

Новая оценка линейного инструментального разрешения на местности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для совершенного проектирования их оптико-электронной аппаратуры

К. Н. Свиридов¹, А. Е. Тюлин¹, С. А. Пулинец^{1,2}

¹ АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: centr31@spacecorp.ru

Статья посвящена совершенному проектированию оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на базе критериев оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности. Рассматриваются два критерия: известный зарубежный критерий оценки геометрического разрешения Ground Sample Distance (GSD-критерий) и новый отечественный критерий оценки линейного разрешения, предложенный в холдинге «Российские космические системы» (РКС-критерий). Проведено сравнение результатов применения этих критериев при проектировании ОЭА. Показано, что применение GSD-критерия является некорректным для проектирования согласованной по критерию Найквиста (совершенной) ОЭА. Отсутствие согласования ОЭА по критерию Найквиста ухудшает предельное инструментальное разрешение КА ДЗЗ на местности и ведёт к неоправданным финансовым затратам заказчика на создание объективов с большими размерами диаметров апертуры. Предложено при проектировании ОЭА использовать РКС-критерий, свободный от недостатков и ограничений GSD-критерия. Применение РКС-критерия позволит согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста и обеспечит при её эксплуатации в составе КА ДЗЗ возможность достижения дифракционного предела линейного разрешения КА ДЗЗ на местности при компенсации атмосферных искажений и использовании объективов меньших диаметров с приемлемыми по стоимости показателями. Эта экономия, в свою очередь, позволит перейти к существенному наращиванию группировки отечественных малых космических аппаратов (МКА) ДЗЗ, что необходимо для повышения качества мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Дан пример совершенного проектирования ОЭА на базе РКС-критерия и её реализации в реальных условиях эксплуатации на борту МКА ДЗЗ с применением новых технологий компенсации искажений при получении и обработке изображений ДЗЗ.

Ключевые слова: геометрическое разрешение — GSD-критерий, линейное разрешение — РКС-критерий, дифракционное разрешение, критерий Найквиста, совершенное проектирование ОЭА КА ДЗЗ, компенсация искажений атмосферы

Одобрена к печати: 23.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-59-67

Введение

Одним из важнейших факторов достижения своевременного, точного и достоверного прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера на территории России и стран СНГ является наличие развитой группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), включая КА, оснащённые оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) наблюдения Земли высокого и среднего разрешения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Такая группировка, содержащая не один десяток КА (Алексеев и др., 2016), способна своевременно и качественно наблюдать за многими предвестниками землетрясений, например температурными, влажностными и другими аномалиями поверхности Земли и её атмосферы накануне сильных землетрясений (Пулинец и др., 2014), а также аномалиями, связанными с наводнениями, природными пожарами и техногенными катастрофами.

Переход от существующей в настоящее время ограниченной группировки КА ДЗЗ к полноценной группировке требует немалых затрат, существенную долю которых составляет стоимость ОЭА. Снижение стоимости создания ОЭА КА ДЗЗ во многом определяется согласованием параметров ОЭА по критерию Найквиста, т. е. совершенным проектированием, для обеспечения возможности достижения дифракционного предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности.

Проведённые исследования (Уэзерелл, 1983) свидетельствуют о том, что наиболее универсальным критерием, характеризующим эффективность наблюдательной системы, является её разрешающая способность. Величина инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности зависит от степени согласования параметров ОЭА по критерию Найквиста (Уэзерелл, 1983) и может варьироваться от некоторого реального его значения до величины дифракционного предела. От выбора критерия оценки зависит возможность согласования параметров ОЭА по критерию Найквиста при её проектировании. Совершенное проектирование ОЭА на основе требуемого предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности является целью данной статьи.

Рассмотрим существующие критерии оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности и основанное на их использовании проектирование ОЭА.

Критерии оценки предельного инструментального разрешения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на местности

Геометрическое разрешение

Сегодня в качестве основного критерия оценки предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, характеризующего качество ОЭА КА ДЗЗ, используют проекцию одного пикселя цифрового детектора d на зондируемую земную поверхность (Лавров, 2010). Этот предел инструментального геометрического разрешения на местности КА ДЗЗ $R_{ГРМ}$ (м) определяется соотношением:

$$R_{ГРМ} = \frac{dH}{F}, \quad (1)$$

где F — фокусное расстояние объектива; H — высота КА ДЗЗ.

Критерий (1) оценки предельного инструментального разрешения ОЭА КА ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ с появлением цифровых детекторов: сначала за рубежом, где он получил название Ground Sample Distance (GSD-критерий) (<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD>), а впоследствии и в России (Кирилин и др., 2010; Хмелевской, 2011). Обозначим предел инструментального геометрического разрешения на местности КА ДЗЗ в соответствии с GSD-критерием как R_{GSD} . Тогда равенство (1) можно записать следующим образом: $R_{GSD} = R_{ГРМ} = dH/F$.

Несоответствие значений GSD-критерия экспериментальным результатам (Замшин, 2014) стимулировало нас на проведение дополнительных исследований.

Линейное разрешение

Известно, что определения линейного разрешения аналоговых фотоизображений по штриховым мирам в отечественной и зарубежной практике отличаются на уровне стандартов: ГОСТ и ISO (<http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html>). Действительно, российский стандарт в соответствии с ГОСТ 15114-78 «Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения, 1978 г.» (далее — ГОСТ 15114-78) устанавливает, что линейное разрешение в изображении определяется периодом штриховой миры, т. е. суммой светлой и тёмной линий $R_{ЛРИ} = 2p$, где p — размер светлой или тёмной

линии минимального разрешаемого элемента штриховой миры. При этом линейное разрешение на местности $R_{\text{ЛРИ}}$ (м) аналогового фотоизображения ДЗЗ определяется проекцией линейного разрешения в изображении $R_{\text{ЛРИ}}$ на зондируемую земную поверхность как (Свиридов, 2017):

$$R_{\text{ЛРМ}} = \frac{R_{\text{ЛРИ}} H}{F} = \frac{2pH}{F}. \quad (2)$$

В случаях формирования цифрового изображения размер минимального разрешаемого элемента в изображении p равен размеру пикселя d цифрового детектора. При этом формула линейного разрешения на местности (2) преобразуется к виду:

$$R_{\text{ЛРМ}} = \frac{R_{\text{ЛРИ}} H}{F} = \frac{2dH}{F} = R_{\text{РКС}}. \quad (3)$$

Этот новый критерий оценки линейного разрешения на местности КА ДЗЗ интуитивно предложен (Свиридов, 2017), запатентован (Тюлин, Свиридов, 2018), описан (Свиридов, Тюлин, 2019) специалистами холдинга «Российские космические системы» (РКС) и назван РКС-критерием.

Дифракционное разрешение. Коэффициент совершенства оптико-электронной аппаратуры

Наряду с рассмотренными выше критериями оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности существует дифракционный предел разрешения R_D (м), который определяет потенциальные возможности по достижению линейного разрешения КА ДЗЗ на местности в соответствии с известной формулой (Уэзерелл, 1983):

$$R_D = \frac{\lambda H}{D}, \quad (4)$$

где D — диаметр объектива; λ — средняя длина волны солнечного излучения подсвета.

Заметим, что дифракционный предел инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности (4) может быть достигнут только при согласовании объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста (Уэзерелл, 1983).

Реальное инструментальное разрешение КА ДЗЗ на местности зависит от степени согласования по критерию Найквиста (Уэзерелл, 1983) пространственного разрешения объектива с пространственным разрешением детектора. Согласно этому критерию при цифровом детектировании сигналов вводится понятие частоты Найквиста $f_N = (1/2)f_{1/d}$, равной половине частоты дискретизации $f_{1/d} = 1/d$, и утверждается, что при дискретизации аналогового сигнала полезную информацию несут только частоты, которые ниже частоты Найквиста ($f < f_N$).

Для оценки степени согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста вводится понятие коэффициента совершенства ОЭА КА ДЗЗ как отношение оценки предельного инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности по РКС-критерию $R_{\text{РКС}}$ (3) к дифракционному пределу линейного разрешения R_D (4) (Свиридов, Тюлин, 2018а):

$$K = \frac{R_{\text{РКС}}}{R_D} = \frac{2dD}{\lambda F}, \quad K \geq 1. \quad (5)$$

В согласованной по критерию Найквиста ОЭА коэффициент совершенства аппаратуры равен единице ($K = 1$). При этом из формулы (5) следует, что

$$2d = \frac{\lambda F}{D}, \quad (6)$$

а это и есть условие согласования объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста, когда на дифракционный элемент разрешения объектива (диск Эри) $\lambda F/D$ приходится как

минимум два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора. Полученный результат свидетельствует о том, что новый РКС-критерий оценки предельного инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\text{РКС}}$ (3) позволяет согласовать ОЭА КА ДЗЗ по критерию Найквиста (6) и обеспечить возможность достижения дифракционного предела разрешения ($R_{\text{РКС}} = R_D$).

Рассмотрим коэффициент качества ОЭА КА ДЗЗ — K_0 как отношение значения R_{GSD} (1) к дифракционному пределу разрешения на местности R_D (4):

$$K_0 = \frac{dH/F}{\lambda H/D} = \frac{dD}{\lambda F}, \quad K_0 \geq 1. \quad (7)$$

Ситуация, при которой $K_0 = 1$, определяет границу применимости GSD-критерия для оценки разрешения КА ДЗЗ на местности, когда $dH/F = \lambda H/D$, так как ситуация, когда величина R_{GSD} становится меньше дифракционного предела R_D , а $K_0 < 1$, противоречит физическому смыслу.

Из сравнения выражений (5) и (7) следует, что

$$K = 2K_0 \quad (8)$$

и ограничение, устанавливаемое GSD-критерием на величину K_0 , а именно $K_0 \geq 1$, накладывает ограничение на коэффициент совершенства K :

$$K \geq 2. \quad (9)$$

Значения коэффициентов совершенства (а скорее — несовершенства) существующих зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения (Свиридов, 2017; Свиридов и др., 2019а) представлены в *таблице*.

Коэффициент совершенства K оптико-электронной аппаратуры зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения ($K \geq 2$)

Наименование КА ДЗЗ ($\lambda = 0,55$ мкм)	Параметр			
	D , м	F , м	d , мкм	K
IKONOS-2	0,7	10	12	3,0
QuikBird-2	0,6	8,8	12	2,95
OrbView-3	0,43	3,0	6	3,29
EROS-B	0,5	5,0	7	2,56
Cartosat-2	0,7	5,6	7	3,2
WorldView-1	0,6	8,8	8	2,32
GeoEya-1	1,1	13,3	8	2,4
WorldView-2	1,1	13,3	8	2,4
Pleiades-1	0,65	12,9	13	2,39
WorldView-3	1,1	13,3	6,7	2,01

Как следует из *таблицы*, при использовании GSD-критерия нельзя достичь совершенства проектируемой ОЭА КА ДЗЗ, если $K = 1$.

Проектирование оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Оптико-электронная аппаратура КА ДЗЗ включает оптический объектив с диаметром апертуры D (м) и фокусным расстоянием F (м), а также цифровой детектор с пространственным элементом разрешения (пикселем) d (мкм). Совершенное проектирование ОЭА КА ДЗЗ

подразумевает определение величин D , F и d , обеспечивающих согласование объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста.

Рассмотрим подход к проектированию совершенной ОЭА КА ДЗЗ, основанный на использовании критерия оценки предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности — РКС-критерия (Свиридов, Тюлин, 2018б).

Проектируя ОЭА КА ДЗЗ на основе РКС-критерия, выполняют следующую последовательность операций:

- задают паспортные данные для КА ДЗЗ, например $R_{\text{ЛРМ}} = 1$ м, $H = 500$ км, $\lambda = 0,6$ мкм; $K = 1$;
- выбирают цифровой детектор, например с размером пикселя $d = 6$ мкм;
- формируют проекцию периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность и приравнивают её к требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности: $R_{\text{РКС}} = 2dH/F = R_{\text{ЛРМ}} = 1$ м;
- приравнивают дифракционное разрешение на местности объектива ОЭА к требуемому линейному разрешению КА ДЗЗ на местности: $R_D = R_{\text{ЛРМ}} = 1$ м;
- определяют требуемый диаметр апертуры объектива: $D = \lambda H/R_{\text{ЛРМ}} = 0,3$ м;
- определяют требуемое фокусное расстояние объектива: $F = 2dH/R_{\text{ЛРМ}} = 6$ м;
- для контроля результатов проектирования определяют коэффициент совершенства проектируемой ОЭА: $K = R_{\text{РКС}}/R_D = 2dD/\lambda F = 1$.

Таким образом, рассчитанные в соответствии с РКС-критерием параметры ОЭА показывают, что она совершенна, согласована по критерию Найквиста и обеспечивает достижение дифракционного предела линейного разрешения КА ДЗЗ на местности.

Реализация результатов проектирования оптико-электронной аппаратуры малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Сегодня возрастает интерес к созданию и использованию группировок малых космических аппаратов (МКА) ДЗЗ, обеспечивающих возможность наблюдения любого участка земной поверхности в любое время с высоким пространственным разрешением. Каждый МКА в группировке должен обеспечивать максимально возможное время наблюдения выбранного участка земной поверхности с дифракционным разрешением, при этом требования к МКА ДЗЗ по его производительности, определяемой размером поля зрения ОЭА, не предъявляются вследствие большого количества МКА.

Предлагается новая технология получения и обработки искажённых атмосферой изображений ДЗЗ для МКА (Свиридов и др., 2019б).

Для реализации результатов проектирования, полученных на базе любого критерия, создаётся спроектированная ОЭА, содержащая выбранный цифровой детектор с пикселем d , объектив с диаметром D и фокусным расстоянием F . Для увеличения фокусного расстояния объектива до согласующей величины $F_C = FK$ в ОЭА между объективом и цифровым детектором вводится фотоувеличительная оптика, оптическая ось которой совмещается с оптической осью объектива, и размещаются стандартные микрообъективы (или линзы Барлоу) с увеличением $M^X = K$ между объективом и цифровым детектором ОЭА так, чтобы передний фокус фотоувеличительной оптики F находился в фокальной плоскости объектива, а задний фокус сборки объектива и фотоувеличительной оптики F_C — в плоскости формируемых и детектируемых изображений. Далее осуществляется размещение созданной ОЭА на борту МКА ДЗЗ, вывод МКА на орбиту и дистанционное зондирование наблюдаемых участков земной поверхности. Для этого в режиме орбитальной ориентации производятся программные развороты МКА ДЗЗ вокруг центра масс в продольном направлении. При подлёте к точке зенита орбиты (относительно объекта наблюдения) на расстояние, равное высоте полёта H , МКА наводит на объект ОЭА и удерживает её в направлении зондируемого участка до тех

пор, пока не удалится от точки зенита на такое же расстояние H . Это препятствует возникновению смазов изображений. Одновременно с этим на борту МКА ДЗЗ в узком поле зрения сборки объектив — фотоувеличительная оптика и в широкой полосе спектральной чувствительности цифрового детектора $\Delta\lambda$ при $\Delta\lambda < \Delta\lambda_A$ (где $\Delta\lambda_A = \lambda/\sigma_{e,D}$; $\sigma_{e,D}^2$ — дисперсия атмосферных флуктуаций фазы Θ на апертуре D , всегда меньшая единицы в задачах ДЗЗ) осуществляется регистрация серии из N коротко-экспозиционных изображений зондируемого участка земной поверхности при $\tau_{\ominus} = \tau_A = 1$ мс (где τ_{\ominus} — время экспозиции регистрируемых изображений; τ_A — интервал временной корреляции атмосферных флуктуаций), статистически независимых друг от друга по атмосферным искажениям при $\tau_{\Pi} > \tau_D$ (где $\tau_{\Pi} = 6\tau_K$ — промежуток между соседними регистрациями; τ_K — длительность кадра; τ_D — инерционность цифрового детектора). Результаты регистрации передаются на наземные средства для последующей обработки, при которой сначала анализируется зарегистрированная серия из N дифракционно-ограниченных, случайно сдвинутых и ослабленных атмосферой малоконтрастных изображений. Далее производится селекция (отбор) в серии M наиболее чётких и контрастных изображений, отбраковка размытых и зашумлённых. Затем осуществляется суммирование отобранных изображений и формирование эталонного высококонтрастного изображения зондируемого участка земной поверхности. По эталонному изображению определяются его характерные особенности (опорные ориентиры). В отобранных M изображениях определяются характерные особенности, подобные характерным особенностям эталона. Далее осуществляется сдвиг коротко-экспозиционных изображений, совмещение их характерных особенностей с характерными особенностями эталона, что приводит к компенсации атмосферных сдвигов изображений, накопление сдвинутых дифракционно-ограниченных изображений, приводящее к увеличению отношения сигнал/шум результирующего изображения в \sqrt{M} раз. В результате формируется высококонтрастное, с высоким (дифракционным) разрешением панхроматическое изображение зондируемого участка земной поверхности.

Представленная последовательность операций в развёрнутом виде с количественными оценками входящих в неё параметров дана в заявке на регистрацию изобретения (Свиридов и др., 2019б).

Заключение

Итак, в результате рассмотрения критериев оценки разрешающей способности ОЭА КА ДЗЗ и на основании работ авторов, представленных в цитируемой литературе, можно сделать следующие выводы.

GSD-критерий оценки предельного инструментального геометрического разрешения на местности КА ДЗЗ нецелесообразно применять при создании отечественной совершенной ОЭА, поскольку он препятствует согласованию объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста и делает невозможным достижение дифракционного предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности.

Создание в соответствии с GSD-критерием объектива с диаметром в два раза больше эффективного диаметра, обеспечивающего реальное инструментальное разрешение КА ДЗЗ на местности, приводит к неоправданному завышению его стоимости в восемь (при $K = 2$) и более раз (Свиридов, 2006). Это является одним из сильных сдерживающих факторов формирования в приемлемые сроки необходимой по составу и количеству группировки отечественных МКА ДЗЗ для качественного решения задач мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера, а также решения других задач космического мониторинга.

Использование при проектировании ОЭА отечественного РКС-критерия оценки предельного инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности позволяет согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста ($K = 1$) и обеспечить возможность достижения дифракционного предела линейного разрешения КА ДЗЗ на местности после компенсации атмосферных искажений, устранения смаза и повышения отношения сигнал/шум в рамках предложенной технологии получения и обработки изображений ДЗЗ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии № 075-11-2019-015 от 22 октября 2019 г. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58519X0008.

Литература

1. *Алексеев О. А., Разумова Н. В., Цадиковский Е. И., Линьков А. Д.* Рассмотрение методологии построения космической группировки мониторинга для прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 5. С. 29–38.
2. *Замшин В. В.* Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // *Изв. высших учеб. заведений. Геодезия и аэрофото-съемка*. 2014. № 1. С. 43–47.
3. *Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р., Бакланов А. И., Федотов В. М., Новиков Н. В.* Космический аппарат «Ресурс-П» // *Геоматика*. 2010. № 4. С. 23–26.
4. *Лавров В. В.* Космические съёмочные системы сверхвысокого разрешения // *Геоинформац. портал ГИС-Ассоциации*. 2010. № 2. С. 19–23.
5. *Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: Тривант, 2014. 144 с.
6. *Свиридов К. Н.* Оптическая локация космического мусора. М.: Знание, 2006. 488 с.
7. *Свиридов К. Н.* О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 20–28.
8. *Свиридов К. Н., Тюлин А. Е.* (2018а) О критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности // *Информация и Космос*. 2018. № 3. С. 143–147.
9. *Свиридов К. Н., Тюлин А. Е.* (2018б) О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // *Информация и Космос*. 2018. № 4. С. 136–142.
10. *Свиридов К. Н., Тюлин А. Е.* Новая технология оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // *Информация и Космос*. 2019. № 2. С. 118–124.
11. *Свиридов К. Н., Тюлин А. Е., Волков С. А.* (2019а) Реальное инструментальное разрешение на местности зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения // *Информация и Космос*. 2019. № 1. С. 150–156.
12. *Свиридов К. Н., Тюлин А. Е., Гектин Ю. М.* (2019б) Способ получения и обработки искажённых атмосферой изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов. Заявка на изобретение № 2019131343 от 04.10.2019, заявитель АО «Российские космические системы».
13. *Тюлин А. Е., Свиридов К. Н.* Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности. Патент РФ 2669262. Рег. 09.10.2018.
14. *Уззерелл У.* Оценка качества изображения // *Проектирование оптических систем* / под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта; пер. с англ. М.: Мир, 1983. 431 с.
15. *Хмелевской С. И.* Тенденции в развитии цифровых аэросъёмочных систем. Критерии сравнения и оценки // *Геопрофи*. 2011. № 1. С. 11–16.

New assessment of linear instrumental ground resolution of Earth remote sensing spacecraft for perfect design of its optoelectronic equipment

K. N. Sviridov¹, A. E. Tyulin¹, S. A. Pulinets^{1,2}

¹ Russian Space Systems JSC, Moscow 111250, Russia

² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: centr31@spacecorp.ru

The paper is devoted to perfect designing of optic electronic equipment (OEE) for Earth remote sensing spacecraft (ERS SC) based on criteria for assessing the limit instrumental ground resolution of ERS SC. Two criteria are considered: the well-known international criterion for assessing geometric resolution — Ground Sample Distance (GSD-criterion) and a new domestic criterion for assessing linear resolution proposed by Russian Space Systems (RSS-criterion). Results of using these two criteria were compared while designing their OEE. It was found that using GSD criterion is incorrect for designing Nyquist-matched (perfect) OEE. The OEE that does not match the Nyquist criterion reduces instrumental ground resolution of ERS SC and leads to unjustified financial losses for the customer to create a lens with a larger diameter. The paper suggests that the RSS-criterion, which is free from the disadvantages and limitations of the GSD-criterion, should be used to design OEE. Application of RSS-criterion will provide agreement of the designed OEE to the Nyquist criterion and ensure, in operation as a part of ERS SC, the possibility to achieve the diffraction limit of the linear ground resolution while compensating atmospheric distortions and using less diameter lenses with acceptable cost characteristics. This economy will in its turn make it possible to essentially increase Russian small ERS SC grouping which is necessary to improve the quality of natural and man-made disasters monitoring and forecasting. The paper gives an example of perfect OEE designing based on the RSS-criterion and its implementation under the actual usage conditions aboard small ERS SC using new technologies of distortion compensation while collecting and processing ERS images.

Keywords: geometric resolution — GSD-criterion, linear resolution — RSS-criterion, diffraction resolution, Nyquist criterion, perfect projecting of OEE for ERS SC, compensation of atmosphere distortions

Accepted: 23.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-59-67

References

1. Alekseev O. A., Razumova N. V., Tsadikovskiy E. I., Linkov A. D., *Rassmotrenie metodologii postroeniya kosmicheskoi gruppировки monitoringa dlya prognozirovaniya chrezvychainykh situatsii prirodного i tekhnogenного proiskhozhdeniya* (Considering the methodology of building space monitoring constellation for forecasting natural and anthropogenic emergencies), *Sovremennye problemy distantsionного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 29–38.
2. Zamshin V. V., *Metody opredeleniya lineinoy razreshayushchei sposobnosti opticheskikh i radiolokatsionnykh aerokosmicheskikh izobrazhenii* (Methods to define resolution capability of optical and radar location images), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2014, No. 1, pp. 43–47.
3. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Stratilatov N. R., Baklanov A. I., Fedotov V. M., Novikov N. V., *Kosmicheskii apparat "Resurs-P"* (Spacecraft "Resurs-P"), *Geomatika*, 2010, No. 4, pp. 23–26.
4. Lavrov V. V., *Kosmicheskие s'emochnye sistemy sverkhvysokого razresheniya* (Space picture-taking systems of ultrahigh resolution), *Geoinformatsionnyi portal GIS-Assotsiatsii*, 2010, No. 2, pp. 19–23.
5. Pulinets S. A., Uzunov D. P., Davidenko D. V., Dudkin S. A., Tsadikovskii E. I., *Prognoz zemletryaseniі vozmozhno?!* (Is earthquake forecasting possible?!), Moscow: Trovant, 2014, 144 p.
6. Sviridov K. N., *Opticheskaya lokatsiya kosmicheskogo musora* (Optic location of space debris), Moscow: Znanie, 2006, 488 p.
7. Sviridov K. N., *O predel'nom instrumental'nom razreshenii kosmicheskogo apparata "Resurs-P"* (No. 1, 2, 3) (About limiting instrumental resolution of spacecraft "Resurs-P" (No. 1, 2, 3)), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2017, Vol. 4, Issue 2, pp. 20–28.

8. Sviridov K. N., Tyulin A. E. (2018a), O kriteriyakh otsenki predel'nogo instrumental'nogo razresheniya kosmicheskogo apparata distantsionnogo zondirovaniya Zemli na mestnosti (About estimation criteria of limiting instrumental resolution of Earth remote sensing spacecraft on the terrain), *Informatsiya i Kosmos*, 2018, No. 3, pp. 143–147.
9. Sviridov K. N., Tyulin A. E. (2018b), O proektirovanii optiko-elektronnoi apparatury kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (About engineering electrooptical equipment for Earth remote sensing spacecraft), *Informatsiya i Kosmos*, 2018, No. 4, pp. 136–142.
10. Sviridov K. N., Tyulin A. E., Novaya tekhnologiya otsenki i maksimizatsii predel'nogo instrumental'nogo razresheniya kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (A New technology to estimate and maximize limiting instrumental resolution of Earth remote sensing spacecraft), *Informatsiya i Kosmos*, 2019, No. 2, pp. 118–124.
11. Sviridov K. N., Tyulin A. E., Volkov S. A. (2019a), Real'noe instrumental'noe razreshenie na mestnosti zarubezhnykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli sverkhvysokogo razresheniya (Real instrumental resolution of foreign Earth remote sensing spacecraft of ultrahigh resolution on the terrain), *Informatsiya i Kosmos*, 2019, No. 1, pp. 150–156.
12. Sviridov K. N., Tyulin A. E., Gektin Yu. M. (2019b), *Sposob polucheniya i obrabotki iskazhennykh atmosferoi izobrazhenii distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya malykh kosmicheskikh apparatov* (Method of acquisition and processing of Earth remote sensing images disfigured by the atmosphere for the small spacecraft), Patent application RU 2019131343 dated 04.10.2019, applicant AO "Rossiiskie kosmicheskie sistemy".
13. Tyulin A. E., Sviridov K. N., *Sposob otsenki i maksimizatsii predel'nogo instrumental'nogo razresheniya kosmicheskogo apparata distantsionnogo zondirovaniya Zemli na mestnosti* (Method of estimation and maximization of limiting instrumental resolution of Earth remote sensing spacecraft on the terrain), Patent RU 2669262, Reg. 09.10.2018.
14. Uezerell U., *Otsenka kachestva izobrazheniya. Proektirovanie opticheskikh sistem* (Estimating image quality. Optic systems projecting), R. Shannon, Dzh. Vaiant (eds.), Moscow: Mir, 1983, 431 p.
15. Khmelevskoi S. I., *Tendentsii v razvitiit tsifrovyykh aeros"emochnykh sistem. Kriterii sravneniya i otsenki* (Trends in development of digital aerospace systems. Criteria of comparison and estimation), *Geoprofi.*, 2011, No. 1, pp. 11–16.