

УДК 528.7

Об уточнении в ГОСТ определений пространственно-частотных показателей качества данных дистанционного зондирования Земли

On Elaboration in GOST Definitions of Space-Frequency Quality Indicators of Earth Remote Sensing Data

Свиридов / Sviridov K.

Константин Николаевич

(contact@spacecorp.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный изобретатель РФ.

АО «Российская корпорация ракетно-космического

приборостроения и информационных систем»,

главный научный сотрудник.

г. Москва

Ключевые слова: ГОСТы ДЗЗ – GOSTs of ERS; разрешающая способность – resolution ability; линейное пространственное разрешение – linear spatial resolution; цифровые КА ДЗЗ – digital remote sensing satellites; критерий *GSD* – *GSD* criterion; период частоты Найквиста – Nyquist frequency period; критерий РКС – RSS criterion.

Рассматриваются ГОСТы ДЗЗ. Отмечено наличие в них ошибок и противоречий. Для цифровых КА ДЗЗ уточнены определения пространственно-частотных показателей качества данных ДЗЗ, таких как «разрешающая способность» и «линейное пространственное разрешение», а также определено «предельное геометрическое разрешение» КА ДЗЗ на местности, как проекция пикселя d цифрового детектора на Землю, названное за рубежом «критерий *GSD*» (*Ground Sample Distance*). Показано, что фактическая величина инструментального «линейного пространственного разрешения» КА ДЗЗ на местности определяется проекцией периода частоты Найквиста $2d$ (двух пикселей) цифрового детектора на Землю. Эта априорная оценка качества КА ДЗЗ предложена в АО «Российские космические системы» и названа «критерий РКС». Предложено ввести критерий РКС в ГОСТ и использовать его в России для оценки качества и проектирования цифровых КА ДЗЗ.

GOSTs of ERS are considered. The presence of errors and contradictions in the GOSTs is noted. For digital remote sensing satellites, the definitions of space-frequency indicators of the quality of remote sensing data, such as "resolution ability" and "linear spatial resolution" have been clarified, and the "limit geometric resolution" of remote sensing satellites on the ground has been defined as the projection of pixel d of a digital detector onto the Earth, known in foreign literature as the *GSD* (*Ground Sample Distance*) criterion. It is shown that the actual value of the instrumental "linear spatial resolution" of the remote sensing spacecraft on the ground is determined by the projection to the Earth of the period $2d$ of the Nyquist frequency (two pixels) of the digital detector. This a priori assessment of the quality of remote sensing spacecraft was proposed by JSC Russian Space Systems and is called "the RSS criterion". It is proposed to introduce the RSS criterion into GOST and use it in Russia to assess the quality and design of digital remote sensing satellites.

Введение

Основными пространственно-частотными показателями качества данных ДЗЗ из космоса являются «разрешающая способность» и «линейное пространственное разрешение». Определения этих величин в существующих ГОСТах носят ошибочный или порой даже противоречивый характер. Ошибки в ГОСТах являются недопустимыми, так как ведут к ошибкам при разработке целевой оптико-электронной аппа-

ратуры (ОЭА) КА ДЗЗ. Обусловленное этими ошибками несовершенное проектирование ОЭА ведет к информационным и финансовым потерям создания и эксплуатации КА ДЗЗ. Ранее [1] мы уже отмечали ошибки в ГОСТах и необходимость уточнения в них определений «разрешающая способность» и «линейное пространственное разрешение». Однако, несмотря на эти замечания, в новых ГОСТах ДЗЗ присутствуют те же ошибки и противоречия. Это явилось стимулом для написания данной статьи.

ГОСТы о пространственно-частотных показателях качества данных ДЗЗ в аналоговых КА ДЗЗ

Самой грубой ошибкой в ГОСТах и в научно-технической литературе является отождествление понятий «разрешающая способность» и «разрешение». Например в ГОСТ 2653–80 [2] п. 163 написано: «Разрешающая способность фотографического материала – разрешение фотографического материала, характеризующее наибольшей пространственной частотой в фотографическом изображении резольвометрической миры, отвечающее максимуму кривой разрешения». Здесь утверждается, что «разрешающая способность» и «разрешение» – синонимы. Ошибка отождествления этих понятий в ГОСТ приводит к их отождествлению и в научно-технической литературе [3]. Разрешающая способность и пространственное разрешение – это два разных показателя качества данных ДЗЗ, имеющих разный физический смысл и размерность.

Внесем ясность в определения и размерности этих показателей качества.

Разрешающая способность

Определение разрешающей способности дано в ГОСТ 23935–79 [4] п. 107, а именно: «Разрешающая способность – характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоматериала, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуально различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста». Аналогичное определение разрешающей способности дано и в другом российском ГОСТ 2819–84 [5]: «Разрешающая способность – свойство фотографического материала разделять передавать детали объекта фотографирования, характеризующиеся наибольшей визуально различаемой пространственной частотой в изображении миры».

Как следует из этих определений, разрешающая способность имеет смысл максимальной пространственной частоты, измеряемой обычно в обратных миллиметрах $\{\text{мм}^{-1}\}$, а обратная ей величина (ее минимальный период) – линейное пространственное разрешение, имеет смысл минимального расстояния между отдельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами и измеряется в единицах длины – в изображении в $\{\text{мм}\}$, а на местности в $\{\text{м}\}$.

В отечественной теории и фотографической практике [6] «штрихи миры всегда считаются разделенными промежутками контрастного фона толщиной, равной толщине штриха». То есть здесь штрихи разделены периодом, характеризующим пространственную частоту и определяющим линейное простран-

ственное разрешение. Однако «за рубежом в стандартизованном для видео и цифровой фототехники (см., например ISO 12231, ISO 12233) термине «пара линий» за «линию» считается и промежуток между штрихами, что физически неверно, так как в этом случае пространственная частота оказывается обратной полупериоду миры» [6], но это уже не пространственная частота, характеризующая разрешающую способность, а частота дискретизации цифрового детектора КА ДЗЗ, рассматриваемая ниже.

Обозначения единиц измерения пространственной частоты довольно разнообразны [7], это «линии на миллиметр, пара линий на миллиметр, телевизионные линии на миллиметр и др. Во избежание путаницы между обычной практикой в оптике, когда под линией понимают один период и в телевидении, где период понимается как две линии, большинство современных исследователей используют термин «цикл». Один «цикл» равен одной оптической линии, одной паре линий в других приложениях, двум телевизионным линиям и одному периоду – P ».

Размерности разрешающей способности [6], выраженной в парах линий на миллиметр $\{\text{lp/mm}\}$, выраженной в линиях на миллиметр $\{\text{lines/mm}\}$ по ISO и выраженной в парах линий на миллиметр $\{\text{мм}^{-1}\}$ по ГОСТ соотносятся как

$$1 \{\text{период/мм}\} \equiv 1 \{\text{lp/mm}\} \equiv 2 \{\text{lines/mm}\} \equiv 1 \{\text{пар линий/мм}\} \equiv 1 \{\text{мм}^{-1}\} \quad (1)$$

Линейное пространственное разрешение

Правильное определение линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности дано в ГОСТ Р 59475–2021 [8], Таблице 1, п. 2.1. «Линейное разрешение на местности», где написано: «В рамках оценки качества с использованием тестовых участков линейное разрешение на местности определяется как минимальный период периодической решетки из трех и более протяженных параллельных объектов одинаковой яркости на поверхности Земли, которые отдельно различимы на данных ДЗЗ из космоса при заданном контрасте».

Аналогичное правильное определение линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности дано и в ГОСТ Р 59478–2021 [9]. Здесь в п. 3.1.3 написано: «Линейное разрешение на местности: Минимальный период периодической решетки из трех и более протяженных параллельных объектов одинаковой яркости на поверхности Земли при заданном контрасте, которые отдельно различимы или потенциально могли бы быть отдельно различимы на данных дистанционного зондирования Земли из космоса»

Однако в ГОСТ Р 59753–2021 [10], п. 85 написано: «Примечание – Линейное разрешение на местности для данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппа-

ратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, определяемое с использованием периодического тест-объекта в виде штриховой миры, соответствует величине половины минимально различимого на изображении периода тест-объекта, состоящего из как минимум трех пар протяженных полос с заданными коэффициентами спектральной яркости, коэффициентами контраста и одинаковыми геометрическими размерами, расположенными длинными сторонами вплотную друг к другу на поверхности Земли».

Очевидно, что это определение в [10] противоречит определениям в [8, 9] и является ошибочным, так как определяет линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности половиной периода штриховой миры. Это соответствует упомянутому выше зарубежному подходу к оценке разрешения шириной штриха или промежутка между штрихами, а не их суммой, определяющей период штриховой миры и характеризующей величину линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Странно, что все три ГОСТа [8, 9] и [10] разработаны в одной Организации.

Ошибочное определение линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности дано и в ГОСТ Р 70318–2022 [11] п. 3.13, в котором написано: «Линейное разрешение на местности, м: Размер элемента местности на снимке, соответствующий уверенно определяемому минимальному размеру элемента на мире».

Здесь, как и в [10], линейное пространственное разрешение ошибочно отождествляется с предельным геометрическим разрешением, определяемым половиной периода штриховой миры [1].

Аналогичное ошибочное определение линейного пространственного разрешения на местности дано ранее и в ГОСТ 23935–79 [4] п. 110, где написано: «Разрешение аэрофотоаппарата на местности: Характеристика аэрофотоаппарата, определяемая шириной черной или белой полосы такого элемента, расположенной на местности миры, изображение которого на аэрофотоснимке еще может быть дешифрировано». Это также определение предельного геометрического, а не линейного пространственного разрешения. Здесь [4] так же в п. 109 линейное пространственное разрешение в изображении ошибочно отождествляется с разрешающей способностью аэрофотоснимка: «Линейное разрешение аэрофотоснимка: Характеристика аэрофотоснимка, определяемая величиной, обратной удвоенному линейному элементу разрешения $R^* = 1/2l$ ». Вследствие многочисленных ошибок и противоречий ГОСТ 23935–79 перестал быть действующим, но рассмотрен здесь потому, что многие авторы на него ещё ссылаются.

Выше мы рассмотрели ошибки и противоречия в ГОСТах по определению пространственно-частотных показателей качества данных ДЗЗ для аналоговых

КА ДЗЗ. В связи с тем, что в настоящее время аналоговые (фотографические) КА ДЗЗ практически полностью вытеснены оптико-электронными, рассмотрим пространственно-частотные показатели качества данных ДЗЗ для цифровых КА ДЗЗ и укажем на ошибки их определения в существующих ГОСТах.

Пространственно-частотные показатели качества данных ДЗЗ в цифровых КА ДЗЗ

Ранее [1] мы отмечали, что с появлением цифровых детекторов в ДЗЗ появились и новые термины, такие как «пиксель» и «частота дискретизации». Первый из них (элемент дискретизации детектора) означает квадрат, сторона которого d равна расстоянию между центрами соседних элементов диодной линейки (матрицы). Второй термин базируется на теории информации, а в частности на теореме отсчетов, и означает частоту выборки (дискретизации), определяемую в [7] как

$$f_{1/d} = 1/d \{ \text{lines/mm} \}. \quad (2)$$

При этом вводится понятие частоты Найквиста f_N , равной половине частоты дискретизации, как

$$f_N = (1/2) \cdot f_{1/d} = 1/2d \{ \text{lp/mm} \} \equiv \{ \text{пар линий/мм} \}, \quad (3)$$

и утверждается, что при дискретизации полезного сигнала (изображения) полезную неискаженную информацию несут только те пространственные частоты, которые ниже частоты Найквиста, т. е.

$$f_M \leq f_N \{ \text{пар линий/мм} \}, \quad (4)$$

где f_M – максимальная пространственная частота в спектре полезного сигнала.

Для обозначения разрешающей способности и линейного пространственного разрешения используем латинские буквы R^* и R соответственно.

Линейное пространственное разрешение

Частота Найквиста цифрового детектора оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) КА ДЗЗ является пороговой максимальной пространственной частотой в изображении, передаваемой цифровым детектором без искажений, то есть частота Найквиста определяет разрешающую способность КА ДЗЗ в изображении

$$f_N = R^* \{ \text{пар линий/мм} \}. \quad (5)$$

Величина, обратная частоте Найквиста (период частоты Найквиста), определяет линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ в изображении как

$$R = 1/R^* = 1/f_N = 2d \{ \text{мм} \}. \quad (6)$$

Проекция периода частоты Найквиста цифрового детектора $R=2d$ на местность, предложенная в АО «Российские космические системы» [12] для оценки качества КА ДЗЗ и названная «критерий РКС», определяет фактическое инструментальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности как

$$R_{\text{PKC}} = R_{2dH/F} = 2dH / F \text{ {M}}, \quad (7)$$

где F – фокусное расстояние объектива ОЭА, а H – высота зондирования Земли.

Критерий РКС – проекция периода частоты Найквиста (двух пикселей) цифрового детектора на местность – обладает свойством априорной оценки фактического инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, обусловленного степенью согласования объектива и цифрового детектора КА ДЗЗ по критерию Найквиста. Это свойство критерия РКС экспериментально подтверждено в работе [13].

Предельное геометрическое разрешение

Сегодня наряду с рассмотренными выше пространственно-частотными показателями качества данных ДЗЗ «разрешающей способностью» и «линейным пространственным разрешением» в цифровых КА ДЗЗ используется термин «предельное разрешение», а именно: размер пикселя цифрового детектора в изображении d и/или его проекция на Землю – «предельное геометрическое разрешение» на местности, называемое GSD (*Ground Sample Distance*) и определяемое как [14]

$$R_{\text{GSD}} = R_{dH/F} = dH / F \text{ {M}}. \quad (8)$$

На основании сравнения (7) и (8) очевидно, что

$$R_{\text{PKC}} = R_{\text{ЛРМ}} = 2R_{\text{ГРМ}} = 2R_{\text{GSD}} \text{ {M}}, \quad (9)$$

откуда величина предельного геометрического разрешения на местности, определяемая критерием GSD , в 2 раза меньше величины линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, определяемого критерием РКС, то есть

$$R_{\text{GSD}} < R_{\text{PKC}} \text{ {M}}. \quad (10)$$

Согласно ограничению теории информации (4), критерий РКС определяет величину минимального фактического инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, соответствующую пороговому значению максимальной пространственной частоты – частоты Найквиста цифрового детектора. Поэтому неравенство (10) свидетельствует о том, что «критерий GSD – предельное

геометрическое разрешение КА ДЗЗ на местности не является характеристикой пространственного разрешения как способности КА ДЗЗ разделять (разрешать) близкие объекты на земной поверхности» [1].

Экспериментально это подтверждается аэрокосмическими снимками железнодорожных рельсовых путей [15], присутствующих на аэрокосмических снимках любых городов. Рельсовые пути являются удобным тест-объектом для оценки пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Экспериментально показано [15], что при расстоянии между двумя рельсами одного ж/д пути $P=1,435$ м, большем, чем $R_{\text{GSD}}=1$ м, но меньшем, чем $R_{\text{PKC}}=2$ м (рис. 10 [1]), две рельсы одного ж/д пути не разрешаются, а разрешаются они только тогда, когда расстояние между ними P больше $R_{\text{PKC}}=0,6$ м (рис. 11 [1]). Таким образом получено, что две рельсы одного ж/д пути разрешаются КА ДЗЗ, если расстояние между ними больше линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности R_{PKC} , а не предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности R_{GSD} , как многие сегодня ошибочно считают.

Фактическое инструментальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности зависит от диаметра апертуры объектива и степени согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста [7], согласно которому на дифракционный элемент разрешения объектива ОЭА в плоскости изображения (радиус диска Эри) $R_{\lambda F/D} = \lambda F / D$ должны приходиться как минимум два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора ОЭА. При наличии такого согласования достигнимо дифракционное инструментальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности, определяемое с точностью до коэффициента как

$$R_{\lambda H/D} = \lambda H / D \text{ {M}}, \quad (11)$$

где H – высота съемки, D – диаметр апертуры объектива, а λ – средняя длина волны солнечного излучения подсвета.

Заметим, что дифракционное (минимальное) инструментальное линейное пространственное разрешение (11) КА ДЗЗ на местности может быть достигнуто только при согласовании объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста.

Для оценки степени согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста введено [1] понятие коэффициента совершенства проектирования ОЭА – K как отношение частоты отсечки объектива $f_{D/\lambda F} = D / \lambda F$ к частоте Найквиста цифрового детектора $f_N = 1/2d$ в пространственно-частотной области или как отношение оценки фактического инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности – критерия РКС $R_{\text{PKC}} = R_{2dH/F}$ к дифракционному линейному простран-

ственному разрешению КА ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$ в предметной области

$$K = (D/\lambda F)/(1/2d) = (2dH/F)/(\lambda H/D) = 2dD/\lambda F \text{ {раз}}, \quad (12)$$

где $K \geq 1$.

В дальнейшем при $K > 1$ будем называть K коэффициентом несовершенства проектирования ОЭА, так как в согласованной по критерию Найквиста (совершенной) ОЭА коэффициент K равен единице ($K=1$), при этом выполняется упомянутое выше условие согласования ОЭА по критерию Найквиста

$$\lambda F/D = 2d \text{ {мм}} \quad (13)$$

и достигается дифракционный предел инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности (11).

$$R_{\text{РКС}} = R_{\lambda H/D} \text{ {м}}. \quad (14)$$

Рассмотрим другой коэффициент качества ОЭА, обозначим его K_0 , введенный в [16], как отношение критерия GSD (8) к дифракционному пределу линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности $\lambda H/D$ (11)

$$K_0 = (dH/F)/(\lambda H/D) = dD/\lambda F \text{ {раз}}, \quad (15)$$

где $K_0 \geq 1$.

Ситуация, когда $K_0=1$, представляет границу применимости критерия GSD для оценки разрешения КА ДЗЗ на местности, когда $dH/F = \lambda H/D$, так как ситуация, когда GSD становится меньше дифракционного предела ($K_0 < 1$), например в согласованной по Найквисту ОЭА [1], противоречит физическому смыслу и свидетельствует об ошибочности определения коэффициента оценки качества K_0 (15), введенного в [16].

Из сравнения (12) и (15) следует, что

$$K = 2K_0 \text{ {раз}}, \quad (16)$$

и ограничение, устанавливаемое критерием GSD на K_0 ($K_0 \geq 1$), накладывает ограничение на коэффициент несовершенства K :

$$K \geq 2 \text{ {раз}}. \quad (17)$$

Полученное ограничение (17) на совершенство ОЭА КА ДЗЗ, обусловленное использованием критерия GSD , подтверждается значениями коэффициентов несовершенства проектирования ОЭА большими двух ($K > 2$) для всех существующих КА ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения, представленных в таблице 1 [1]. Таким образом очевидно, что, используя критерий

GSD оценки инструментального предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности при проектировании ОЭА, нельзя получить коэффициент совершенства ОЭА, равным единице ($K=1$), то есть нельзя согласовать ОЭА по критерию Найквиста и достичь дифракционного линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности.

Дав здесь определения пространственно-частотных показателей качества данных ДЗЗ для цифровых КА ДЗЗ, рассмотрим их определения и наличие в существующих ГОСТах ДЗЗ.

ГОСТы о пространственно-частотных показателях качества данных ДЗЗ в цифровых КА ДЗЗ

Выше и ранее [1] мы показали, что зарубежный критерий GSD (проекция пикселя на Землю) не является характеристикой пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности. Однако вопреки этому утверждению в ГОСТ Р 59328–2021 [17] п. 3.1.11 написано: «Номинальное пространственное разрешение цифрового аэрофотоснимка: Разрешение цифрового аэрофотоснимка, характеризуемое размером проекции пикселя на среднюю плоскость земной поверхности съемочного участка». Это ошибочное определение перенесено и в ГОСТ Р 59562–2021 [18] п. 3.13. Аналогичное ошибочное мнение, что проекция пикселя на Землю характеризует пространственное разрешение на местности, написано и в ГОСТ Р 59753–2021 [10] п. 80: «Примечание.

1. Геометрическое разрешение (размер пикселя на местности) при наилучших рабочих условиях наблюдения характеризует предельно достижимое пространственное разрешение первичных данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Этот параметр включается в справочные каталоги (прайс-листы, рекламные и прочие справочные материалы) операторов космических средств дистанционного зондирования Земли при распространении данных дистанционного зондирования Земли из космоса».

Ещё одно ошибочное определение предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности дано в ГОСТ Р 70318–2022 [11] п. 3.12: «Номинальное пространственное разрешение цифрового космического или аэрофотоснимка: Разрешение цифрового фотоснимка, характеризуемое размером проекции пикселя цифрового фотоснимка на среднюю плоскость съемочного участка».

Единственное правильное определение зарубежного критерия GSD оценки предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности дано в ГОСТ Р 59832–2021 [19] п. 3.12: «Геометрическое разрешение (данные дистанционного зондирования земли из космоса): Линейное расстояние между центрами двух соседних пикселей данных дистанционного зондирования Земли из космоса, измеренное на поверхности

Земли». Это определение адаптировано из зарубежного стандарта ISO/TS 19159-1: 2014 п. 4.10 [20], соответствующего упомянутому выше зарубежному подходу к разрешению.

Существует мнение [21], что такой подход к оценке разрешения КА ДЗЗ на местности критерием GSD (8) используется для «преднамеренного завышения декларируемых технических характеристик средств ДЗЗ по сравнению с их реальными показателями», чтобы повысить конкурентоспособность продуктов ДЗЗ на потребительском рынке.

Недостатки использования зарубежного критерия GSD для оценки качества и проектирования цифровых КА ДЗЗ рассмотрены и обоснованы в работе [22].

На основании проведенного рассмотрения существующих ГОСТов для цифровых КА ДЗЗ очевидно, что предельное геометрическое разрешение (8) ошибочно отождествляется с линейным пространственным разрешением, так как реального определения линейного пространственного разрешения (7) в существующих ГОСТах просто нет. В соответствии с ограничением теоремы отсчетов теории информации (4) минимальная величина линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности определяется критерием РКС (7), а не критерием GSD (8), как многие ошибочно считают. Поэтому есть мнение о нецелесообразности использования в России зарубежного критерия GSD вообще [22], так как при оценке линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности он дает ошибочную завышенную оценку, а при проектировании ОЭА КА ДЗЗ он не позволяет согласовать объектив и цифровой детектор ОЭА КА ДЗЗ по критерию Найквиста, что ведет к несовершенному проектированию и, как следствие, приводит к информационным и финансовым потерям создания и эксплуатации КА ДЗЗ [1].

Заключение

Итак, в результате рассмотрения ГОСТов в области дистанционного зондирования Земли из космоса для аналоговых и цифровых КА ДЗЗ отмечено наличие в них ошибок и противоречий в определениях пространственно-частотных показателей качества данных ДЗЗ, таких как «разрешающая способность» и «линейное пространственное разрешение».

Для актуальных сегодня цифровых КА ДЗЗ даны и уточнены определения этих показателей качества, исключая путаницу в терминологии, а также дано определение «предельного геометрического разрешения» КА ДЗЗ на местности, введенного за рубежом и названного «критерий GSD ». Показано, что критерий GSD , определяемый проекцией пикселя цифрового детектора d на земную поверхность, не является характеристикой пространственного разрешения, а потому не может быть использован для оценки качества и проектирования КА

ДЗЗ. Во избежание информационных и финансовых потерь КА ДЗЗ, обусловленных использованием зарубежного критерия GSD , в АО «Российские космические системы» предложен и запатентован российский критерий РКС, определяемый проекцией двух пикселей $2d$ цифрового детектора ОЭА на Землю. На основании теоремы отсчетов теории информации два пикселя это период частоты Найквиста цифрового детектора $f_N = 1/2d$, определяющей разрешающую способность КА ДЗЗ в изображении, то есть максимальную пространственную частоту, передаваемую цифровым детектором без искажений с минимальным периодом $2d$, определяющим минимальное линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ в изображении. Поэтому проекция этого минимального периода на Землю – критерий РКС ($R_{\text{РКС}} = 2dH / F$) обладает свойством априорной оценки фактического инструментального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, обусловленной степенью согласования ОЭА КА ДЗЗ по критерию Найквиста [23].

Учитывая вышеизложенное, предлагаю ввести в ГОСТ для оценки качества цифровых КА ДЗЗ линейное пространственное разрешение КА ДЗЗ на местности – критерий РКС, определяемый проекцией периода частоты Найквиста $2d$ цифрового детектора КА ДЗЗ на местность ($R_{\text{РКС}} = 2dH / F$), и использовать его в России для оценки качества и проектирования цифровых КА ДЗЗ.

Литература

1. Тюлин, А. Е. Дистанционное зондирование Земли сверхвысокого линейного разрешения / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов. – Москва : Знание. – 2022. – 96 с.
2. ГОСТ 2653-80. Фотографическая сенситометрия. Термины, определения и буквенные обозначения величин. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 40 с.
3. Анিকেва, И. А. Оценка фактической разрешающей способности аэро- и космических фотоснимков по пограничной кривой / И.А. Анিকেва, С.А. Кадничанский // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78. – № 6. – С. 25–36.
4. ГОСТ 23935-79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1979. – 20 с.
5. ГОСТ 2819-84. Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.
6. Характеристика качества изображения // Zenitcamera : [сайт]. – URL : <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html> (дата обращения: 27.04.2024).
7. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения / У. Уэзерелл // Проектирование оптических систем / под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – Москва : Мир, 1983. – Глава 6. – С. 178–332.
8. ГОСТ Р 59475-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Качество данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень пока-

зателей качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 12 с.

9. ГОСТ Р 59478–2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень требований к данным дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемым с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 16 с.

10. ГОСТ Р 59753–2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Термины и определения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.

11. ГОСТ Р 70318–2022. Инфраструктура пространственных данных. Единая электронная картографическая основа. Общие требования. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 26 с.

12. Свиридов, К. Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) / К.Н. Свиридов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 20–28.

13. Свиридов, К. Н. Экспериментальное подтверждение априорных оценок инструментального и реального линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности / К.Н. Свиридов, Г.А. Ерохин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т.10, № 2. – С. 35–45.

14. Ground sample distance : Wikipedia. – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_sample_distance (дата обращения: 15.05.2024).

15. Макаров, А. Ю. Методика автоматизированного распознавания образов железнодорожных путей по данным дистанционного аэрокосмического зондирования : дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук : 25.00.35 «Геоинформатика» / Макаров Алексей Юрьевич ; Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2009. – 177 с.

16. Замечания АО «РКЦ «Прогресс» к статье «О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3)» автора К.Н. Свиридова (журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2017 г., том 4, выпуск 2, с. 20–28) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 48–51.

17. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 31 с.

18. ГОСТ Р 59562–2021. Съемка аэрофототопографическая. Технические требования. – Москва : Изд-во Стандартинформ, 2021. – 62 с.

19. ГОСТ Р 59832–2021. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Подспутниковые наблюдения. Требования к космической съемке тест-объектов в видимом и

ближнем инфракрасном диапазоне. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.

20. ISO/TS 19159–1:2014. Географическая информация. Калибровка и валидация датчиков и данных дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Оптические датчики (Geographic information – Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data – Part 1: Optical sensors). – 108 с.

21. Замшин, В. В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений / В.В. Замшин // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 43–51.

22. Свиридов, К. Н. Зарубежный критерий *GSD* – причина несовершенного проектирования малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / К.Н. Свиридов // Информация и Космос. – 2023. – № 3. – С. 118–130.

23. Свиридов, К. Н. Российский критерий оценки пространственного разрешения и проектирования цифровых аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли / К.Н. Свиридов, Ю.А. Тимофеев // Информация и Космос. – 2023. – № 4. – С. 161–170.