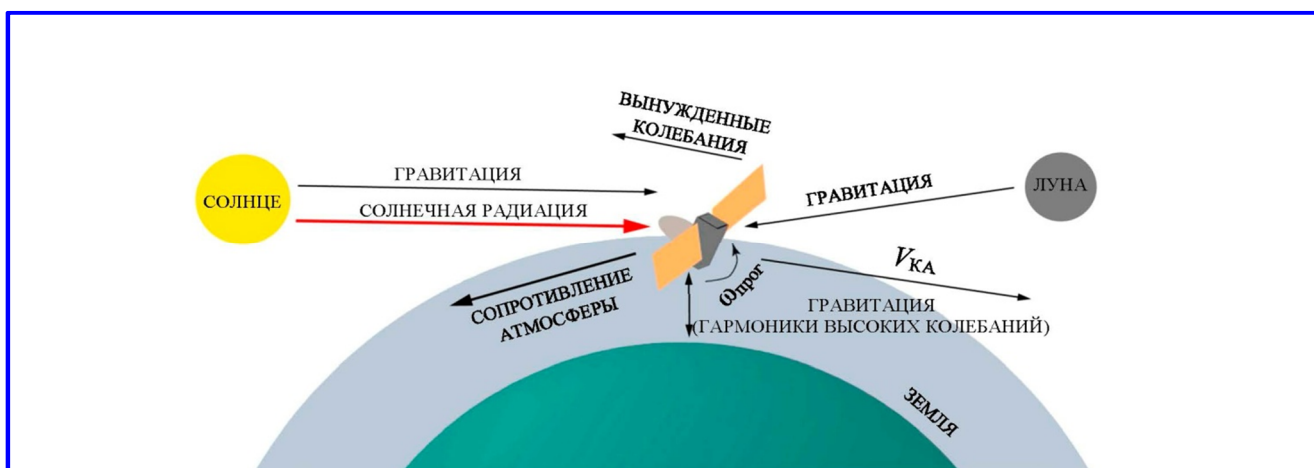


Рис. 12. Основные естественные силы, которые действуют на МКА ДЗЗ, находящийся в космическом безопорном пространстве [37]

Учитывая, что среди перечисленных выше составляющих процесса формирования изображения Земли при орбитальной съёмке средствами ОЭА имеются статические, кинематические и динамические факторы, в данной статье основное внимание акцентируется на учёте величин, составляющих вектора СДИ и порождаемых ими смещениях поля изображения, возникающих за время экспозиции на ФПУ. При этом оценки величин СДИ важны в силу того, что в соответствии с априорно рассчитанными векторами СДИ для конкретных съёмки должны определяться тактовые частоты ФПЗС, АЦП ОЭП, а также, по данному вектору, направления перемещений изображения или его несанкционированного сдвига за то или иное время, например, в целях оптимизации управления МКА и обработки БЦИ. Кроме того, ФПЗС для аэрокосмического ДЗЗ, как правило, имеют в своём формуляре допустимые величины СДИ вдоль их собственной

оси (осей) и допуск на их отклонения за данное время. Например, ФПЗС чувствительны к движению изображения только по одной координате ФПУ, что необходимо учитывать при планировании съёмки. При этом возможности сжатия изображения и его «улучшающих» коррекций почти напрямую связаны с его соотношением сигнал/шум (С/Ш) и динамическим диапазоном: чем данные характеристики выше, тем лучше разрешение финального снимка.

Оценка величин статических и других санкционированных математическим законом сканирования Земли ФПУ ОЭА и несанкционированных смещений (сдвигов) изображения необходима для априорной оценки ФПМ систематического и случайного «смаза» изображения и оценок снижения его радиометрических качеств, падения контраста, резкости и геометрии. При ней можно ввести ФПМ систематического и случайного «смазов», порож-

даемых свойствами МКА, как служебной платформы для ОЭА, а также порождаемых её движениями во время съёмки (рис. 12).

Случайный «смаз», описываемый соответствующей ФПМ, может порождаться колебаниями осей МКА в пространстве из-за погрешностей стабилизации вращений МКА вокруг его ЦМ, т. е. в результате компенсации несанкционированных угловых скоростей и связанных с ними ускорений. Совместными с данным источником случайного «смаза» являются вибрации конструкции ФП ОЭА, то есть относительно быстрые движения на частотах выше определённых, т. е. на которых производится экспонирование и регистрация изображения фотоприёмным устройством ОЭА.

Значительное снижение контурности и потери в детальности (пропадание контуров, снижение ЧКХ, С/Ш и скорректированная «блочность») растрового изображения (снимка) могут определяться выбранными алгоритмами и степенью сжатия исходного цифрового изображения, полученного ОЭП бортовой ОЭА МКА, что иллюстрируется рис. 13.

На рис. 13, *а* представлено изображение, полученное посредством панхроматической съёмочной системы (ПСС) малого МКА «БКА» (Белоруссия), на рис. 13, *б* – оно же, но сжатое с помощью алгоритма адаптивного дискретно косинусного преобразования (АДИКМ) со степенью сжатия 4 и декомпрессированное для визуализации, а на рис. 13, *в* – результат их попиксельного вычитания с удержанием необходимой разрядности.

Из рис. 13 видно, что в результате сжатия исходного изображения высокие частоты спектра ЧКХ снимка оказались в остатке после вычитания.

Т. е. значительно и безвозвратно пострадали фактические контуры и тени исходного изображения ландшафта Земли и его антропогенной части, что снизило его детальность, С/Ш, ЛРМ и достоверность дешифрирования, то есть достоверность съёмки.

Кроме того, при использовании разных алгоритмов сжатия и декомпрессии, помимо потерь и появления артефактов изображения, возникает множество шумов, что заметно ухудшает С/Ш изображения и его разрешение, равномерность по полю «страйпа» и условного кадра в целом.

Известно, что геометрическое разрешение ОЭА (пространственное, проекция пикселя ФПУ на снимаемую поверхность) при съёмке с отклонением от надира не более чем на $\pm 5^\circ$ приближённо может быть оценено по упрощённой формуле [4]:

$$R_{\text{прост}} \approx \frac{k_1 d_{\text{ФЧЭ}} D_{\text{Н}}}{f_{\text{об}}},$$

где $D_{\text{Н}}$ – наклонная дальность до точки на поверхности Земли, регистрируемой на изображении средствами бортовой ОЭА; $d_{\text{ФЧЭ}}$ – размер фоточувствительного элемента; $f_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива ОЭА; k_1 – эмпирический коэффициент (коэффициент качества изготовления и согласованности ОЭА, который может составлять от 1,3 до 2,0).

Очевидно, что формула не содержит членов, учитывающих отклик или светосигнальную характеристику ОЭА при проецировании в неё снимаемой сцены, яркости (альbedo), контраста данной

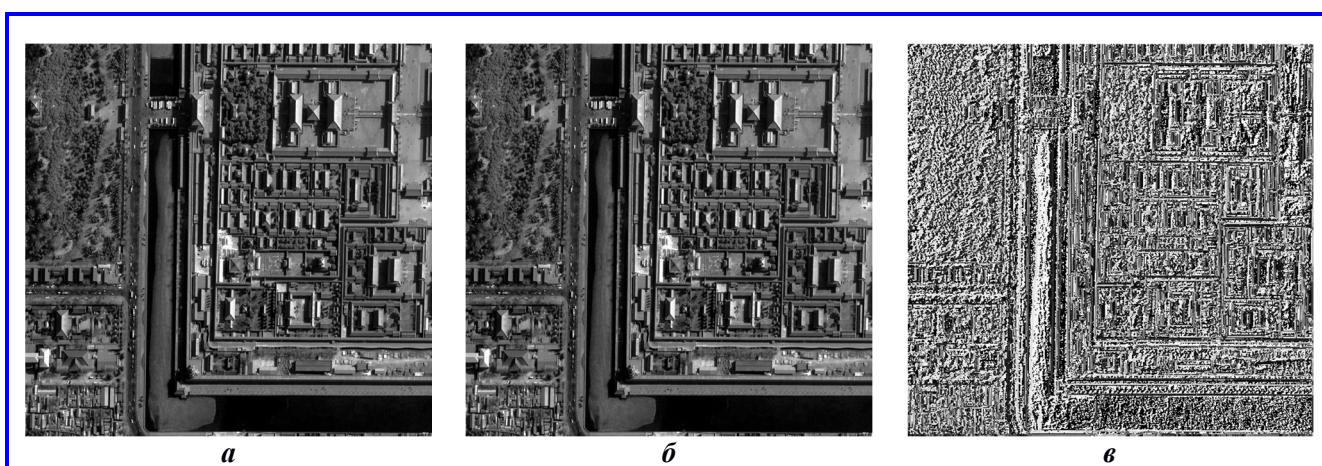


Рис. 13. Изображение, полученное средствами БКА (*а*); исходное изображение, сжатое алгоритмом АДИКМ со степенью сжатия, равной 4 (*б*); результат попиксельного вычитания исходного и сжатого изображения (*в*)

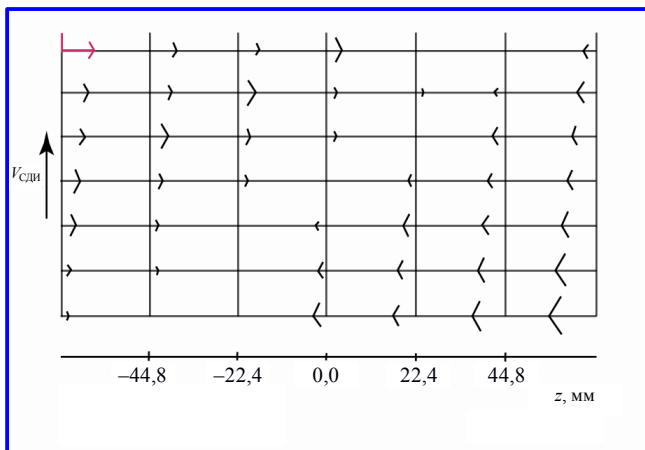


Рис. 14. Распределение значений составляющих векторов СДИ по полю ФП ОЭА при орбитальной кадровой съёмке Земли матричными ФПЗС при требовании равенства 0,0 значения вектора СДИ в центре ФП

сцены или тест-объекта и те возможные факторы, которые могут снизить яркостные, изобразительные качества и достоверность распознавания изображения сцены или тест-объекта. Естественно, что данная формула не даёт представления о других параметрах разрешения, соответственно и ЛРМ.

Более точная формула записывается так [4, 19]:

$$L_{\text{ЛРМ}}(t) = \frac{1}{v_p(t, h_c, K_{\text{об}})} \frac{D_{\text{МКА}}(t, \alpha, h_{\text{МКА}})}{f_{\text{об}} \cos z_{\text{МКА}}},$$

где $D_{\text{МКА}}(t, \alpha, h_{\text{МКА}})$ – дальность от объекта до МКА в момент наблюдения; $f_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива; v_p – пространственная частота, разрешаемая информационным каналом; h_c – угол Солнца над горизонтом объекта наблюдения; $z_{\text{МКА}}$ – зенитный угол МКА на объекте наблюдения; $K_{\text{об}}$ – контраст объекта наблюдения с учётом прозрачности атмосферы.

При известной пространственной частоте, разрешаемой ОЭА с учётом смещений, «смазов» и всех операций формирования финального растрового изображения Земли, предназначенного для передачи конечному пользователю, можно воспользоваться упрощённой формулой [4]:

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{k_t D_{\text{МКА}}}{v_p f_{\text{об}}}.$$

Обычно указанные величины разных видов разрешения, в том числе и ЛРМ, оцениваются с помощью соотношения С/Ш и математического аппарата ФПМ в информационном канале [2, 4, 10, 33, 34],

с помощью которых и определяются разрешаемые пространственные частоты данного сквозного информационного тракта.

Полная (суммарная) ФПМ изображения $T_{\Sigma}(v)$ является результатом суммарного влияния [2, 4, 11, 33 – 36]:

- ФПМ атмосферы;
- ФПМ функционирования аппаратной части каждого из каналов ОЭС (расфокусировки ОЭМ, свойств и спектрорадиометрических, динамических, и шумовых характеристик МФПЗС, тракта усиления, преобразований первичных видеоданных и др.);
- ФПМ кинематических «смазов»;
- ФПМ процесса передачи БЦИ по линиям связи (например, по ВРЛ с избыточным кодированием или без него) с МКА и её приёма в НСК;
- ФПМ восстановления и сэмпинга (ресэмпингов) растрового изображения, его стандартных коррекций и дальнейшей, так называемой «улучшающей» обработки [1].

ФПМ кинематических «смазов» [4, 21] определяются смещениями за время накопления, т. е. являются функциями векторов СДИ по фотозоне ФПУ и времени экспозиции. Соответственно, так как электронный «затвор» ФПУ открывается и «закрывается» одновременно, то в идеале и векторы СДИ по всему полю ФП ОЭА должны быть одинаковыми, чтобы изображение имело равномерную яркость. Но при съёмке сферической, вращающейся Земли этого добиться практически невозможно при более или менее оптимальной полосе захвата ОЭА.

Данное обстоятельство может быть иллюстрировано, как показано ниже на рис. 14 и 15.

Стрелками на рис. 14 показаны составляющие СДИ по осям «y» и «z» ФП ОЭА в той точке, где она находится. Направление вектора номинальной (например, заданной СДИ) показано слева в виде стрелки с подписью «V_{сди}». Значение $V_{\text{сди}} = 0,0$ мкм/с в центральной точке ФП съёмочной ОЭА МКА, т. е. в центре поля обзора объектива.

На рис. 14 видны встречная направленность и большие различия поперечных (горизонтальных на рисунке) и продольных составляющих векторов СДИ на разных краях ФП ОЭА, которые порождаются кривизной поверхности Земли и её вращением во время экспонирования МФПЗС в ФП, например, с заданными размерами 120 × 75 мм. Из рис. 14 следует, что пропорционально различиям векторов СДИ по полю фотозоны ОЭА и интервалу времени экспозиции ФЧЭ МФПЗС будут формироваться (накапливаться) и геометрические смещения спроецированного объективом оптико-электронного изображения (ОЭИ), которое при

этом регистрируется оптико-электронным преобразователем (ОЭП), и видеосигнал, например, в виде кодов яркости, присвоенных номерам некоторых ФЧЭ ФПУ. Именно это ОЭИ будет исходным, чтобы в последствии подвергнуться оцифровке в ОЭП, стандартным коррекциям и другим преобразованиям, присущим данному каналу формирования финального растрового изображения. При этом длина «смаза» будет пропорциональна отличию фактического количества ФЧЭ, пройденного точкой Земли за время накопления от номинального, которое предопределено характеристиками выбранного ФПУ и доопределено параметрами режима съёмки, так или иначе задающими кинематику движений осей ФПУ ОЭА относительно снимаемой поверхности.

Такого рода параметры кинематики движений МКА и осей ОЭА формируются либо непосредственно в маршрутном полётном задании (МПЗ) с учётом ключевых параметров ОЭА и ракурса съёмки, либо способом управления ориентацией и стабилизацией осей МКА при съёмке, если он не учитывает особенности ОЭА и кинематики съёмки («штативная съёмка») подвижной поверхности Земли, либо тем и другим.

На рис. 15 показано использование линейного ФПЗС с режимом ВЗН или без него в качестве ФПУ съёмочной ОЭА ДЗЗ. Здесь также видны встречная направленность и разности поперечных (горизонтальных на рисунке) и продольных составляющих векторов СДИ на разных краях ФП ОЭА.

Из сравнения рис. 14 и 15 следует, что при съёмке изображения Земли при прочих равных условиях с помощью линейных ФПЗС (с режимом ВЗН или при достаточном отношении С/Ш без него), имеющих значительно меньший размер по одной координате, чем кадровые МФПЗС, размах величин продольных (параллельно вектору СДИ) составляющих СДИ значительно уменьшится, а значит уменьшатся возможные «смазы» и соответствующие перепады яркостей пикселей или даже «пересветов» (локального ухода ФЧЭ ФПЗС в насыщение) по полю одной ФПЗС, которые не являются результатом такой неестественной неравномерности освещённости снятой поверхности Земли или неравномерности чувствительности собственно ФЧЭ ФПЗС. Следовательно в этом случае ФПМ и С/Ш «сырого» изображения улучшится.

Применение линейных ФПЗС даёт более равные условия движения изображения по полю фотозоны ФПУ при съёмке, более равномерное его экспонирование, меньшие затраты на необходимые компенсирующие стандартные коррекции и, следовательно – более высокие метрические качества снятого

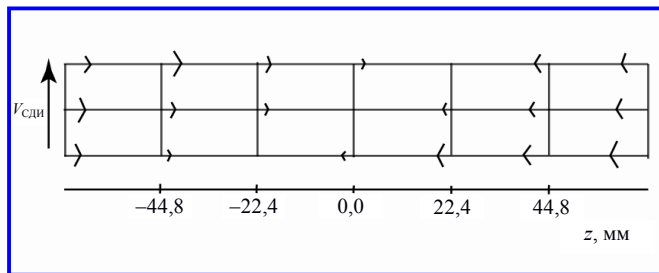


Рис. 15. Распределение значений составляющих векторов СДИ по полю линеек ФПЗС ФП ОЭА при съёмке и требовании равенства 0,0 к вектору СДИ в центре данной ФП

изображения поверхности Земли. Кроме того, по короткой координате уменьшается влияние погрешностей знания эффективного фокусного расстояния объектива ОЭА $f_{об}$ и масштабного коэффициента $f_{об}/(HS \times \sin \gamma_z)$ (где γ_z – зенитный угол визирной оси относительно плоскости горизонта в точке съёмки), влияющих на векторы СДИ и проецирование изображения на уровенную поверхность.

Изображениям Земли, сформированным съёмочной ОЭА МКА, свойственно ещё одно, не всегда вполне явное по источнику, искажение, возникающее из-за кривизны Земли и того, что снимок формируется за счёт центрального проектирования на ФПУ.

Данное искажение возникает тогда, когда коды яркостей каждого ФЧЭ ОЭП при восстановлении из них цифрового растрового изображения проецируются на модель земной поверхности: на эллипсоид Земли с последующим приведением к некоторой уровенной поверхности или на плоскость, соответствующую некоторой средней высоте на снятой территории. Сама деформация изображения возникает из-за того, что при съёмке получается центральная проекция сферичной Земли на плоском фотоприёмнике, а при восстановлении изображения, чтобы оно приняло такие размеры, которые имело при съёмке, требуется обратная операция – проецирование несколько «ужатых» из-за сферического избытка строк и колонок (столбцов) дискретного фотоприёмника на подходящую поверхность в соответствии с границами поля обзора объектива съёмочной ОЭА МКА.

В результате изображение земной поверхности, зарегистрированное ОЭП ОЭА в виде плотно уложенных друг к другу строк и столбцов, например, в файл-потоке, называемое «кажущееся», будет выглядеть, как показано на верхнем поле рис. 16, а геометрически спроецированные строки и столбцы при формировании цифрового растрового снимка без коррекций будут несколько расходиться («реальное изображение» на нижнем поле рис. 16).



Рис. 16. Кажущееся изображение, т. е. без проецирования на реальную Землю, и реальное, получающееся в результате проецирования «квадратных» ФЧЭ (пикселей) ФПЗС на поверхность Земли [46]

Как следует из рис. 16, в реальном изображении пропуски между границами проекций пикселей ФПЗС на поверхность придётся заполнять за счёт сэмпинга с интерполяциями геометрии транспаранта ФПУ и, следовательно, яркостей, зарегистрированных ОЭП ОЭА. При этом чем больше будут данные пропуски, тем ниже будет сигнал по отношению к тому, который получился в ОЭП. Также видно, что чем меньше пиксель ФПУ и больше ширина полосы захвата ОЭА, тем значительнее будет влияние данных пропусков на яркостную верность изображения.

В чём-то аналогичное влияние на формирование изображения и его сэмпинга при восстановлении из кодов яркости может порождаться отсутствием контроля и парирования отклонений в векторах возмущающих ускорений, например, вынужденных колебаний осей МКА, возникающих из-за парирования возмущений в других параметрах траектории оси в пространстве, например, в ориентации и угловых скоростях. Эти отклонения могут привести к значительному изменению вектора углового ускорения ПУД осей МКА на интервале времени формирования условного кадра и всего маршрута съёмки. При определённом соотношении периода такого изменения углового ускорения к интервалу времени формирования сигнала на ФЧЭ ФПЗС (времени накопления на элементе) на строчных и кадровых изображениях, могут образоваться смещения и наложения, коррекция которых резко ухудшит С/Ш на выходе ФПУ, а также контраст растрового изображения и другие его качества. Для снижения его влияния в составе СОС МКА используют, например, измерение ускорения вращения [23].

Следует отметить, что анализ и разделение разнородных «смазов», сдвигов и других искажений элементов изображения и внутренней геометрии снимка по их происхождению, т. е. от движений МКА или от функционирования ОЭА, является сложной научно-технической задачей. Это особенно актуально для цветных синтезированных изображений,

в частности байеровским в комбинации RGGGB или аналогичных, которые в космическом ДЗЗ практически не применяются из-за особенностей подстилающей поверхности, прохождения света в атмосфере Земли, необходимости дебайеризации устранения муара с неизбежной потерей деталей и контуров [40]. Поэтому при разработке НКУ, БКУ и НСК МКА должны быть приняты необходимые меры, включая подробное и высокоточное математическое моделирование, которые позволили бы адекватно выделить влияние, как систем и конструкции МКА, так и ОЭА, а также бортовой и наземной обработки бортовой целевой информации.

Именно достаточно высокая согласованность работы перечисленных систем космического комплекса ДЗЗ с использованием орбитальной оптико-электронной съёмки бортовой ОЭА МКА может обеспечить получение изображений Земли с разрешением значительно лучше 1 м, которые при дешифрировании могут позволить получать соответствующее им линейное разрешение на местности [1, 18, 20].

Оценки качества изображения покровов Земли при орбитальной съёмке

В 2000 г. в [18] впервые опубликован подход к апостериорной оценке ЛРМ космоснимков на основе требуемой вероятности обнаружения шпальной миры. Как указано в данной публикации, ЛРМ ΔL оптико-электронных систем при заданном контрасте k_t определяется из уравнения:

$$P(\Delta L, k_t) = P_0,$$

где $P(\Delta L, k_t)$ – вероятность обнаружения миры на поверхности Земли в зависимости от ширины шпалы и контраста; P_0 – требуемая вероятность обнаружения.

Приведённая формула оценки разрешения либо вовсе не учитывает «смазы» изображения, либо учитывает крайне опосредованно, через некую, задаваемую безотносительно конкретного изображения, вероятность обнаружения или распознавания. При этом вероятность обнаружения или распознавания являются весьма субъективными данными по определению, даже если они относятся к автоматическим машинным способам решения указанных задач, а не к человеко-машинным системам.

Позднее были введены в действие Федеральный закон от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений в Российской Федерации» [5], ГОСТы, МИ, РМГ [41 – 45], которые необходимо использовать при разработке методик для проведения измерений по космическим снимкам и их верификации.

Для апостериорных оценок ЛРМ имеются и другие методики. В [20] указано, что, исходя из общего теоретического подхода к дешифрированию, линейное разрешение снимка соответствует решению уравнения:

$$\Delta S / S_p = \psi_{\text{пор}} \times v \times d / \xi \times T(v),$$

где: ΔS – разность экспозиций фотоприёмного устройства от шпалы миры и промежутка на нулевой частоте $v = 0$; S_p – чувствительность канала, т. е. пороговое значение сигнала, соответствующее уровню шума; d – линейный размер ФЧЭ; $T(v)$ – результирующая (общая) функция передачи модуляции канала формирования изображения; ξ – коэффициент интегрирования глаза; $\psi_{\text{пор}}$ – пороговое отношение сигнала к шуму.

В данном подходе «смазы», физическая расфокусировка и другое учитывается через результирующую ФПМ $T(v)$.

В отечественных публикациях [1, 22, 25] также имеются подобные математические модели для приближённой оценки линейного разрешения на местности.

Например, в [24] при определении апостериорного ЛРМ снимка по изображению секторной радиальной миры приводится соотношение:

$$L_{\text{ЛРМ}} = \left(\frac{r_\gamma}{R_m}\right) \times d_m,$$

где r_γ – радиус пятна размытия в центре миры; R_m – полный наблюдаемый на изображении диаметр (или радиус) миры; d_m – фактическая длина основания сектора миры.

Т. е., по данному критерию ЛРМ напрямую практически не зависит от пространственных частот снимка и аналогичных параметров. Однако в [24] также рассматривается определение функции рассеяния линии (ФРЛ) по резкому краю и восстановлению по ней ФПМ, показан способ инструментального определения ЛРМ и сопутствующих характеристик данной съёмки. В частности, приведено следующее его описание.

Порядок инструментальной оценки пространственно-частотных характеристик может предполагать последовательное выполнение следующих операций, подобных тем, что указаны в [1, 2]:

- определение функции передачи модуляции;
- определение светосигнальной характеристики;
- определение шумовой характеристики;
- оценка разрешающей способности в фокальной плоскости;

- оценка линейного разрешения растрового изображения Земли;

- оценка линейного разрешения на местности.

Форма ФПМ восстанавливается по форме «резкого края» (переходной характеристике). По ФРЛ рассчитывается функция передачи модуляции. Разрешающая способность ЦА КК ДЗЗ определяется как точка пересечения ФПМ и некоторой пороговой характеристики, наклон которой зависит от уровня шума изображения, заданного контраста и других характеристик ЦА.

Возможно, в дополнение к данным подходам именно для визуальных оценок качества произведённой космосьёмки Земли следует рассмотреть, например, применение критерия Шаде [38] для оценки пространственного разрешения изображения. О. Шаде ввёл понятие «эквивалентного числа строк» (NE), определяемого как квадрат площади под кривой ЧКХ (ФПМ). Величина NE является хорошей количественной характеристикой визуально воспринимаемой чёткости изображения, от которой, кроме прочего, во многом зависит его распознаваемость, а также верность цифровых коррекций резкости при обработке растровых изображений.

Также для оценки реальной резкости изображения часто используется такой параметр, как «глубина модуляции сигнала на частоте максимального разрешения», равный отношению размахов сигналов от штриховых мир с числом штрихов, равным максимальному разрешению и с минимальным числом штрихов (крупная деталь изображения). Такие числовые оценки, возможно, позволят лучше определять разрешение изображений земной поверхности, полученных в результате космической съёмки при влиянии атмосферы Земли.

В качестве оценок апостериорного ЛРМ и эффективности данного критерия оценки качества изображений Земли, полученных в результате аэрокосмических съёмок, помимо национальной шкалы дешифрирования США [2], имеется также множество других способов интерпретации и распознавания по аэрокосмическим изображениям, например, комплексный подход, представленный в [24].

Имеются и другие подходы к числовым оценкам ЛРМ, например, статистический [1] и т. п. Однако их верность (достоверность или другие характеристики) и эффективность следует проверять с помощью соответствующих экспериментальных работ и на основе верификации и валидации финальных растров стандартных продуктов цифровой обработки изображения.

Заключение

На основе рассмотренных в статье материалов можно сделать следующие выводы.

Во-первых, исходя из особенностей орбитальной съёмки вращающейся поверхности эллиптической орбиты Земли, управление движением осей МКА и его съёмочной ОЭА должно производиться с учётом фотограмметрического фокусного расстояния и топологии расположения фотоприёмников на фокальных поверхностях конструкции данной ОЭА.

Во-вторых, даже если съёмочная ОЭА и МКА, как служебная платформа, точно отработают при съёмке все заданные режимы и «идеальная» ОЭА не внесёт своего влияния в ухудшение изображения, сформированного её объективом дифракционного качества, тем не менее, за счёт «неправильной» кинематики съёмки Земли и дальнейшей обработки сигнала, зарегистрированного ФПУ, может получиться растровое изображение покровов Земли значительно хуже теоретически обеспечиваемого отдельными параметрами ОЭА.

Учитывая изложенное, авторы предлагают классифицировать основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при съёмке с МКА, на статические, кинематические и динамические. Основываясь на данной классификации, можно утверждать, что наилучшее качество изображения Земли, достижимое при применении данного конкретного МКА, будет определяться статическими параметрами его съёмочной аппаратуры, факторами орбитальной съёмки и её геометрическими и радиометрическими условиями.

Литература

- Еремеев В. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под редакцией В. В. Еремеева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.
- Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с. – 32 с цв. вкл.
- Хартов В. В., Ефанов В. В., Занин К. А. Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов: Учебное пособие. – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – 132 с. : с ил.
- Меньшиков В. А., Перминов А. Н., Рембеза А. И., Урличич Ю. М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. – М. : Машиностроение, 2014. – 706 с.
- Федеральный закон от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ Об обеспечении единства измерений в Российской Федерации.
- ГОСТ 24346-80. Межгосударственный стандарт. Выбор. Термины и определения.
- John A. Richards, Xiuping Jia. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 4th Edition With 197 Figures. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006 Printed in Germany.
- K. Jacobsen. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation jacobsen@ipi.uni-hannover.de. Commission I, WG I/4.
- Каргу Л. И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов / Л. И. Каргу. – М. : Машиностроение, 1980. – 172 с. : ил.
- Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. [и др.] / Под редакцией А. С. Сырова. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие / А. Г. Бровкин. – М. : МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с. : ил.
- Батраков А. С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига изображения при съемке земной поверхности // Исследование Земли из космоса. – 1989. – № 4. – С. 99 – 106.
- Бутырин С. А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съёмке Земли // Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т. 9. – № 3.
- Сомов Е. И. Аналитический синтез законов гиросилового наведения космических аппаратов информационного назначения // Сб. материалов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам / Концерн «ЦНИИ Электроприбор». – Санкт-Петербург, 2007. – С. 90 – 92.
- Сомов Е. И. [и др.] Гиросиловое наведение спутника при площадном землеобзоре на основе последовательности маршрутов сканирующей съёмки // Сб. материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам / Концерн «ЦНИИ Электроприбор». – Санкт-Петербург, 2011. – С. 267 – 276.
- Somov S. et all. Optimizing the Guidance and Control Laws at the Space Optoelectronic Observation: Proceedings of 18th IFAC World Congress, 2011. Режим доступа: <http://ifacpapersonline.net/Detailed/48161.html>, p. 2078 – 2083.
- Robert D. Fiete, Bradley D. Paul. Modeling the optical transfer function in the imaging chain. Optical Engineering 53(8), 083103 (August 2014).
- Блажевич С. В., Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н., Жилёв М. Ю. Цифровая коррекция возмущений в изображениях, формируемых панхроматической оптико-электронной съёмочной аппаратурой космического аппарата «Монитор» // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011».
- Винтаев В. Н., Жилёв М. Ю., Маторин С. И., Ушакова Н. Н. Техника формирования и коррекции резкости космических изображений высокого разрешения // Научный результат. – 2016. – Т. 1. – № 1(1). – С. 72 – 80. – (Информационные технологии).
- Батраков А. С. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 7. – С. 92 – 97.
- Остриков В. Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке методом слепого поиска / Санкт-Петербургский филиал ОАО «КБ «Луч» // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011».

21. Проектирование оптических систем / Э. Бретенски, Р. Хопкинс, Р. Шеннон и др.; Под редакцией Р. Шеннона, Дж. Вайанта; Пер. с англ. под ред. В. И. Пейсахсона. – М. : Мир, 1983. – 430 с. : ил.
22. Константинов И. С., Щербинина Н. В., Жиленёв М. Ю. [и др.]. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разрешения / И. С. Константинов, Н. В. Щербинина, М. Ю. Жиленев, В. Н. Винтаев, Н. Н. Ушакова // Научные ведомости БГУ. – 2014. – № 8(179). – С. 189 – 200.
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>.
24. Christopher M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning. 2006 Springer Science+Business Media, LLC. (Christopher M. Bishop F.R.Eng. Assistant Director Microsoft Research Ltd Cambridge CB3 0FB, U.K. cmbishop@microsoft.com).
25. Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Ключков И. А. [и др.] Координатно-временная модель формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС / В. Г. Андронов, С. В. Дегтярёв, И. А. Ключков, Ю. Н. Волобуев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 9. – 26. // www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105 – сайт Всемирной метеорологической организации.
27. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#optic – сайт компании «Совзонд».
28. Image Registration: Color Image Synthesis from Data Obtained from Satellites Pushbroom Cameras. Dmitry V. Yurin Laboratory of Mathematical Methods of Image Processing, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, Moscow, Russia.
29. Space Mission Analysis and Design. Edited by Wiley J. Larson *United States, Air Force Academy*, James R. Wertz *Microcosm. Inc.* Published Jointly by *Microcosm. Inc.*, Torrance, California, Kluwer Academic Publishers Dordrecht / Boston/ London. 1992 W.J. Larson and *Microcosm. Inc.* Fifth Printing, 1997.
30. Болсуновский М. А. Уровни обработки данных ДЗЗ сверхвысокого разрешения // Геомагика, 2009. – № 2.
31. Бакланов А. И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 2. – С. 80 – 91.
32. Ott T.¹, Wiedermann G.¹, Crombez V.², Damilano P.² (¹Airbus Defence and Space, Germany. ²Airbus Defence and Space, France). Pointing budgeting using the ESA Pointing Error Engineering Handbook and Tool: benefits and limitations.
33. Пресняков О. А. Система структурного восстановления и геометрической обработки космических изображений от видеодатчиков сканового принципа действия. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. РГРГУ, Рязань, 2007.
34. Демин А. В., Денисов А. В., Перл И. А., Третьякова А. А. Оптико-электронный комплекс повышенной производительности // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 3 (73).
35. The role of small satellites in NASA and NOAA earth observation programs Committee on Earth Studies Space Studies Board Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications National Research Council NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D. C. Copyright 2000 by the National Academy of Sciences. All rights reserved. Printed in the United States of America.
36. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга: Учебное пособие. М. : «БИНОМ» Лаборатория знаний, 2009. – 234 с. : ил.
37. Brian Howley. Overview of a spacecraft attitude determination and control. Lockheed Martin Space System Company. [http://edge.rit.edu/edge/P07106/public/Docs/Research/LM Attitude Determination Control.pdf](http://edge.rit.edu/edge/P07106/public/Docs/Research/LM%20Attitude%20Determination%20Control.pdf).
38. Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы оптоэлектроники: учебное пособие. – М. : МИИГАиК, 2014. – 82 с. : ил. (Электронная версия учебного пособия размещена на сайте библиотеки МИИГАиК: <http://library.miigaik.ru>).
39. Takanory Iwata ... On Orbit Calibration Star Tracker for Advanced Land Observing Satellite (ALOS).
40. Хмелевский С. И. Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. Критерии сравнения и оценки // Геопрофи. – 2011. – № 1.
41. ГОСТ Р 8.818-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения.
42. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины.
43. МИ 1317-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
44. МИ 1730-87. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности косвенных измерений характеристик процессов. Методы расчёта.
45. МИ 2083-90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
46. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учебное пособие. – М. : Логос, 2001. – 264 с.: ил.

Поступила в редакцию 27.11.2017

Леонид Алексеевич Макриденко, доктор технических наук генеральный директор, т. (495) 365-56-10.
Сергей Николаевич Волков, доктор технических наук, 1-й заместитель генерального директора, т. (495) 366-42-56.
 E-mail: vniiem@orc.ru.
Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 365-26-69.
Михаил Юрьевич Жиленёв, старший научный сотрудник, т. (495) 366-71-89.
Сергей Геннадьевич Казанцев, доктор технических наук, начальник отдела, т. (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.
 (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

MAIN SOURCES OF DECREASE IN THE QUALITY OF EARTH IMAGES TAKEN DURING THE ON-ORBIT IMAGING AND DOWNLINKED FROM A SMALL SATELLITE

L. A. Makridenko, S. N. Volkov, V. Ia. Gecha,
M. Iu. Zhilenev, S. G. Kazantsev

The article describes the main processes of Earth imaging performed using the on-board optoelectronic imaging equipment of a small satellite including its functioning and impact of the small satellite axes motion control system during the imaging of specified routes. It is demonstrated that small satellite motion parameters have a significant impact on images taken by photodetectors. Considering the parameters of these motions it is suggested dividing them in accordance with their sources into static, kinematic and dynamic. This formalization of impact sources and their manifestations allows structuring the task of numerical evaluation of space imaging results by assigning a certain image quality level to them and to define the analysis methods of the relevant level of complexity.

Key words: space systems for high-resolution Earth observation, linear ground resolution, modulation transfer function, image motion rate vector, optoelectronic equipment focal plane topology, making of a stripe using microframes, imaging route, conditional frame.

List of References

1. Ereemeev V. V. Modern technologies of Earth remote sensing data processing / Edited by V.V. Ereemeev. – Moscow : Publishing House of Physico-Mathematical Literature, 2015. – 460 p.
2. Shovengerdt R. A. Remote sensing. Methods and models of image processing / R. A. Shovengerdt. – Moscow : Technosphaera, 2010. – 560 p. – with 32 color inserts.
3. Khartov V. V., Efanov V. V., Zanin K. A. Basis of design of orbital optoelectronic systems: Textbook. Moscow : MAI-PRINT Publishing House, 2011. – 132 p. : with figures.
4. Menshikov V. A., Perminov A. N., Rembeza A. I., Urlichich Iu.M. Basis of analysis and design of space systems for monitoring and forecasting of environmental and technological disasters. – Moscow : Machine building, 2014. – 706 p.
5. Federal law No. 102-ФЗ dated 26.06.2008 «On ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation».
6. GOST 24346-80. Interstate standard. Vibration. Terms and definitions.
7. John A. Richards, Xiuping Jia. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 4th Edition With 197 Figures. – © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006 Printed in Germany.
8. Jacobsen K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation. – jacobsen@ipi.uni-hannover.de. Commission I, WG I/4.
9. Kargu L. I. Angular stabilization systems of spacecraft / L. I. Kargu. – Moscow : Machine building, 1980. – 172 p. : with figures.
10. Brovkin A.G., Burdygov B. G., Gordiiko S. V. [et al.] / Edited by A. S. Syrov. Satellite on-board control systems. Textbook / Brovkin A.G. – Moscow : MAI-PRINT Publishing House, 2010. – 304 p. : with figures.
11. Batrakov A. S. General model for calculation and analysis of image shift rate during Earth surface imaging // Earth exploration from space. – 1989.– No. 4.– Pp. 99 – 106.
12. Butyrin S. A. Kinematic synthesis of programmed angular motion of spacecraft during optoelectronic Earth imaging // Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2007. – Vol. 9. – No. 3.
13. Somov E. I. Analytical synthesis of laws of information satellites gyroforce pointing. – Proceedings of XIVth Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems / Concern CSRI Elektropribor, JSC. – Saint-Petersburg, 2007. – Pp. 90 – 92.
14. Somov E. I. [et al.] Satellite gyroforce pointing during areal ground survey on the basis of sequence of scanning imaging routes. – Proceedings of XVIIIth Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems / Concern CSRI Elektropribor, JSC. – Saint-Petersburg, 2011. – Pp. 267 – 276.
15. Somov S. et al. Optimizing the Guidance and Control Laws at the Space Optoelectronic Observation: Proceedings of 18th IFAC World Congress, 2011. Available at: <http://ifacpapersonline.net/Detailed/48161.html>. – Pp. 2078 – 2083.
16. Robert D. Fiete, Bradley D. Paul. Modeling the optical transfer function in the imaging chain. Optical Engineering 53(8), 083103 (August 2014).
17. Blazhevich S. V., Vintaev V. N., Ushakova N. N., Zhilenev M.Iu. Digital correction of disturbances in images taken with panchromatic optoelectronic imaging equipment of Monitor satellite // Proceedings of Scientific and Technical Conference 'Computer Vision in Control Systems 2011'.
18. Vintaev V. N., Zhilenev M. Iu., Matorin S. I., Ushakova N. N. Technique of generation and correction of sharpness of high-resolution space images. Scientific result. – 2016. – Vol. 1. – No. 1(1). – Pp. 72 – 80. – (Information technologies).
19. Batrakov A. S. Mathematical model for forecasting linear resolution of space optoelectronic systems for remote sensing // Journal of Optical Technology. – 2000. – Vol. 67. – No. 7. – Pp. 92 – 97.
20. Ostrikov V. N. Evaluation of point spread function on a random image using the blind search method. St. Petersburg Branch of Design Bureau «Lutch» // Proceedings of Scientific and Technical Conference «Computer Vision in Control Systems 2011».
21. 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. – 430 p. : with figures.

22. Konstantinov I. S., Shcherbinina N. V., Zhilenev M. Iu. [et al.]. Adaptive correction of process of restoring the sharpness of high-resolution space images / I. S. Konstantinov, N. V. Shcherbinina, M. Iu. Zhilenev, V. N. Vintaev, N. N. Ushakova // Scientific Journal of Belgorod National Research University. – 2014. – No. 8(179). – Pp. 189 – 200.
23. [Electronic resource]. – Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>.
24. Christopher M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning. 2006 Springer Science+Business Media, LLC. (Christopher M. Bishop F.R.Eng. Assistant Director Microsoft Research Ltd Cambridge CB3 0FB, U.K. cmbishop@microsoft.com).
25. Andronov V. G., Degtiarev S. V., Klochkov I. A. [et al.] Coordinate and time model of generation of space scanner images by CCD lines / V. G. Andronov, S. V. Degtiarev, I. A. Klochkov, Iu. N. Volobuev // Journal of Instrument Engineering. – 2011. – Vol. 54. – No. 9.
26. //www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105 – website of the World Meteorological Organization.
27. [Electronic resource]. – Available at: sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#optic – website of Sovzond Company.
28. Image Registration: Color Image Synthesis from Data Obtained from Satellites Pushbroom Cameras. Dmitry V. Yurin, Laboratory of Mathematical Methods of Image Processing, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, Moscow, Russia.
29. Space Mission Analysis and Design. Edited by Wiley J. Larson *United States, Air Force Academy*, James R. Wertz *Microcosm. Inc.* Published Jointly by *Microcosm. Inc.*, Torrance, California, Kluwer Academic Publishers Dordrecht / Boston/ London. 1992 W. J. Larson and *Microcosm. Inc.* Fifth Printing, 1997.
30. Bolsunovskii M. A. Levels of super-resolution ERS data processing // *Geomatics*, 2009. – No. 2.
31. Baklanov A. I. Analysis of state and trends of development of high- and super-resolution observation systems // *Bulletin of Samara State Aerospace University*. – 2010. – No. 2. – Pp. 80 – 91.
32. Ott T.¹, Wiedermann G.¹, Crombez V.², Damilano P.² (¹Airbus Defence and Space, Germany. ²Airbus Defence and Space, France). Pointing budgeting using the ESA Pointing Error Engineering Handbook and Tool: benefits and limitations.
33. Presniakov O. A. System of structural restoration and geometric processing of space images received from video sensors with the scanning principle of operation. Synopsis of a thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph. D.). Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, 2007.
34. Demin A. V., Denisov A. V., Perl I. A., Tretiakova A. A. Optoelectronic system of increased capacity. *Scientific and Technical Journal of Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011. – No. 3 (73).
35. The role of small satellites in NASA and NOAA earth observation programs. Committee on Earth Studies. Space Studies Board Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications. National Research Council. NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D. C. Copyright 2000 by the National Academy of Sciences. All rights reserved. Printed in the United States of America.
36. Baklanov A. I. Observation and monitoring systems. Textbook. Moscow : 'BINOM. Knowledge Laboratory' Publishing House, 2009. – 234 p. : with figures.
37. Brian Howley. Overview of a spacecraft attitude determination and control. Lockheed Martin, Space System Company. <http://edge.rit.edu/edge/P07106/public/Docs/Research/LM Attitude Determination Control.pdf>.
38. Tarasov V. V., Torshina I. P., Iakushenko Iu. G. Modern problems of optical equipment. Textbook. – Moscow : Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2014.– 82 p. : with figures. The electronic version of the textbook is available on the website of the Moscow State University of Geodesy and Cartography: <http://library.miigaik.ru>.
39. Takanory Iwata ... On Orbit Calibration Star Tracker for Advanced Land Observing Satellite (ALOS).
40. Khmelevskii S. I. Trends of development of digital aerial imaging systems. Criteria of comparison and evaluation // «Geoprofi» Journal. – 2011. – No. 1.
41. GOST R 8.818-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Virtual measuring instruments and virtual measuring systems. General principles.
42. RMG 29-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions.
43. MI 1317-2004. State system for ensuring the uniformity of measurements. Results and characteristics of measurement error. Representation forms. Methods of application during the tests of product specimens and monitoring of their parameters.
44. MI 1730-87. Methodological regulations. State system for ensuring the uniformity of measurements. Errors of indirect measurements of processes characteristics. Calculation methods.
45. MI 2083-90. Recommendation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Indirect measurements. Determination of measurement results and evaluation of measurement errors.
46. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. Earth remote sensing from space. Digital image processing : Textbook. – Moscow : «Logos» Publishing Group, 2001. – 264 p.: with figures.

Leonid Alekseevich Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Director General, tel.: (495) 365-56-10.
Sergei Nikolaevich Volkov, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), First Deputy Director General, tel.: (495) 366-42-56.
Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Deputy Director General, tel.: (495) 365-26-69.
Mikhail Iurevich Zhilenev, Senior Researcher, tel.: (495) 366-71-89.
Sergei Gennadevich Kazantsev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department, tel.: (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.
(JC «VNIEM Corporation»).