

ОБЗОР СРЕДСТВ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СПУТНИКОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

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

Рассматривается использование оценки нескольких отдельных и ключевых показателей качества спутникового оптического изображения Земли: отношения сигнал/шум, суммарной функции передачи модуляции и Image Quality Factor – фактора качества изображения, вычисляемого по ним. При этом рассматриваются возможности использования указанных оценок оптического наблюдения на борту космического аппарата, в том числе в целях управления им. Причем, за основу выбранного подхода принято то, что функция передачи модуляции спутникового изображения Земли в значительной степени зависит от согласованности скорости его движения по приемникам излучения в спутниковой оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли и во многом определяется соответствующими параметрами отрабатываемого кинематического закона движения осей космического аппарата с данной аппаратурой и динамики его конструкции при орбитальной съемке Земли.

Соответственно, здесь приведены математические выражения и анализ обобщенной оценки компонент Image Quality Factor на выходе оптико-электронной аппаратуры зондирования Земли при орбитальной съемке. Кроме того, даны ссылки на разные методы анализа, отождествления и измерений изображения, и на существующее наземное оборудование, которое позволяет высокоточно измерять функцию передачи модуляции изображения оптико-электронных систем.

Далее на основании выводов о необходимости знания влияния скорости движения изображения в оптико-электронной аппаратуре при наличии вибрации конструкции во время орбитальной съемки Земли и о достаточности существующих математических и приборных средств для таких измерений непосредственно по полученному изображению, делается вывод о возможности проектирования и создания для оптических космических аппаратов таких приборов, которые могут высокоточно выполнять функции измерений изображения, в том числе в целях решения задач управления космического аппарата во время съемки Земли его съемочной оптико-электронной аппаратурой дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, отношение сигнал/шум, функция передачи модуляции, сквозной информационный тракт, Image Quality Factor, фактор качества изображения, пространственная частота, дистанционное зондирование Земли.

Image Quality Factor как один из применяемых методов оценки качества спутниковых изображений Земли

В описаниях изображений поверхности Земли (спутниковых «снимков» – данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)) для пользователей космических систем (КС) SPOT и Pleiades [1, 2] используется понятие Image Quality Factor (IQF), а в аналогичных документах [3 – 6] для космических аппаратов (КА) разных стран производства приведены обе его составляющие для оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) ДЗЗ. Причем IQF можно считать комплексной объективной оценкой качества изображения, которая может быть определена по функции передачи модуляции (ФПМ) и отношения сигнал/шум (С/Ш), измеренным на растровом изображении, в том числе автоматическими, машинными способами [7 – 10]. Поэтому ввиду практического отсутствия субъективной роли человека-оператора подход с IQF дает некоторое преимущество в объективности и скорости оценки качеств изображения сравнительно с визуально-экспертным методом, а при высокоточных калибровках всех составляющих сквозного информационного тракта (СИТ) космического комплекса (КК) ДЗЗ также – в определенной мере

уменьшается использование вероятностных показателей распознавания и идентификации снятых сущностей на местности (объектов, их теней, бликов) по изображениям, полученным с КА, оборудованных ОЭА ДЗЗ. В частности, для оценки качества изображения можно использовать критериальные оценки допустимых ФПМ, С/Ш, IQF на соответствующей пространственной частоте, с учетом критериев Шаде, ФПМ на сюжетно важном интервале частот, Санаяги, Линфута, Джонсона и других [7 – 11]. В [1 – 3] для определенного круга пользователей указывается ещё и оценка дешифрируемости снимков этих КС по национальной шкале NIIRS (США), которая содержит многократно большее число показателей. Целесообразность ее использования при оценке качества изображений на борту КА здесь не рассматривается.

Обобщенность и удобство использования показателя IQF заключается в том, что по определению он является произведением аппаратного С/Ш на произведение всех тех ФПМ, которые влияют на получение и преобразование излучения от Земли в оптическом диапазоне в сигнал изображения на выходе фотоприемного устройства (ФПУ) ОЭА ДЗЗ и оценивается выражением [1, 2]:

$$IQF(\nu) = SNR(\nu)T_{СИТ}(\nu), \quad (1)$$

где $SNR(v)$ – аппаратное отношение С/Ш на выходе ОЭА (Signal-to-Noise Ratio); $T_{СИТ}(v)$ – суммарная ФПМ СИТ ОЭА ДЗЗ и бортовых средств обработки изображения на КА; v – пространственная частота.

Известно, что при формировании изображения оптико-электронным преобразователем (ОЭП) в ОЭА всегда имеется текущая шумовая составляющая, которая является суммарным влиянием множества аддитивных и мультипликативных шумов от различных источников, в том числе пропорциональных времени накопления сигнала фотоприемным устройством. Так как для ОЭА ДЗЗ источники шумов хорошо изучены и изложены, например, в [6, 15 – 17], то данные составляющие в настоящей статье не акцентируются. При этом рассматриваются отдельные важные моменты формирования сигнала движущегося изображения по полю фокальной плоскости (ФП) такой ОЭА, которой оснащаются КА.

Оценивание снижения отношения сигнал/шум в съёмочной оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли и его снижения по полю фокальной плоскости при спутниковой съёмке

Отношение С/Ш в оптической системе (ОС) снижается пропорционально углу поля, если неизменен шум в центре поля и на его краях. Согласно [12, 13] это можно представить в виде энергетической освещенности в ОС. Причем при наличии виньетирования она убывает от центра к краю ФП пропорционально 4-й степени косинуса угла направления излучения относительно нормали к освещаемой площадке:

$$E_e = K_\beta E_{e0} \cos^4(\varepsilon) \quad (2)$$

где K_β – коэффициент виньетирования (от полевого угла β), величина которого в значительной степени зависит от конструкции оптической схемы (зеркальной, линзовой, зеркально-линзовой) и компонент объектива ОС и может составлять от нескольких до десятков процентов, особенно, у неспециальных для спутникового ДЗЗ объективов; E_{e0} – освещенность в центре площадки; ε – угол направления излучения относительно нормали к освещаемой площадке (фокальной плоскости).

Также следует учесть светосигнальную характеристику ФПУ и блюминг или наличие антиблюминга у ФПУ, а также неоднородность выходного сигнала [14], филл-фактор (fill factor – заполнение диском Эйри фотозоны пикселя ФПУ), ряд спектральных и других параметров согласования съёмочной ОЭА для космического ДЗЗ.

Кроме оценки статической составляющей С/Ш для ОЭА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения следует учесть использование ФПУ на базе фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС) с режимами временной задержки и накопления (ВЗН) для повышения сигнала [1 – 5, 16, 24 – 26, 28 – 31] и его возможное снижение в части накапливаемого сигнала из-за влияния колебаний (вибрации) на соответствующих частотах относительно частоты считывания сигнала изображения средствами ФПУ [18]. Рассмотрим данные аспекты.

При использовании матриц ФПЗС с режимом ВЗН в канале ОЭА ДЗЗ величина аппаратного отношения С/Ш зависит от числа каскадов (шагов) накопления, то есть от суммарного времени накопления:

$$SNR_{v=0}(v) = \Delta E(\Delta\lambda)_{v=0} N_{ВЗН} / \sigma(\Delta\lambda)_{\Sigma, j}, \quad (3)$$

где $\Delta E(\Delta\lambda)_{v=0}$ – разность экспозиций, например, от штриха миры (тест-объекта) и от промежутка (фона) между штрихами (штрих и фон попали на один пиксел ФПУ) в количестве сигнальных электронов; $N_{ВЗН}$ – число каскадов (шагов) накопления ФПЗС при съёмке с режимом ВЗН; $\sigma(\Delta\lambda)_{\Sigma, j}$ – среднее квадратическое отклонение (СКО) суммарной шумовой составляющей пикселя (элемента разрешения) ФПУ, выраженное в электронах; $j = 1, \dots, N_{ВЗН}$ – текущее количество шагов накопления; $\Delta\lambda$ – спектральный диапазон фотоприемника с его светофильтром на заданном уровне от максимального значения чувствительности. При этом следует учитывать, что при режиме ВЗН за счет некогерентного шума фотонов, которые попали на ФПЗС, на каждом единичном каскаде накопления шумы будут в $\sqrt{N_{ВЗН}}$ раз меньше, чем тогда, когда используются линейные или матричные кадровые ФПЗС с тем же значением экспозиции [17].

При ФПУ ОЭА на базе комплементарных (структур) металл-окисел-полупроводников (КМОП) помимо фотонного шума и разных по площади шумов темнового тока, следует учесть еще и специфичные для них шумы [16], перекрестные помехи, неравномерный по полю антиблюминг (характеризуется коэффициентом пересвета пикселей) при его наличии. Кроме того, если в ОЭА использовать КМОП без глобального затвора, то изображения движущихся объектов геометрически искажаются, ухудшается ФПМ, что требует коррекций.

Ниже, в основном, рассматривается метрическая съёмочная ОЭА на базе ФПЗС с ВЗН, как наиболее используемая при космической съёмке Земли в интересах количественного ДЗЗ

[1 – 5, 8, 16, 24 – 26, 28 – 31], то есть получения спутниковых мультиспектральных снимков, а по ним – достоверных спектральных сигнатур объектов, индексов вегетации, других биофизических и биохимических характеристик местности, стандартного цветосинтеза в True Color Composite, False Color Composite, PanSharpening и других [8].

С позиции процесса накопления сигнала изображения, очевидно, что чем выше скорость относительного перемещения снимаемого объекта, тем меньше будет его яркость, зарегистрированная ФПУ. Исходя из этого, чтобы учесть действие вибрации конструкции КА на формируемое изображение в его ОЭА ДЗЗ в [18], предложено ниже следующее распределение экспозиции, определяемое освещенностью, накопленной ФПУ за n -ый кадр, например, при съемке ОЭА с кадровым ФПУ без ВЗН [18]:

$$H(nT_{TV}) = k_1 \frac{R}{2} \left(\sin \left(\frac{2\pi}{T_0} (n+1) T_{TV} \right) - \sin \left(\frac{2\pi}{T_0} n T_{TV} \right) \right) - k_2 \frac{\pi R^2}{T_0} \frac{2\pi}{T_0} T_{TV} - k_2 \frac{\pi}{T_0} \left(\frac{R^2}{8} \sin \left(\frac{4\pi}{T_0} (n+1) T_{TV} \right) - \frac{R^2}{8} \sin \left(\frac{4\pi}{T_0} n T_{TV} \right) \right), \quad (4)$$

где H – энергетическая (сферическая) экспозиция фотоприемника оптической системой; R – размах колебаний (вибрации), принятый равным удвоенной амплитуде; T_{TV} – время накопления на матрице ФПУ; k_1 – коэффициент, характеризующий освещенность в статическом положении тест-объекта; k_2 – коэффициент, характеризующий вклад скорости в итоговую освещенность; n – количество циклов накопления сигнала изображения;

$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0}$ – период гармонической вибрации.

Выражение (4) позволяет предусмотреть и использовать стробоскопический эффект для измерений влияния вибрации на формируемое изображение в ОЭА [18].

При ВЗН размах колебаний R можно рассматривать только в пределах одного интервала времени накопления сигнала $\tau_{\text{нак}}$ и площади ФПУ, которая соответствует заданному числу шагов накопления. Тогда $T_{TV} = \tau_{\text{нак}}$, $n = 1$, облученная площадь $N_{\text{ВЗН}} M_{\text{строк}}$, а остальное в (4) не меняется. На одномерной линейке ФПЗС $M_{\text{строк}} = 1$.

Оценивание снижения функции передачи модуляции изображения в оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли при космической съемке Земли

Известно, суммарная ФПМ СИТ канала ОЭА ДЗЗ описывается формулой [6 – 8, 11]:

$$T_{\text{СИТ}}(v) = \prod_1^n T_j(v), \quad (5)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$ – количество j -ых составляющих (звеньев) СИТ, от объекта наблюдения до дисплея, на котором оператором анализируется изображение, полученное после обработки, либо до алгоритма машинного дешифрирования (классификации) полученных цифровых растровых изображений.

Схема рассматриваемой в данной статье части СИТ представлена на рис. 1. Причем ФПМ его отдельных звеньев должны предоставляться, например, разработчиками ОЭА ДЗЗ или ее основных частей. ОЭП, кроме ФПУ, также включает в себя набор различных электронных устройств (АЦП и прочее), ФПМ которого также необходимо учитывать. Также следует учитывать ФПМ преобразования изображения бортовыми средствами до выдачи в высокоскоростную радиолинию, которое возможно различными методами.

Определение ФПМ должно производиться на рассматриваемой полосе пространственных частот. Нижним пределом пространственной частоты является 0 лин/мм, то есть соответствует нулевому контрасту изображения в данном канале ОЭА и обозначается v_{min} . Верхним пределом пространственной частоты (ограничивающейся значением max предела полосы пропускания «справа») при вычислении ФПМ является пространственная частота среза v_{max} , которая вычисляется по формуле [13, 14]:

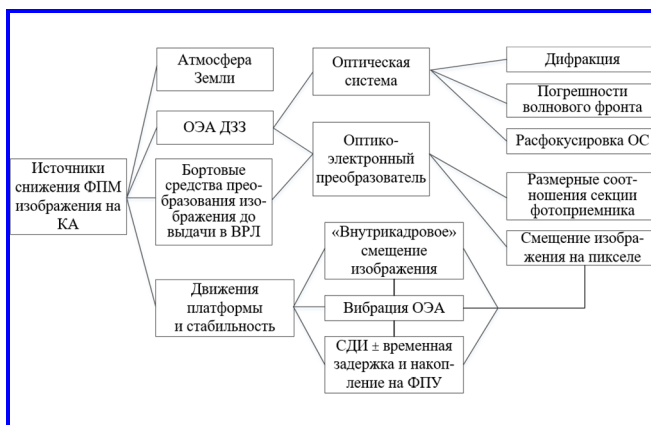


Рис. 1. Схема источников снижения ФПМ изображения Земли в ОЭА ДЗЗ космического аппарата

$$v_{\max} = \frac{D_{\text{вх}}}{\lambda_{\text{п.края}} F_{\text{об}}}, \quad (6)$$

где $D_{\text{вх}}$ – диаметр входной апертуры; $\lambda_{\text{п.края}}$ – длина волны правого края спектрального диапазона, пропускаемого каналом ОЭА с согласованным ФПУ; $F_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива ОС.

Так как съемка Земли с КА производится через атмосферу, необходимо точно учитывать ФПМ из-за ее турбулентности и влияния аэрозолей, имея ввиду, что солнечное излучение попадает в целевую аппаратуру КА, пройдя атмосферу Земли дважды с рассеянием и поглощением [6]:

$$T_{\text{турб}}(v) = \exp\left[-57,3v^3 C_n^2 \lambda^{-\frac{1}{3}} R_a \left[1 - \left(\frac{\lambda v}{D_{\text{вх}}}\right)^{1/3}\right]\right], \quad (7)$$

$$T_{\text{аэроз}}(v) = \begin{cases} \exp[-A_a R_a - S_a R_a (v - v_{\max})^2], & \text{при } v \leq v_{\max}; \\ \exp[-(A_a + S_a) R_a], & \text{при } v > v_{\max}, \end{cases}$$

где C_n^2 – коэффициент отражения атмосферы; λ – длина волны излучения; R_a – расстояние прохождения через атмосферу; A_a и S_a – эффективные адсорбция и рассеяние атмосферы.

Расчет ФПМ радиального распределения энергии из-за снижения облученности от центра к краю ФП канала ОЭА согласно [14] по формуле:

$$T(v)_{\text{ОС, края}} = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta E_i J_0 [2\pi v_i \bar{R}], \quad (8)$$

где $\Delta E_i = E_i - E_{i-1}$ – разность между облученностью ФП в точках i и $i - 1$; $\bar{R} = \frac{1}{2}(R_i - R_{i-1})$ – средний радиус между точками i и $i - 1$. J_0 – функция Бесселя 0-го порядка, 1-го рода.

ФПМ физической расфокусировки объектива вычисляется по формуле [13, 14]:

$$T_{\text{расф}}(v) = \frac{J_1(2\pi\delta N_{\text{об}} v)}{\pi\delta N_{\text{об}} v}, \quad (9)$$

где δ – размер пятна расфокусировки; $N = D_{\text{об}}/F_{\text{об}}$ – относительный размер апертуры; J_1 – функция Бесселя 1-го порядка, 1-го рода.

В случае расчета ФПМ приемника излучения (ПИ) ФПУ для пикселей прямоугольной формы с размерами фоточувствительного слоя $k_x X$ и $k_y Y$, где k_x

и k_y – коэффициенты заполнения фоточувствительным слоем площадки пиксела $X \times Y$ (X и Y – периоды расположения пикселей по осям x и y), может производиться, например, по формуле:

$$T_{\text{ФПУ}}(v) = \text{sinc}(v_x X); \\ \times \text{sinc}[v_x (X - k_x X)] \text{sinc}(v_y Y); \\ \times \text{sinc}[v_y (Y - k_y Y)].$$

Такое представление ФПМ необходимо для расчета прецизионного ФПУ при проектировании ОЭА. Следует учитывать, что различные ПИ имеют разные эффективность переноса и диффузию носителей. Необходимость учета ФПМ данных свойств ПИ зависит от учета их специфических шумов и вклада в общую ФПМ ОЭА ДЗЗ и связана с требованиями к верности ФПМ и С/Ш на ее выходе. Здесь данные ФПМ не рассматриваются, так не рассматривается и выбор типа и вида ФПУ.

Для оценки фактического вклада ФПМ ФПУ в ФПМ ОЭА при одном из методов ее измерений по изображению ее можно представить, как функцию пространственного распределения чувствительности $S(x, y)$ ПИ. Тогда по одному направлению, например, по оси «х» ФПМ фотоприемника можно записать [15]:

$$T_{x, \text{ФПУ}}(v_N) = \frac{S(v_N)}{S|v_0|}, \quad (10)$$

где

$$S(x) = S_0 \text{ при } x_0 + \frac{\Delta x}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{x}{2}; \\ S(0) = 0 \text{ при всех других } x.$$

Причем, $S(x, y)$ важно знать неопределенность относительной спектральной чувствительности. Согласно [20] это же можно сделать аналогичным образом с использованием непосредственно яркостей изображения.

При космической съемке вращающейся Земли с помощью ОЭА ДЗЗ высокого разрешения производится регистрация изображения движущихся покровов Земли и транспорта. Вследствие этого, при линейном перемещении точка изображения за время экспозиции t_e поворачивается и смещается на расстояние $a = vt_e$, где v – скорость движения изображения (СДИ). ФПМ систематического (направленного) «смаза» в таком может быть представлена выражением [13]:

$$T_{im}(v', a) = \frac{\sin[\pi a v' \cos(\alpha - \gamma)]}{\pi a v' \cos(\alpha - \gamma)}, \quad (11)$$

где γ – угол разворота оси дискретного фотоприемника по отношению к вектору СДИ, который при орбитальной съемке может получаться под любым углом к строкам и столбцам (при наличии) дискретного ФПУ.

Кроме того, на суммарную ФПМ оптической системы и ОЭП, включающего в себя ФПУ, может накладываться влияние ФПМ от колебаний конструкции данной ОЭА и КА, относительное действие которого с учетом падения освещенности (3) и его ФПМ с учетом (8) будет максимальным на краю ФП ОЭА. В связи с этим обстоятельством в отдельных руководствах пользователя к спутниковым снимкам указан максимальный возможный уровень влияния высокочастотной вибрации (jitter, vibration), который выражается в долях пиксела ФПУ и дается для продольного (по столбцу) и поперечного направлений его поля в осях ОЭА. Характерные величины в настоящее время составляют от 0,1 до 0,2 пикс ФПУ. Эти данные имеются, в частности, в руководствах пользователя таких космических систем ДЗЗ как SPOT, Pleiades-1A, -1B, KOMPSAT-2 [1 – 3]. Кроме данных о пределе возможного «смаза» изображения от вибрации и пределе его метричности, эти значения можно считать указаниями пользователю снимков данной КС, что с погрешностями лучше данных величин проблематично измерить координаты точек отображенных объектов местности.

Вопросам влияния вибрации на ФПМ изображения посвящено множество исследований на протяжении значительного интервала времени [6, 7, 19 – 23]. Из данных публикаций были выделены ниже следующие основные выражения учета влияния вибрации на формирование изображения в ОЭА ДЗЗ.

При гармонических колебаниях вокруг центра масс КА с ОЭА ДЗЗ, которые окажутся высокочастотными относительно частоты считывания сигнала средствами ФПУ данной ОЭА, ФПМ снижения качества изображения обычно рассчитывается по формуле [6, 13, 19, 23]:

$$T_{\sin \text{края}}(v) = J_0(2\pi a_{\sin} v), \quad (12)$$

где a_{\sin} – амплитуда гармонических колебаний.

А при низкочастотных колебаниях КА вдоль оптической оси и вдоль направления движения проекции ФП ОЭА на Землю снижение ФПМ изображения можно рассчитать по формуле [19, 23]:

$$T_{\sin \text{края}}(v_{\text{пр}}) = \left| \text{sinc}(\pi v d_{\text{лсмаз}}) \right|, \quad (13)$$

где $d_{\text{лсмаз}}$ – диаметр пятна размытия («смаза») изображения. При этом значение диаметра размытия изображения $d_{\text{лсмаз}}$ вычисляется как [19, 23]:

$$d_{\text{лсмаз}} = D_{\text{лф}} \left\{ 1 - \cos \left[\left(\frac{2\pi}{T_0} \right) \left(\frac{\tau_{\text{нак}}}{2} \right) \right] \right\}; \quad (14)$$

$$d_{\text{лсмаз}} = 2D_{\text{лф}} \left\{ \sin \left[\left(\frac{2\pi}{T_0} \right) \left(\frac{\tau_{\text{нак}}}{2} \right) \right] \right\},$$

где $d_{\text{лсмаз}}$ соответствует пиковой (максимальной) амплитуде вибрационных колебаний; $D_{\text{лф}}$ – амплитуда колебаний; T_0 – период колебаний.

При наличии случайной вибрации КА с ОЭА ДЗЗ, например, порожденной более чем тремя векторами дисбалансов сил или моментов, постоянно изменяющимися на соответствующих частотах, или другими источниками (осцилляторами) несинусоидальных колебаний конструкции КА текущая ФПМ снижения качества изображения обычно оценивается по формуле [6, 13, 23]:

$$T_{\text{случ}}(v) = \exp(-2\pi\sigma_R^2 v), \quad (15)$$

где σ_R^2 – среднеквадратическое значение дрожания (вибрации) изображения, которое выражается либо в радианах, если относится к пространству предметов, либо в миллиметрах, если относится к поверхности изображения.

На этом суммарную ФПМ изображения Земли в бортовой части СИТ до преобразований его первичных кодов яркостей можно считать описанной, а далее могут использоваться ФПМ каждого из видов бортовой обработки до направления в бортовую радиолинию КА или в обратную связь.

После определения составляющих IQF изображения в качестве примеров его применения или 2-х его составляющих следует учесть, что для потребителей в космическом ДЗЗ они публикуются в стандартных руководствах пользователя спутниковых снимков тех или других космических комплексов или систем из нескольких КА. В частности, эти характеристики изображений Земли в спутниковой ОЭА ДЗЗ даны для снимков, которые получают посредством таких космических систем как SPOT, Pleiades, KOMPSAT, ALOS, Sentinel-2 и других [1 – 5, 24, 31].

Рассмотрев обе ключевых составляющих IQF, целесообразно их бюджетировать с учетом схем деления КС в части бортовых и наземных средств обработки изображения и соответствующих правил

ГОСТ Р 53802-2010, ГОСТ Р 55976-2014, ГОСТ 24346-80 и других. При этом следует проанализировать разброс данного показателя, который присущ различным КА и КС ДЗЗ.

Чтобы наглядно показать порядок значений указанной величины IQF спутниковых изображений Земли и его применимость, в том числе при выборе параметров космической съемочной ОЭА ДЗЗ данные о С/Ш, ФПМ и IQF, можно представить в виде графика, который показан на рис. 2. При этом можно задаться известными характерными величинами указанных в руководствах пользователя параметров качества изображения, которые взяты из [1 – 5, 31], а для КА «Ресурс-ПМ» использовать проектные С/Ш 300, 350 в мультиспектральных каналах его оптико-электронного комплекса высокого разрешения (ОЭК-ВР) [26], ФПМ ~ 0,20 – среднее значение по рассмотренной группе КА.

Характерными значениями С/Ш при зачетных условиях для космической ОЭА ДЗЗ высокого разрешения можно считать диапазоны [1 – 5, 24, 29 – 31]:

- в панхроматическом канале от ~70 до ~120,
- для мультиспектральных каналов (кроме коротковолнового инфракрасного – КИК) ~50 ÷ 180 («синие» каналы) и до 200 ÷ 375 (стандартные каналы ДЗЗ: «зеленый», «красный», «ближний-ИК»).

Характерные значения суммарной ФПМ ОЭА ДЗЗ высокого разрешения в продольном и поперечном направлении относительно вектора СДИ составляют [1 – 5, 29, 31]: от 0,15 до 0,30 и 0,13 (0,07) до примерно 0,23.

Применив выражение (1) можно оценить характерные значения IQF изображения и показать их в виде топологии, что и отражено на рис. 2 ниже.

Топология на рис. 2 показывает, что для рассмотренных КА:

а) ФПМ и IQF более новых КА с ОЭА ДЗЗ производителями космических комплексов неуклонно улучшаются и, видимо, устремлены к их оптимуму по потребному разрешению для спутникового ДЗЗ или к техническому пределу для сверхвысокого разрешения [1 – 5, 31], который может определяться, в частности влиянием ФПМ атмосферы (см. (7));

б) IQF изображения в панхроматическом канале ОЭА ДЗЗ может составлять примерно от 15 до 36, кроме изображения в ОЭК-ВР КА «Ресурс-ПМ», IQF которого на основе данных от 2015 года [30] может составить около 60;

в) IQF изображения в мультиспектральных каналах (стандартные 4 канала спутниковой ОЭА ДЗЗ) составляет примерно от 26 до 50, кроме изображения в ОЭК-ВР КА «Ресурс-ПМ», для которого IQF может составить около 72;

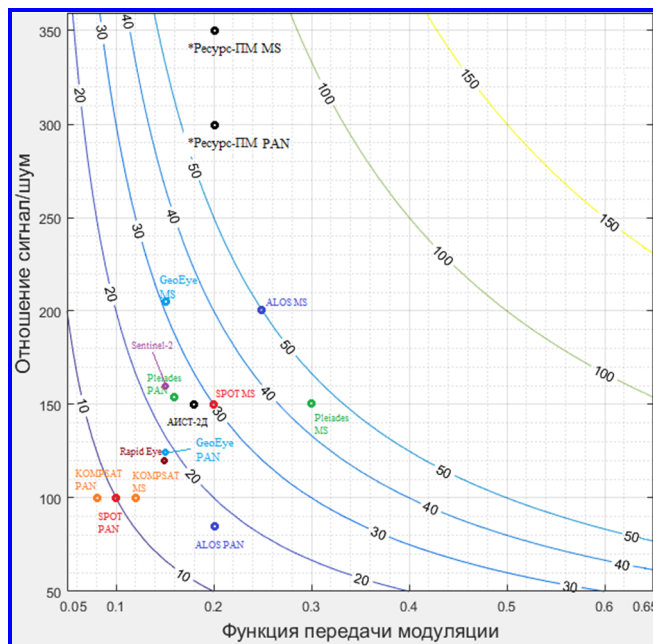


Рис. 2. Приблизительные величины IQF съемочной ОЭА ДЗЗ рассмотренных КА соответственно С/Ш, ФПМ на ее выходе

г) IQF мультиспектральных (MS) каналов съемочной ОЭА ДЗЗ высокого (10,0 – 1,0 м) и сверхвысокого разрешения (1,0 – 0,41 м) рассмотренных КА заметно выше, чем для панхроматических каналов ОЭА ДЗЗ тех же КА;

д) IQF совместно с ФПМ удобно использовать для кросс-калибровки ОЭА ДЗЗ разных КА орбитальной группировки (ОГ) космической системы, в частности, в целях максимальной близости и валидности качеств изображений, которые получают с помощью бортовых средств КА данной КС.

При этом следует особо отметить, что операторы отдельных КА и КС перед поставкой снимков пользователям, когда производят стандартные радиометрические коррекции раstra методами конволюции и суммарной ФПМ с ее увеличением на ~0,10 – 0,20 и более в сторону [1 – 5, 24 – 27]. Соответственно, суммарная ФПМ на выходе ОЭА ДЗЗ космического аппарата до коррекций наземными средствами обработки бортовых данных оператором данного КА может быть несколько ниже, чем на снимке. Следовательно, эффекты стандартных коррекций изображений земных покровов, которые производятся перед распространением пользователям данных ДЗЗ, следует закладывать в проектирование тех КА и съемочной ОЭА, которые предназначены для ДЗЗ.

Реально используемые ФПУ, как правило, имеют ФПМ около 0,5. Данная ФПМ может быть из-

мерена и предоставляться производителем ОЭП, что важно для ОЭА ДЗЗ, которая должна обеспечивать получение метрически верного изображения.

Если в ОЭА ДЗЗ использовать КМОП, то следует учитывать, что:

– время накопления в различных строках хоть и одинаково, но может быть смещено и вследствие этого движущиеся объекты могут геометрически искажаться;

– наиболее существенный вклад вносят фотонный шум, шум темнового тока, шум установки узла детектирования заряда [17].

Для того чтобы приблизительно соотнести данные графика на рис. 2 с пространственными разрешением и частотой изображения в ОЭА ДЗЗ, можно использовать таблицу, содержащую сводные данные об этом разрешении, данные о размере пикселя ФПУ, ФПМ и С/Ш ОЭА ДЗЗ, которыми оборудованы соответствующие космические аппараты [1 – 5, 8, 24, 29, 30].

Использование подхода с оценкой функции передачи модуляции, IQF и других показателей для обработки изображения на борту космического аппарата и в целях управления им

Рассмотренный обобщенный показатель IQF, как объективно независимый критерий, совместно с другими, например, определения функции рассеяния линии (ФРЛ) «резкого края» [7, 8, 10, 19, 20] и другими, можно использовать, в частности, для оценки влияния вибрации конструкции КА со съемочной ОЭА ДЗЗ на формируемое изображение во время его регистрации. Это следует из нижеследующего.

Анализ выражений выкладок с (3) по (15) показывает, что формулы оценки снижения С/Ш при колебаниях (4) и большинства ФПМ (11) – (15), кроме ФПМ расфокусировки, объединяет наличие в них переменной в виде геометрического смещения изображения относительно фотозоны ФПУ при съемке.

Таблица

Сводная таблица характеристик оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли проанализированных космических аппаратов

КА	Канал ОЭА	Размер пикселя ФПУ, мкм	Проекция пикселя на Землю (надир), м	ФПМ	С/Ш
1	2	3	4	5	6
SPOT-6, -7	PAN	н/д	2,2*	0,10	100
	MS	н/д	8,8*	0,20	150
KOMPSAT-2	PAN	н/д	1,0	0,08	100
	MS	н/д	4,0	0,12	100
RapidEye	MS	6,5	6,5*	0,15	120
GeoEye-1	PAN	8,0	0,41	0,15	125
	MS	32,0	1,64	0,15	206
Sentinel-2	MS	7,5	10,0	0,15	160
Pleiades-1A	PAN	13,0	0,70*	0,16	160
	MS	52,0	2,8*	0,30	150
ALOS	PAN	12,0**	2,5	0,20	70
	MS	48,0**	10,0	0,25	200
Ресурс-ПМ	PAN	9,0	0,4	0,20***	300
	MS	36,0	1,6	0,20***	350
АИСТ-2Д	PAN	6,0	1,46	0,17***	150
	MS	18,0	4,38	–	200

Примечания:

н/д – не найдены данные;

PAN – панхроматический канал ОЭА, MS – мультиспектральный;

* – проекция пикселя ОЭА в надире при том, что пользователям распространяются продукты соответствующих уровней обработки с значением размера пикселя растрового изображения, которое несколько меньше проекции в надир на 23 – 31 % [1, 2, 27, 28] – это обстоятельство при наличии соответствующих средств обработки «сырых» изображений Земли, которые были зарегистрированы бортовыми средствами КА, тоже следует учитывать при разработке таких КА и ОЭА ДЗЗ, которой они оборудуются;

** – расчетные примерные значения размеров пикселя ФПУ ОЭА КА ALOS-II, вычислены по публикациям о ней и баллистическому построению КА;

*** – примерные значения ФПМ – средние для ОЭА ДЗЗ с таким разрешением и объективом.

Если обеспечить максимизацию составляющих суммарной ФПМ звена «смаза» близко к техническому пределу путем использования высокостабильных оптической системы, фотоприемников и согласования вектора СДИ с ФПУ, то возможно получить оценку снижения ФПМ только за счет вибрации.

Комбинация указанных и других методов с учётом подходов [7, 11, 22, 23] может позволить выделить именно ФПМ влияния вибрации и применить её для выделения из суммарных ФПМ и IQF, например, для использования в выборе кинематического закона управления разворота осей ОЭА ДЗЗ при съемке. Такое управление КА в упрощенном виде можно представить, например, как подбор допустимого диапазона угловых скоростей вращения двигателей-маховиков (ДМ) системы ориентации в целях минимизации действия их дисбалансов на вибрацию КА, которое прямо пропорционально квадрату угловой скорости вращения роторов ДМ. Если для определения фактической ФПМ использовать полученные спутниковые снимки Земли, которые уже помещены в бортовую память ОЭА ДЗЗ, то можно использовать методы определения ФПМ по результатам съемки, изложенные, например в [8 – 10].

Следует отметить, что практически все необходимые методы распознавания, интерпретирования и распознавания объектов на изображении для создания подобных методов для ОЭА описаны, например, в [8, 10, 32].

Выбор прибора (датчика) и способа измерений текущего уровня вибрации конструкции по изображению, которое зарегистрировано ОЭА, можно сделать исходя из [18, 34 – 36], и на основе такого способа имеется возможность создать на борту КА калибруемый по изображению в съемочной ОЭА ДЗЗ датчик виброперемещения конструкции.

На основе таких возможностей уже созданы наземные комплексы [34 – 36], и могут создаваться приборы для измерения параметров вибрации конструкции, в том числе и для применения в условиях полета КА с ОЭА ДЗЗ. Использование совокупности определения С/Ш и ФПМ может быть особенно интересно для создания волоконно-оптического датчика определения виброперемещений [33]. Использование оптико-электронной аппаратуры в качестве датчика такого типа может привести к уменьшению недостатков, имеющихся, например, в предложенном в [34] патенте в части уменьшения погрешностей измерений увеличения их прецизионности и частоты опроса.

В качестве тест-объектов (ТО) при орбитальной эксплуатации КА могут использоваться такие ТО,

которые находятся на наружной конструкции ОЭА ДЗЗ или внутри неё на краю конструкции фокальной плоскости при наличии специального оптического канала. Для несколько менее точных измерений при летной эксплуатации могут быть использована Луна и ТО на наземных полигонах, но во втором случае придется учитывать ФПМ атмосферы.

Выводы

В данной статье рассмотрены факторы, которые могут значительно снижать ключевые показатели радиометрического качества изображения на выходе съемочной ОЭА ДЗЗ при орбитальной съемке Земли относительно их значений в статических условиях, например, при наземных отработках. В качестве ключевых показателей рассмотрены снижение отношения сигнал/шум, суммарной ФПМ части сквозного информационного тракта на выходе ОЭА ДЗЗ и вычисляемого на их основе IQF – фактора качества изображения на выходе данной ОЭА [1, 2].

Следует заметить, что в работе [38] практически уже был предложен параметр оценки качества изображения для ДЗЗ из космоса, который получается перемножением, в том числе ФПМ и С/Ш, но он имеет некоторые отличия и не был назван IQF как в [1, 2]. В статье также показана определенная применимость использования IQF для снимков, полученных с космических аппаратов с ОЭА ДЗЗ различных производящих и эксплуатирующих их организаций. В итоге можно отметить, что данный показатель используется для оценки качества видеоданных ДЗЗ в разных странах и его можно считать объективным и относительно менее сложным чем другие.

Также предложено наряду и совместно с IQF при оценке качества изображения, сформированного в ОЭА ДЗЗ космического аппарата, в том числе и в условиях орбитального полета использовать приближение к стробоскопическому эффекту [18], хорошо изученные критерии [8, 9, 11 – 13, 19, 20] и те, которые по разным причинам не нашли отражения в данной статье.

Отдельное внимание в настоящей работе уделено влиянию высокочастотной вибрации конструкции КА для данной съемочной ОЭА ДЗЗ на качество формирования изображения в ней. Показано, что в [1 – 3] влияние такой вибрации на качество изображения опубликовано в руководстве пользователя данных ДЗЗ. Сделан вывод о возможности создания бортовых приборов для КА с ОЭА ДЗЗ, которые могут выполнять функции измерений параметров вибрации и снижения качеств изображения КА в данной ОЭА во время летной эксплуа-

тации на основе использования измерений компонент IQF по изображению с распознаванием [32] тест-объектов в сочетании с оценками по критериям [8, 9, 11 – 13, 19, 20].

Погрешности использования критерия IQF, других критериев необходимо проверять при наземных испытаниях ОЭА ДЗЗ и КА в сборе с данной ОЭА в условиях применяемых стендов и оборудования, а также – при летных испытаниях КА с ОЭА ДДЗ, чтобы отобрать наиболее эффективные. Кроме того, IQF и другие критерии следует использовать при проектировании КА и его ОЭА ДЗЗ.

Литература

1. SPOT 6 & SPOT 7. Imagery – User Guide. SI/DC/13034-v1.0. The Astrium Services optical constellation. – Toulouse, France : Astrium an EADS Company, 2013. – 120 p.
2. Pléiades Imagery – User Guide. Airbus Defence and Space Intelligence. – 2012 (2018). – 106 p.
3. KOMPSAT-2 Image data Manual (Version 1.1, 2008-01-25) // Satellite Information Research Institute Korea Aerospace Research Institute. – P. 11.
4. ALOS User Handbook. Revision C. Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency. – 2008. – 158 p. – URL : http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf.
5. GeoEye-1. Earth Imaging Satellite World's Highest Resolution Commercial Imager. General Dynamics Advanced Information Systems. – URL : www.gd-space.com.
6. D5.2 – Literature Review of the Benefits and Applications of Very Low Earth Orbits for Earth Observation : Discoverer. – 2018. – 33 p.
7. Blanc P., Wald L. A Review of Earth-viewing Methods for In-flight Assessment of Modulation Transfer Function and Noise of Optical Spaceborne sensors : Working paper / P. Blanc, L. Wald. – 2009. – 38 p.
8. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – Москва : Техносфера, 2010. – 560 с. : 32 с цв. вкл.
9. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления. Техническое зрение в системах управления 2011 / В. Н. Остриков // Сборник трудов научно-технической конференции ; под ред. Р. Р. Назирова. – Таруса, 2011. – С. 16 – 20.
10. Еремеев В. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / В. В. Еремеев ; под редакцией В. В. Еремеева. – Москва : Физматлит, 2015. – 460 с.
11. MTF measurements, identifying bias, and estimating uncertainty / David P. Haefner // Proc. SPIE 10625, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX, 1062506. – 2018. – Vol. 10625. – 15 p. – DOI : 10.1117/12.2303974.
12. Родионов С. А. Оценка качества оптического изображения : справочник по вычислительной оптике / С. А. Родионов. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – С. 268 – 282.
13. Бетенски Э. Проектирование оптических систем / Э. Бетенски, Р. Хопкинс, Р. Шеннон. – Москва : Мир, 1983. – 432 с. : ил.
14. Smith J. Warren. Modern optical engineering / Warren J. Smith ; The Design of Optical Systems. – 3rd ed. – The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000. – 617 [5] p.
15. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения / Под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уйта. – Москва : Мир, 1979. – 573 с.
16. 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.
17. Горбачёв А. А. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе / А. А. Горбачёв, В. В. Коротаяев, С. Н. Ярышев. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.
18. Модель смаза изображения при вибрациях / Е. А. Зрюмов, П. А. Зрюмов, С. П. Пронин [и др.] // Ползуновский альманах. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2011. – № 1. – С. 68 – 69.
19. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations, part 2: Numerical calculation of modulation transfer function / O. Hodar, M. Fisher, N. S. Kopeika // Opt. Eng. – 1992. – 31 (3). – P. 581 – 589.
20. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations, part IV: Real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification / O. Hodar, I. Dror, N. S. Kopeika // Opt. Eng. – 31 (2). – 1994. – P. 566 – 578.
21. Effects of satellite platform's vibration on the image quality of a remote sensing payload : System level design and challenges / J. Haghshenas // Proc. SPIE. – Jena, Germany, 2015. – 9626. – 14 p. – DOI : 10.1117/12.2191106.
22. Maximum allowable low-frequency platform vibrations in high resolution satellite missions : Challenges and look-up figures / J. Haghshenas // Proc. SPIE. – Jena, Germany, 2015. – 9626. – 10 p. – DOI : 10.1117/12.2191109.
23. Vibration effects on remote sensing satellite images / J. Haghshenas // Advances in Aircraft and Spacecraft Science. – 2017. – Vol. 4. – No. 5. – P. 543 – 553. – DOI : <https://doi.org/10.12989/aas.2017.4.5.543>.
24. Sentinel-2. ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. SP-1322/2 / M. Drusch, U. D. Bello, S. Carlier [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 25 – 36. – DOI : 10.1016/J.RSE.2011.11.026.
25. KOMPSAT-3. Image data Manual (V1.0 1/2013.08). Satellite Information Research Institute Korea Aerospace Research Institute. – 11 p.
26. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide (WorldView-1, WorldView-2). – 38 p. – URL : www.geosoluciones.cl.
27. RAPIDEYE™ Imagery product specifications. Version 6.1. /January 2016. – URL : sales@planet.com.
28. SPOT 6/SPOT 7. Technical Sheet. – URL : solutions@astrium-geo.com.
29. Опытнo-технологический малый космический аппарат

«АИСТ-2Д». – Самара : СамНЦ РАН, 2017. – 324 с. : ил.

30. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» / Бакланов А. И., Блинов В. Д., Горбунов И. А. [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 30 – 35.

31. Spot image quality performances. C443-NT-0-296-CN. – Edit.: 1. 15/01/2004.

32. Визильтер Ю. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения : курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко [и др.]. – Москва : Физматкнига, 2010. – 672 с.

33. Recent Trends of Measurement and Development of Vibration Sensors / Himanshu Chaurasiya // International Journal of Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – Issues 4. – 6 p. – DOI : 10.48550/arXiv.1209.5333.

34. Патент № 2395792С1 Российская Федерация, МПК G01H 9/00 (2006.01). Способ измерения параметров вибрации объекта : № 2009125845/28 ; заявл. 06.07.2009 : опубл. 27.07.2010 / Пронин Сергей Петрович, Зрюмов Евгений Александрович, Юденков Андрей Владимирович. – Бюл. № 21. – 8 с.

35. Optics Test Stations For single lenses and optical assemblies. – URL : www.oeggmbh.com.

36. TRIOPTICS GmbH [сайт]. – 2021. – URL : <https://trioptics.com>.

37. D1.3 – On-board Payload Processing Requirements, S4Pro-H2020-822014. – ©S4Pro Consortium, 2019.

38. Метод оценки пороговой частотно-энергетической характеристики оптико-электронного тракта / Д. А. Сикорский // ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ. Электронный журнал. – 14 с. – URL : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>.

Поступила в редакцию 23.12.2021

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 Александрович Новоселов, инженер.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

OVERVIEW OF FACILITIES FOR ASSESING COMPONENTS OF IMAGE QUALITY AT OUTPUT OF SATELLITE OPTO-ELECTRONIC EQUIPMENT FOR EARTH REMOTE SENSING IN ORDER TO PROVIDE ON-BOARD IMAGE PROCESSING ON SPACECRAFT BOARD

V. Ia. Gecha, M. Iu. Zhilenev, S. A. Novoselov

The use of assessment of several individual and key quality indicators of the satellite optical image of the Earth is considered: signal-to-noise ratio, total modulation transfer function and Image Quality Factor that is the image quality factor calculated according to them. In this case the possibilities of using the indicated assessments of optical observation on spacecraft board, including for the purpose of controlling it, are considered. Moreover, selected approach is based on the fact that the modulation transfer of the Earth satellite image considerably depends on the consistency of the speed of its movement over the radiation receivers in the satellite opto-electronic equipment for Earth remote sensing and is largely determined by the corresponding parameters of the law of kinematic movement of the spacecraft axes being performed with this equipment and the dynamics of its design during Earth orbital imaging.

Therefore, the mathematical expressions and analysis of the generalized assessment of the Image Quality Factor components at the output of opto-electronic equipment for Earth remote sensing during orbital imaging are presented. In addition, references are given to various methods of image analysis, identification and measurement, and for existing ground-based equipment that allows high-precision measurement of the image modulation transfer function of opto-electronic systems.

Further, based on the conclusions about the need to understand the influence of the speed of image movement in opto-electronic equipment under vibrations of the structure during Earth orbital imaging and the sufficiency of existing mathematical and instrumental facilities for such measurements directly from the obtained image. It is concluded that it is possible to design and create such devices for optical spacecraft that can perform functions of high-precision image measurement including for controlling a spacecraft during Earth imaging by its opto-electronic equipment for Earth remote sensing.

Keywords: *opto-electronic equipment, signal-to-noise ratio, modulation transfer function, end-to-end information path, Image Quality Factor, spatial frequency, Earth remote sensing.*

References

1. SPOT 6 & SPOT 7. Imagery – User Guide. SI/DC/13034-v1.0. The Astrium Services optical constellation. – Toulouse, France : Astrium an EADS Company, 2013. – 120 p.
2. Pléiades Imagery – User Guide. Airbus Defence and Space Intelligence. – 2012 (2018). – 106 p.
3. KOMPSAT-2 Image data Manual (Version 1.1, 2008-01-25) // Satellite Information Research Institute Korea Aerospace Research Institute. – P. 11.
4. ALOS User Handbook. Revision C. Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency. – 2008. – 158 p. – URL : http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf.
5. GeoEye-1. Earth Imaging Satellite World's Highest Resolution Commercial Imager. General Dynamics Advanced Information Systems. – URL : www.gd-space.com.
6. D5.2 – Literature Review of the Benefits and Applications of Very Low Earth Orbits for Earth Observation : Discoverer. – 2018. – 33 p.
7. Blanc P., Wald L. A Review of Earth-viewing Methods for In-flight Assessment of Modulation Transfer Function and Noise of Optical Spaceborne sensors : Working paper / P. Blanc, L. Wald. – 2009. – 38 p.

8. Shovengerdt R. A. Remote sensing. Methods and models of image processing / Shovengerdt R. A. – Moscow : Technosphere, 2010. – 560 p. : with 32 color inserts.
9. Assessment of point spread function on a random image using the blind search method. Computer Vision in Control Systems 2011 / V.N. Ostrikov // Proceedings of Scientific and Technical Conference ; edited by R. R. Nazirov. – Tarusa, 2011. – P. 16 – 20.
10. Ereemeev V. V. Modern technologies of Earth remote sensing data processing / Ereemeev V. V. ; edited by V. V. Ereemeev. – Moscow : Fizmatlit, 2015. – 460 p.
11. MTF measurements, identifying bias, and estimating uncertainty / David P. Haefner // Proc. SPIE 10625, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX, 1062506. – 2018. – Vol. 10625. – 15 p. – DOI : 10.1117/12.2303974.
12. Rodionov S. A. Optical image quality assessment: Guide book to optical computing / S. A. Rodionov. – Leningrad: Mashinostroyeniye, 1984. – P. 268 – 282.
13. Betenski Je. Design of optical systems / Je. Betenski, R. Hopkins, R. Shannon. – Moscow : Mir, 1983. – 432 p. : with ill.
14. Smith J. Warren. Modern optical engineering / Warren J. Smith ; The Design of Optical Systems. – 3rd ed. – The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000. – 617 [5] p.
15. Solid state imaging / Edited by: P. Jespers, F. Van de Wiele, M.H. White. – Moscow : Mir, 1979. – 573 p.
16. Matrix photosensitive devices with charge coupling for receiving a moving image / A. V. Maklakov // Electronic engineering. 2 series. Semi-conductor devices. – 2009. – No. 1 (222). – P. 49 – 57.
17. Gorbachev A. A. Solid-state matrix photo converters and cameras based on them / A. A. Gorbachev, V. V. Korotaev, S. N. Iaryshev. – St. Petersburg: NRU ITMO, 2013. – 98 p.
18. Model of image blurring during vibrations / E. A. Zriunov, P. A. Zriunov, S. P. Pronin [et. al] // Polzunov almanac. – Barnaul: Polzunov Altai State Technical University Publishing, 2011. – No. 1. – P. 68 – 69.
19. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations, part 2: Numerical calculation of modulation transfer function / O. Hodar, M. Fisher, N. S. Kopeika // Opt. Eng. – 1992. – 31 (3). – P. 581 – 589.
20. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations, part IV: Real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification / O. Hodar, I. Dror, N. S. Kopeika // Opt. Eng. – 31 (2). – 1994. – P. 566 – 578.
21. Effects of satellite platform's vibration on the image quality of a remote sensing payload : System level design and challenges / J. Haghshenas // Proc. SPIE. – Jena, Germany, 2015. – 9626. – 14 p. – DOI : 10.1117/12.2191106.
22. Maximum allowable low-frequency platform vibrations in high resolution satellite missions : Challenges and look-up figures / J. Haghshenas // Proc. SPIE. – Jena, Germany, 2015. – 9626. – 10 p. – DOI : 10.1117/12.2191109.
23. Vibration effects on remote sensing satellite images / J. Haghshenas // Advances in Aircraft and Spacecraft Science. – 2017. – Vol. 4. – No. 5. – P. 543 – 553. – DOI : <https://doi.org/10.12989/aas.2017.4.5.543>.
24. Sentinel-2. ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. SP-1322/2 / M. Drusch, U. D. Bello, S. Carlier [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 25 – 36. – DOI : 10.1016/J.RSE.2011.11.026.
25. KOMPSAT-3. Image data Manual (V1.0 1/2013.08). Satellite Information Research Institute Korea Aerospace Research Institute. – 11 p.
26. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide (WorldView-1, WorldView-2). – 38 p. – URL : www.geosoluciones.cl.
27. RAPIDEYE™ Imagery product specifications. Version 6.1. /January 2016. – URL : sales@planet.com.
28. SPOT 6/SPOT 7. Technical Sheet. – URL : solutions@astrium-geo.com.
29. Test-technological small spacecraft 'AIST-2D'. – Samara : SamSC of RAS, 2017. – 324 p. : with ill.
30. High-resolution equipment for future 'Resurs-PM' spacecraft / Baklanov A. I., Blinov V. D., Gorbunov I. A. [et al.] // Bulletin of Samara State Aerospace University. – 2016. – Vol. 15. – No. 2. – P. 30 – 35.
31. Spot image quality performances. C443-NT-0-296-CN. – Edit.: 1. 15/01/2004.
32. Vizilter Iu. V. Image processing and analysis in machine vision objectives : series of lectures and practical exercises / Iu. V. Vizilter, S. Iu. Zheltov, A. V. Bondarenko [et al.] – Moscow : Fizmatkniga, 2010. – 672 p.
33. Recent Trends of Measurement and Development of Vibration Sensors / Himanshu Chaurasiya // International Journal of Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – Issues 4. – 6 p. – DOI : 10.48550/arXiv.1209.5333.
34. Patent No. 2395792C1 Russian Federation, IPC G01H 9/00 (2006.01). Method of object vibration parameters measurement : No. 2009125845/28 ; application of: 06.07.2009 ; published on: 27.07.2010 / Pronin Sergei Petrovich, Zriunov Evgenii Aleksandrovich, Iudakov Andrei Vladimirovich. – Bul. No. 21. – 8 p.
35. Optics Test Stations For single lenses and optical assemblies. – URL : www.oeggmbh.com.
36. TRIOPTICS GmbH [website]. – 2022. – URL : <https://trioptics.com>.
37. D1.3 – On-board Payload Processing Requirements, S4Pro-H2020-822014. – ©S4Pro Consortium, 2019.
38. Method of threshold frequency-energy characteristic assessment of opto-electronic path / D. A. Sikorskii // INVESTIGATED in RUSSIA. Electronic journal. – 14 p. – URL : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>.

Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Deputy Director General for Science, tel. +7 (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.
Mikhail Iurevich Zhilenev, Senior Researcher.
Sergei Aleksandrovich Novoselov, Engineer.
(JC «VNIEM Corporation»).