

## Российский критерий оценки пространственного разрешения и проектирования цифровых аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли

### Russian criterion for estimation of spatial resolution and designing of the digital aerospace systems for Earth remote sensing

**Свиридов / Sviridov K.**

Константин Николаевич  
(sviridovkn@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный изобретатель РФ.

АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»,  
главный научный сотрудник.  
г. Москва

**Тимофеев / Timofeev Yu.**

Юрий Александрович  
(timofeev@spacecorp.ru)

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник.

АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»,  
начальник экспертно-аналитического центра.  
г. Москва

Ключевые слова: разрешающая способность – resolution ability; пространственное разрешение – spatial resolution; предельное геометрическое разрешение – GSD – limiting geometric resolution – GSD; линейное пространственное разрешение – РКС – linear spatial resolution – RSS; критерий Найквиста совершенного проектирования – Nyquist criterion of perfect design.

Рассмотрены и уточнены понятия «разрешающая способность» и «пространственное разрешение» аэрокосмических систем (АКС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложено для оценки пространственного разрешения и совершенного проектирования АКС ДЗЗ использовать отечественный критерий априорной оценки фактического инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС [проектирование периода частоты Найквиста (двух пикселей) цифрового детектора на Землю], который позволяет согласовать проектируемую АКС ДЗЗ по критерию Найквиста и обеспечивает возможность достижения дифракционного разрешения АКС ДЗЗ на местности. Предложено стандартизировать отечественный критерий РКС российским ГОСТ и использовать его в России для априорной оценки пространственного разрешения и проектирования цифровых АКС ДЗЗ.

The article considers and clarifies the concepts of "resolving ability" and "spatial resolution" of aerospace systems for remote sensing of the Earth (ERS). It is proposed a Russian criterion for a priori estimation of the factual instrumental linear spatial resolution of the ERS aerospace system on the ground – the RSS criterion (the projection of two pixels – the period of the Nyquist frequency of the digital detector onto the Earth), which makes it possible at the design stage to accord the optical-electronic equipment (OEE) of the ERS system according to the Nyquist criterion and provides the ability to achieve diffraction resolution of the ERS system on the ground. It is proposed to standardize the RSS criterion with Russian GOST and use it in Russia to design the OEE of digital ERS aerospace systems and a priori evaluate their spatial resolution on the ground.

### Введение

Наиболее информативным и востребованным потребителями продуктом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является оптическое изображение зондируемого участка земной поверхности. Вследствие большого числа современных концепций оценки качества изображений [1] имеет место значительное разнообразие в их терминологии и обозначениях. Лишь тогда, когда предложены или уже существуют соответствующие стандарты, возможно некоторое единообразие. Существенное внимание в научно-технической литературе [2] уделяется оценочным характеристикам качества изображения, выражаемым одним числом. В аэрокосмических системах (АКС) ДЗЗ наибольшее распространение получили два одночисловых показателя качества: «разрешающая способность» и «пространственное разрешение». Это две разные характеристики качества, имеющие разный физический смысл и размерность. Однако в отечественной научно-технической литературе понятия «разрешающая способность» и «пространственное разрешение» часто отождествляются, что является ошибкой, вносит путаницу в рассмотрение и послужило, в частности, одним из стимулов к написанию данной статьи. Внесем ясность в определения и размерности этих характеристик качества аналоговых (фотографических) и цифровых (оптико-электронных) АКС ДЗЗ. Для обозначения разрешающей способности и пространственного разрешения будем использовать латинские буквы  $R^*$  и  $R$  соответственно.

Несмотря на то, что фотографические АКС ДЗЗ в настоящее время практически полностью вытеснены оптико-электронными, рассмотрение понятий «разрешающая способность» и «пространственное

разрешение» начнем именно с фотографических систем, так как первоначально данные характеристики были определены именно для них.

### Разрешающая способность и пространственное разрешение аналоговых АКС ДЗЗ

Проведенные исследования [2] свидетельствуют о том, что наиболее универсальным одночисловым критерием, характеризующим как качество изображения объекта, так и эффективность системы его наблюдения, является разрешающая способность. Впервые термин «разрешающая способность» был введен Рэлеем [3]. Физически под разрешающей способностью понимается свойство системы формирования изображений воспроизводить на изображении раздельно близкие мелкие детали оригинала. При этом величина, обратная разрешающей способности, называется линейным пространственным разрешением, а размер минимальной детали в изображении, которая еще может быть разрешена, называется предельным разрешением. Строгое определение разрешающей способности дано в ГОСТ [4], а именно, «Разрешающая способность – характеристика аэрофотоаппарата, ортико-фотографической системы, аэрофотоаппарата, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуальны различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста». Как следует из определений, разрешающая способность имеет смысл максимальной пространственной частоты, измеряемой обычно в обратных миллиметрах  $\{\text{мм}^{-1}\}$ , а обратная ей величина – линейное пространственное разрешение – имеет смысл минимального расстояния между раздельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами и измеряется в единицах длины, например, в миллиметрах  $\{\text{мм}\}$ .

В отечественной теории и фотографической практике [5] «штрихи миры всегда считаются разделенными промежутками контрастного фона толщиной, равной толщине штриха». То есть штрихи разделены периодом, характеризующим пространственную частоту. Однако «за рубежом в стандартизованном для видео и цифровой фототехники (см., например, ISO 12231, ISO 12233) термине «пара линий» за «линию» считается также и промежуток между штрихами, что физически неверно, так как в этом случае пространственная частота оказывается обратной полупериоду миры», но это уже не пространственная частота, определяющая разрешающую способность, а частота выборки (дискретизации) цифровых АКС ДЗЗ, рассматриваемая ниже.

Обозначения единиц измерения пространственной частоты довольно разнообразны [2]. «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 [5], выраженной в парах линий на миллиметр  $\{lp/mm\}$ , выраженной в линиях на миллиметр  $\{lines/mm\}$  по ISO и выраженной в линиях на миллиметр  $\{\text{мм}^{-1}\}$  по ГОСТ, соотносятся как

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

В общем случае под пространственной частотой  $f$ , определяющей разрешающую способность  $R^*$ , понимают величину, обратную минимальному разрешаемому периоду  $P_{\text{мин}}$  миры, содержащей периодически повторяющиеся штрихи и промежутки между штрихами [2].

В соответствии с определением пространственной частоты значение разрешающей способности можно определить по формуле

$$R^* = f_{\text{макс}} = 1 / P_{\text{мин}} = 1 / 2l_{\text{мин}} \{\text{мм}^{-1}\}, \quad (2)$$

где  $l_{\text{мин}}$  – минимальный размер разрешаемого объекта (штриха), характеризующий предельное разрешение в изображении –  $R_l = 1/l_{\text{мин}}$ , а  $P_{\text{мин}} = 2l_{\text{мин}}$  – минимальный разрешаемый период миры, обратный разрешающей способности и характеризующий линейное пространственное разрешение в изображении –  $R_p$ .

$$R_p = R = 1 / R^* = 2l_{\text{мин}} \{\text{мм}\} \quad (3)$$

Интерпретация формулы (2) очевидна, она выражает максимальную пространственную частоту с периодом, равным удвоенному значению минимальной ширины предельно разрешаемых объектов. Этот период определяет линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ (3) как ее удвоенное предельное разрешение.

Наряду с определенными выше предельным и линейным разрешениями АКС ДЗЗ в изображении существует дифракционное линейное пространственное разрешение, обратное дифракционной разрешающей способности. Для определения дифракционной разрешающей способности идеального объекта  $R_D^*$  используют [2] формулу

$$R_D^* = 1 / R_D \{\text{мм}^{-1}\}, \quad (4)$$

где  $R_D$  – радиус диска Эри объектива, определяемый как

$$R_D = 1,22\lambda F / D \{\text{мм}\}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – средняя длина волны солнечного излучения подсвета,  $D$  – диаметр апертуры объектива, а  $F$  – фокусное расстояние объектива съёмочной системы.

Радиус диска Эри (5) определяет дифракционное линейное пространственное разрешение объектива, соответствующее разрешению двух точек изображения по Рэлю. Критерий Рэля гласит, что при провале в распределении интенсивности суммарного изображения двух близких точек в 20% точки будут восприниматься раздельно, то есть будут разрешаться. Для этого необходимо, чтобы центральный максимум в изображении одной точки приходился на первый минимум другой точки (рис. 1).

Дифракционное пространственное разрешение по Рэлю есть минимальное расстояние  $R_D$  между двумя точками, при котором они разрешаются, то есть дифракционное пространственное разрешение – это линейное пространственное разрешение, оцениваемое минимальной величиной  $R_D$ , определяемой (5). Заметим, что дифракционная разрешающая способность идеального объектива (4) фактически определяет его частоту отсечки.

$$R_D^* = f_D = D / 1,22\lambda F \{ \text{пар линий} / \text{мм} \} \quad (6)$$

При выполнении космических фотосъёмочных работ и использовании материалов фотосъёмки важное значение имеют способности АКС ДЗЗ: во-первых, воспринимать близкие мелкие детали ландшафта земной поверхности раздельно и, во-вторых, воспроизводить эти мелкие детали местности.

Количественно эти способности оцениваются соответственно:

– во-первых, линейным пространственным разрешением АКС ДЗЗ на местности  $L$ , связанным с разрешающей способностью в изображении  $R^*$  соотношением

$$L = (1 / R^*) H / F \{ \text{м} \}, \quad (7)$$

а с учетом (2), определяемым соотношением

$$L = (2l) H / F \{ \text{м} \}, \quad (8)$$

и, во-вторых, предельным разрешением на местности – минимальным размером детали объекта на местности  $A$ , которая может быть наблюдаема с помощью данной АКС ДЗЗ

$$A = (1 / 2R^*) H / F = l H / F \{ \text{м} \}, \quad (9)$$

где  $H$  – высота космической фотосъёмки в надир {км},  $R^*$  – разрешающая способность АКС ДЗЗ в изображении, определяемая (2), {мм<sup>-1</sup>},  $F$  – фокусное расстояние объектива АКС ДЗЗ {м},  $l$  – размер минимальной (предельно разрешимой) детали объекта в изображении {мм}, а  $2l$  – линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ в изображении {мм}.

### Разрешающая способность и пространственное разрешение цифровых АКС ДЗЗ

В последние годы широкое применение в ДЗЗ диодных линеек и матриц в качестве приемников изображения привело к появлению новых терминов, таких как «пиксель» и «частота дискретизации» [2]. Первый из них (элемент дискретизации) 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 выборки, и означает частоту дискретизации, определяемую как

$$f_{1/d} = 1 / d \{ \text{lines} / \text{mm} \} \quad (10)$$

На рис. 2 представлена блок-схема оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) цифровой АКС ДЗЗ. Здесь  $D$  и  $F$  – диаметр апертуры и фокусное расстояние объектива ОЭА соответственно, а  $d$  – размер пикселя матрицы цифрового детектора.

Совершенное проектирование ОЭА подразумевает определение величин  $D$ ,  $F$  и  $d$ , обеспечивающих согла-

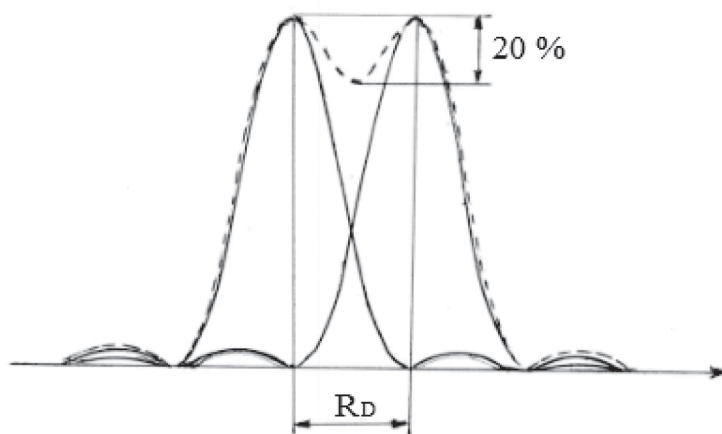


Рис. 1. Пространственное разрешение по Рэлю

сование объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста для достижения дифракционного предела инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. Информационный критерий Найквиста [2] устанавливает условие согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по разрешению, а именно, требует, «чтобы на дифракционный элемент разрешения объектива в фокальной плоскости (радиус диска Эри)  $R_{\lambda F/D} = \lambda F / D$  приходилось, как минимум, два элемента разрешения (пикселя)  $2d$  цифрового детектора». При этом вводится понятие частоты Найквиста  $f_N = f_{\lambda d} / 2$ , равной половине частоты дискретизации цифрового детектора (10), и утверждается, что «при дискретизации аналогового сигнала неискаженную полезную информацию несут только пространственные частоты  $f$ , которые ниже частоты Найквиста ( $f < f_N$ )». Отсюда очевидно, что максимальная пространственная частота сформированного изображения, передаваемая цифровым детектором, ограничена его разрешающей способностью – частотой Найквиста  $f_N = 1/2d$  с периодом  $2d$ , определяющим минимальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ в изображении. В согласованной по Найквисту (совершенной) ОЭА частота Найквиста цифрового детектора  $f_N$  должна совпадать с частотой отсечки объектива  $f_{D/\lambda F} = D / \lambda F$ . В случаях такого совпадения имеем

$$f_N = 1/2d = D / \lambda F = f_{D/\lambda F} \text{ \{пар линий/мм\}} \quad (11)$$

откуда получаем

$$\lambda F / D = 2d \text{ \{мм\}}, \quad (12)$$

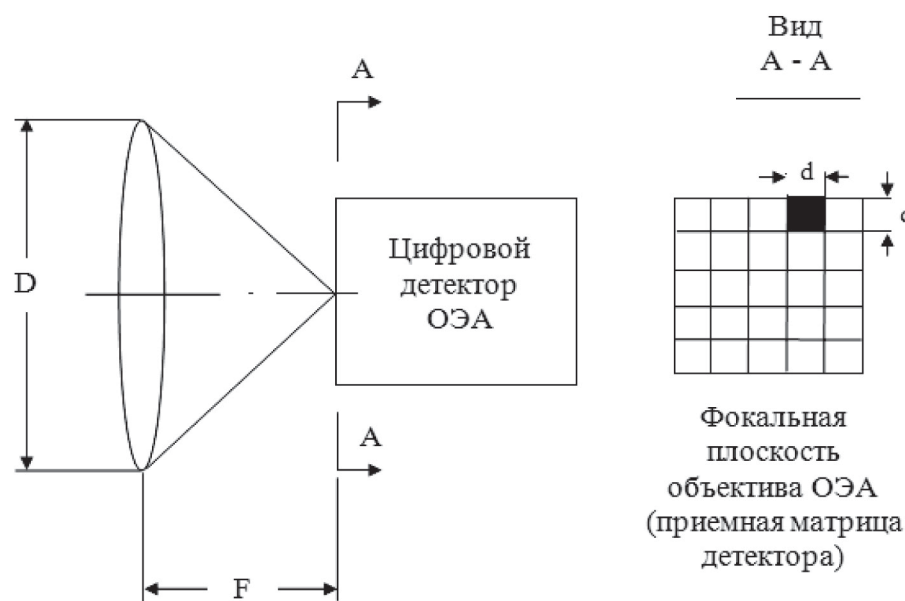


Рис. 2. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) аэрокосмической системы дистанционного зондирования Земли (АКС ДЗЗ)

а это и есть условие согласования ОЭА по критерию Найквиста.

При проектировании АКС ДЗЗ наибольший интерес представляют критерии априорной оценки «разрешающей способности» и «пространственного разрешения» вновь создаваемых съемочных систем. Рассмотрим использование этих одночисловых характеристик для априорной оценки (прогнозирования) качества цифровых АКС ДЗЗ.

### Предельное геометрическое разрешение АКС ДЗЗ на местности – критерий $GSD$

Сегодня [6] в качестве характеристики пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ на местности ошибочно используется предельное геометрическое разрешение, а именно, размер проекции пикселя цифрового детектора на местность, называемое «критерий  $GSD$ » [7] и определяемое как

$$R_{GSD} = R_{dH/F} = dH / F \text{ \{м\}} \quad (13)$$

Наиболее четко данная тенденция прослеживается в информационном поле, охватывающем космические оптические системы ДЗЗ. Здесь в ТЗ (ТТЗ) на разработку и в спецификациях к космическим оптическим системам ДЗЗ в качестве пространственного разрешения указывается размер проекции пикселя на Землю, то есть предельное геометрическое разрешение –  $GSD$  (13).

Рассмотрим этот ошибочный подход к определению пространственного разрешения и покажем неправомерность его использования для оценки способности



АКС ДЗЗ разделять (разрешать) близкие объекты и/или их детали на зондируемом участке земной поверхности, то есть оценивать пространственное разрешение АКС ДЗЗ.

Прохождение сигналов через звенья оптико-электронной системы сопровождается их преобразованием из аналоговой формы в цифровую (дискретную) форму. Под дискретизацией понимают представление непрерывного аналогового сигнала совокупностью отсчетов-выборок [8]. В соответствии с теоремой Котельникова [9] (Найквиста [10], Шеннона [11]) любую непрерывную функцию с ограниченным спектром, занимающим полосу, например, от 0 до  $f_N$ , можно представить с помощью ее дискретных значений, взятых через равные интервалы  $\Delta X$  с частотой выборки (дискретизации)  $f_{1/\Delta X} = 1/\Delta X$ , где  $f_{1/\Delta X} = 2f_N$ . Реально любая непрерывная функция представима рядом Котельникова с некоторой погрешностью, обусловленной различными факторами, основным из которых является конечная длительность сигналов. Из-за конечной длительности реальных сигналов их частотные спектры бесконечны, а теорема требует ограничения частотного спектра, например частотой Найквиста  $f_N$ .

Рассмотрим теорему Котельникова, введенную для временных сигналов, с точки зрения дискретизации пространственного распределения интенсивности изображения, получаемого в цифровых АКС ДЗЗ. В этом случае размер проекции пикселя  $d$  на местность (13)  $\Delta X = R_{dH/F} = dH/F$  ( $GSD$ ) можно считать элементом дискретизации на местности. Тогда  $f_{1/\Delta X} = 1/\Delta X$  – частота дискретизации на местности, а разрешающая способность цифровых АКС ДЗЗ на местности  $R^*$  определяется проекцией частоты Найквиста (разрешающей способности) цифрового детектора  $f_N^* = 1/2d$  на местность, с периодом дискретизации  $2\Delta X$ , определяющим линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности. При этом системой без искажений могут быть переданы только пространственные частоты  $f$ , не превышающие максимальную пространственную частоту  $R^*$

$$f < R^* = 1/2\Delta X \text{ \{пар линий/мм\}} \quad (14)$$

с минимальным периодом  $2\Delta X$ .

Это означает, что расстояние между двумя точками на Земле для их отдельного восприятия (разрешения) должно быть больше  $2\Delta X$ , а не  $\Delta X$  ( $GSD$ ), как многие ошибочно считают, и это важно для картографии и других задач ДЗЗ сверхвысокого разрешения! Этот результат свидетельствует о том, что предельное геометрическое разрешение  $GSD$ , как проекция пикселя  $d$  на Землю,  $\Delta X$  (13), ошибочно отождествляемое с пространственным разрешением цифровых АКС ДЗЗ, нельзя воспринимать в том смысле, что объекты или их детали, находящиеся друг от друга на расстоянии  $\Delta X$ , будут восприниматься отдельно, то есть разрешаться. Экспери-

ментально это подтверждается аэрокосмическими изображениями железнодорожных рельсовых путей [12], повсеместно присутствующих на аэрокосмических изображениях любых городов. Рельсовые пути являются удобным тест-объектом для оценки качества – пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. При расстоянии между двумя рельсами  $P$ , большем, чем  $\Delta X$  ( $GSD$ ), но меньшем, чем  $2\Delta X$  ( $P < 2\Delta X$ ) две рельсы одного ж/д пути не разрешаются, а разрешаются они только тогда, когда  $P > 2\Delta X$ . Результаты этого эксперимента [12] представлены на рис. 4а и рис. 4б. Это подтверждает тот факт, что критерий  $GSD$  не является характеристикой пространственного разрешения.

Критерий  $GSD$  (13) оценки предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ с появлением цифровых детекторов: сначала за рубежом, где он был назван *Ground Sample Distance* ( $GSD$ ) [13], а впоследствии без каких-либо обоснований правомерности его использования и вопреки российским ГОСТ он был принят и в российской практике ДЗЗ [14]. Эксперименты по оценке пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности в оптическом и радиодиапазонах длин волн свидетельствуют о том, что в действительности размер проекции пикселя на Землю ( $GSD$ ) всегда меньше реального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности [6]. Однако вопреки результатам многочисленных экспериментов на практике имеет место ошибочное отождествление понятия предельного геометрического разрешения с понятием линейного пространственного разрешения. Существует мнение [6], что «...такой подход к оценке пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности критерием  $GSD$  используется для преднамеренного завышения декларируемых технических характеристик средств ДЗЗ по сравнению с их реальными показателями, чтобы повысить конкурентоспособность продуктов ДЗЗ на потребительском рынке».

За рубежом введение в практику ДЗЗ критерия  $GSD$  было связано с упомянутыми выше зарубежными стандартами разрешения, в соответствии с которыми за величину пространственного разрешения в изображении, как и на местности, принимается одна линия (светлая или темная) штриховой миры, а не ее период, требуемый для оценки пространственного разрешения российским ГОСТ [15].

Предельное геометрическое разрешение на местности  $GSD$  фактически характеризует минимальный размер объекта, наблюдаемого АКС ДЗЗ на зондируемой земной поверхности, а не минимальное расстояние между двумя отдельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами. Таким образом очевидно, что предельное геометрическое разрешение характеризует «резкость» изображения, а не разрешающую способность и/или пространственное разрешение, и потому не может быть использовано для оценки

пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ.

**Линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС**

В соответствии с проведенным выше анализом очевидно, что пространственное разрешение цифровых АКС ДЗЗ на местности определяется линейным пространственным разрешением как величиной обратной разрешающей способности, то есть оно определяется проекцией периода частоты Найквиста на местность как

$$2\Delta X = R_{2dH/F} = 2dH / F = R_{\text{РКС}} \text{ {м}} \quad (15)$$

Полученное выражение для оценки линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности, как проекции двух пикселей (периода частоты Найквиста) цифрового детектора  $2d$  на зондируемую земную поверхность  $R_{2dH/F}$ , есть новый критерий оценки (критерий РКС), интуитивно предложенный [16] и запатентованный [17] АО «Российские космические системы», что отражено в его названии. Здесь он получен на основании того, что период дискретизации цифрового детектора, как и его проекция на зонди-

руемую земную поверхность, для цифровых изображений ДЗЗ эквивалентен периоду штриховой миры, используемой при определении линейного разрешения на местности для аналоговых систем ДЗЗ в соответствии с действующим российским стандартом оценки разрешения [15]. На основании сравнения (13) и (15) очевидно, что

$$R_{\text{РКС}} = R_{\text{ЛРМ}} = 2R_{\text{ГРМ}} = 2R_{\text{GSD}} \text{ {м}}, \quad (16)$$

то есть линейное пространственное разрешение на местности, определяемое критерием РКС, в 2 раза больше (хуже) предельного геометрического разрешения на местности, определяемого критерием GSD.

На рис. 3 дана иллюстрация критериев оценки предельного – GSD, и линейного – РКС разрешений АКС ДЗЗ на местности.

При  $GSD \geq 0,5 \text{ м}$  ( $\text{РКС} \geq 1 \text{ м}$ ) на всех полученных из космоса изображениях городов, содержащих ж/д рельсовые пути, две рельсы одного ж/д пути не разрешаются, а сливаются в одну линию, хотя расстояние между рельсами для разных государств  $P \sim 1,4 \text{ м} \div 1,7 \text{ м}$ , и только линии встречных и попутных ж/д путей разрешаются, но между ними  $\sim 4,0 \text{ м} \div 5,0 \text{ м}$  (рис. 4а) [12]. На рис. 4б представлено изображение тех же

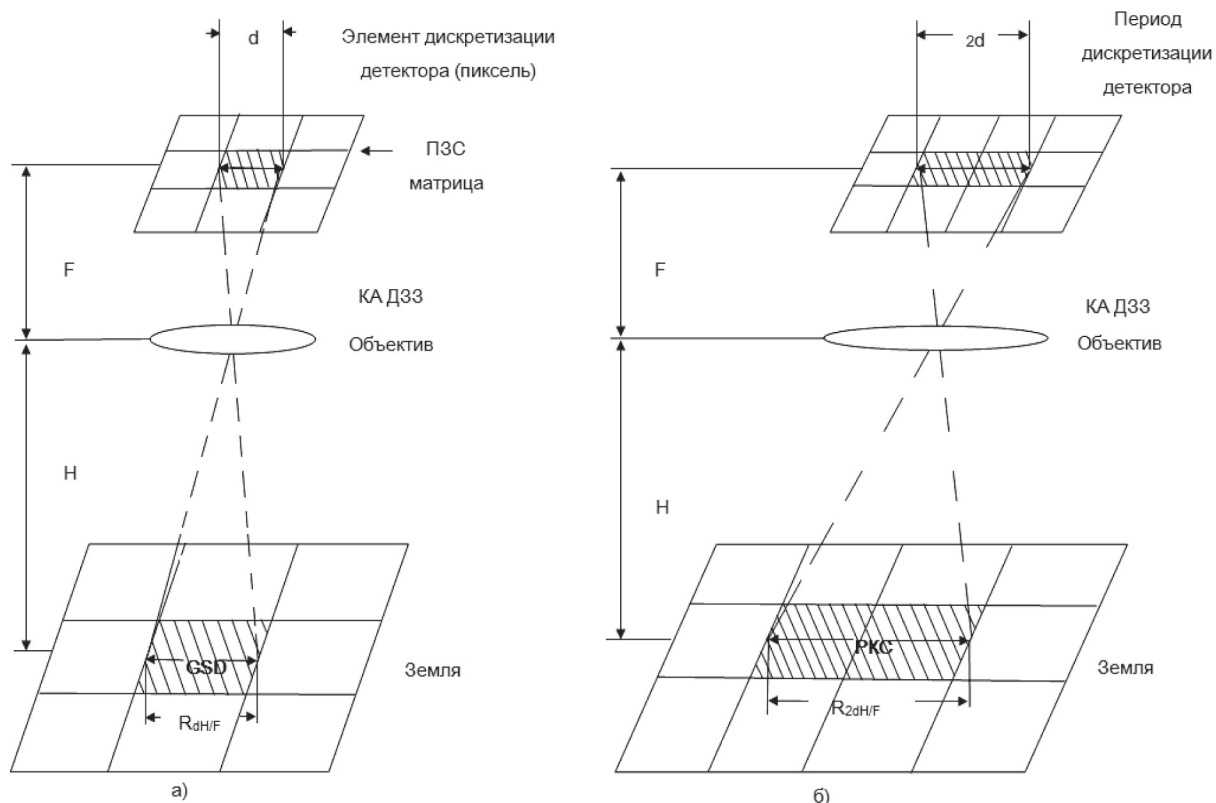
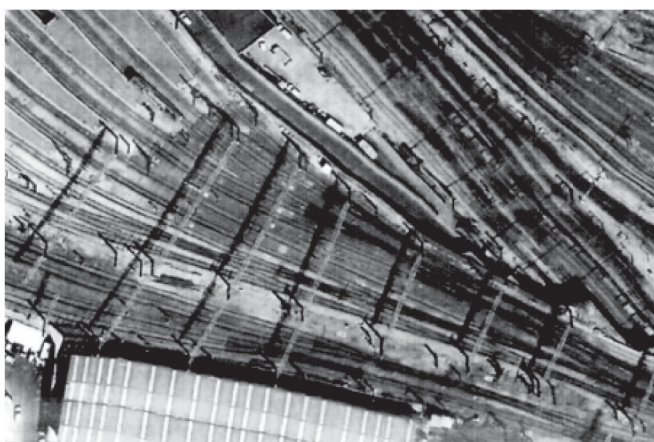


Рис. 3. Оценки инструментального разрешения АКС ДЗЗ на местности:  
 а) предельного геометрического – критерий GSD  
 б) линейного пространственного – критерий РКС



а) предельное геометрическое разрешение  $GSD = 1$  метр



б) предельное геометрическое разрешение  $GSD = 0,3$  метра

Рис. 4. Космический (а) и аэро (б) снимки железнодорожного вокзала Мадрида [12]

ж/д путей (в левом верхнем углу), полученное аэро-съемкой с предельным геометрическим разрешением  $GSD=0,3$  м, что эквивалентно (16) линейному пространственному разрешению  $PKC=0,6$  м.

Видно, что при таком разрешении две рельсы одного ж/д пути пространственно разрешаются, так как каждая рельса имеет минимальный размер предельного геометрического разрешения  $GSD=0,3$  м, а европейское расстояние между рельсами  $P=1,435$  м больше линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности  $PKC=0,6$  м и больше их суммы  $GSD+PKC=0,9$  м.

На основании проведенного рассмотрения можно считать, что АКС ДЗЗ, разрешающие две рельсы одного ж/д пути, являются АКС ДЗЗ сверхвысокого линейного пространственного разрешения, когда  $R_{PKC} < 1$  м ( $R_{GSD} < 0,5$  м). К таким АКС ДЗЗ можно отнести 4 КА ДЗЗ из таблицы, представленной ниже: *WorldView* – 1,2,3 и *GeoEye* – 1, а все остальные КА ДЗЗ имеют

реальное инструментальное линейное пространственное разрешение на местности [19]  $R_{PKC} \geq 1$  м ( $R_{GSD} \geq 0,5$  м) и не являются КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения.

Наряду с рассмотренными критериями оценки предельного и линейного разрешений цифровых АКС ДЗЗ на местности, существует дифракционный предел линейного пространственного разрешения, который определяет потенциальные возможности по достижению пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности в соответствии с известной формулой, аналогичной (5), как

$$R_{\lambda,H/D} = \lambda H / D \text{ {м}}, \quad (17)$$

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

Заметим, что дифракционный предел пространственного разрешения (17) в ОЭА АКС ДЗЗ может



быть достигнут только при согласовании объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста, упоминавшемуся выше (12) и рассматриваемому ниже.

**Критерий Найквиста и коэффициент совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ**

Для оценки степени согласования объектива и цифрового детектора проектируемой ОЭА по критерию Найквиста введено [17] понятие коэффициента совершенного проектирования ОЭА –  $K$  как отношение частоты отсечки объектива  $f_{D/\lambda F} = D/\lambda F$  к частоте Найквиста цифрового детектора  $f_N = 1/2d$ , или как отношение оценки реального инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерия РКС  $R_{PKC} = R_{2dH/F}$  к дифракционному линейному пространственному разрешению АКС ДЗЗ на местности  $R_{\lambda H/D}$

$$K = (D/\lambda F)/(1/2d) = (2dH/F)/(\lambda H/D) = 2dD/\lambda F \text{ {раз}}, \tag{18}$$

где  $K \geq 1$ .

В дальнейшем при  $K > 1$  будем называть  $K$  коэффициентом несовершенного проектирования ОЭА, так как в согласованной по критерию Найквиста

(совершенной) ОЭА коэффициент  $K$  равен единице ( $K=1$ ), при этом выполняется условие согласования (12), и

$$R_{PKC} = R_{\lambda H/D} \text{ {м}}, \tag{19}$$

то есть достигается дифракционный предел инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности.

Рассмотрим другой коэффициент качества ОЭА, обозначим его  $K_o$ , введенный в [16\*], как отношение критерия  $GSD$  (13) оценки предельного геометрического разрешения к дифракционному линейному пространственному разрешению АКС ДЗЗ на местности  $\lambda_{H/D}$  (17)

$$K_o = dH/F/\lambda H/D = dD/\lambda F \text{ {раз}}, \tag{20}$$

где  $K_o \geq 1$ .

Ситуация, когда  $K_o=1$ , представляет границу применимости критерия  $GSD$  для оценки разрешения АКС ДЗЗ на местности, когда  $dH/F=\lambda H/D$ , так как ситуация, когда  $GSD$  становится меньше дифракционного предела ( $K_o < 1$ ), например, в согласованной по Найквисту ОЭА [17], противоречит физическому смыслу и свидетельствует об ошибочности определения  $K_o$  (20), данного в [16\*].

Таблица

**Несовершенное проектирование ОЭА КС ДЗЗ на базе критерия GSD (K>2)**

| № п/п | Наименование КС ДЗЗ | Параметр                  |                         |                             |  |
|-------|---------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|--|
|       |                     | Диаметр объектива $D$ {м} | Фокус объектива $F$ {м} | Пиксель детектора $d$ {мкм} | $K=2dD/\lambda F$ {раз} ( $\lambda=0.55\text{мкм}$ ) |
| 1     | IKONOS-2            | 0,7                       | 10                      | 12                          | 3,0  |
| 2     | QuikBird-2          | 0,6                       | 8,8                     | 12                          | 2,95   |
| 3     | OrbView-3           | 0,45                      | 3,0                     | 6                           | 3,29   |
| 4     | EROS-B              | 0,5                       | 5,0                     | 7                           | 2,56   |
| 5     | Cartosat-2          | 0,7                       | 5,6                     | 7                           | 3,2  |
| 6     | WorldView-1         | 0,6                       | 8,8                     | 8                           | 2,32   |
| 7     | GeoEye-1            | 1,1                       | 13,3                    | 8                           | 2,4  |
| 8     | WorldView-2         | 1,1                       | 13,3                    | 8                           | 2,4  |
| 9     | Pleiades-1          | 0,65                      | 12,9                    | 13                          | 2,39   |
| 10    | WorldView-3         | 1,1                       | 13,3                    | 6,7                         | 2,01   |
| 11    | Ресурс-ДК1          | 0,5                       | 4,0                     | 9                           | 4,09   |
| 12    | Ресурс - П          | 0,5                       | 4,0                     | 6                           | 2,73   |



Из сравнения (18) и (20) следует, что

$$K = 2K_o \text{ {раз}} \quad (21)$$

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

$$K \geq 2 \text{ {раз}} \quad (22)$$

Полученное ограничение (22) на несовершенство ОЭА АКС ДЗЗ, обусловленное использованием критерия  $GSD$ , подтверждается значениями коэффициентов несовершенного проектирования ОЭА, большими двух ( $K > 2$ ), для всех существующих АКС ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения [18, 19, 20], представленных в таблице.

Отсюда видно в подтверждение вышесказанного, что, используя критерий  $GSD$  для оценки инструментального пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности при проектировании ОЭА, нельзя получить коэффициент совершенного проектирования ОЭА, равным единице ( $K=1$ ), то есть нельзя согласовать ОЭА по критерию Найквиста и достичь дифракционного линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности.

Проведенные исследования последствий несовершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия  $GSD$  [21] показали, что несовершенное проектирование с коэффициентом несовершенства большем единицы ( $K > 1$ ) ведет к информационным потерям разрешения АКС ДЗЗ в  $K$  раз и к финансовым потерям создания АКС ДЗЗ в  $K^\beta$  раз, где  $\beta$  – показатель степени масштабного закона стоимости ( $2 \leq \beta \leq 3$ ).

Для предотвращения информационных и финансовых потерь цифровых АКС ДЗЗ [21] из-за несовершенного проектирования их ОЭА на базе предельного геометрического разрешения – критерия  $GSD$ , были предложены и исследованы новые технологии совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе линейного пространственного разрешения – критерия РКС [22, 23, 24, 25].

## Заключение

Итак, в результате проведенных исследований и с учетом результатов работ авторов, представленных в цитируемой литературе, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее универсальным одночисловым критерием, характеризующим как качество изображения объекта, так и эффективность АКС ДЗЗ его наблюдения, является разрешающая способность. При этом величина, обратная разрешающей способности, является линейным пространственным разрешением, а размер минимальной детали в изображении, которая еще может быть разрешена, является предельным

разрешением. Разрешающая способность выражает максимальную пространственную частоту с периодом, который определяет линейное пространственное разрешение аналоговых и цифровых АКС ДЗЗ как удвоенную величину предельного разрешения.

2. Зарубежный критерий оценки предельного геометрического разрешения цифровых АКС ДЗЗ на местности – критерий  $GSD$ , является некорректным для оценки пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности, а его использование при проектировании ОЭА препятствует согласованию объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста, устанавливая ограничение на коэффициент несовершенства проектируемой ОЭА –  $K$  предельной величиной, равной двум ( $K=2$ ), что делает невозможным достижение дифракционного линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. Сегодня все существующие АКС ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения, спроектированные на базе критерия  $GSD$ , имеют коэффициент несовершенства ОЭА, больший двух ( $K > 2$ ), что свидетельствует о их несовершенстве.

3. Для априорной оценки разрешения, проектируемой АКС ДЗЗ на местности, необходимо использовать отечественный критерий оценки инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС – проекцию периода частоты Найквиста (двух пикселей) цифрового детектора на зондируемую земную поверхность ( $R_{\text{PKC}} = 2dH/F$ ).

4. Предельное геометрическое разрешение  $GSD$ , определяемое как проекция пикселя  $d$  на Землю, ошибочно отождествляемое с пространственным разрешением цифровых АКС ДЗЗ на местности, нельзя понимать в том смысле, что объекты или их детали, находящиеся друг от друга на расстоянии –  $GSD$  будут восприниматься отдельно, то есть разрешаться. Расстояние между двумя точками на Земле для их отдельного восприятия (разрешения) должно быть больше или равно  $2GSD = \text{PKC}$ , а не  $GSD$ , как многие ошибочно считают. Фактически в ДЗЗ предельное разрешение характеризует резкость изображения, а не разрешающую способность и/или пространственное разрешение, и потому не может быть использовано для оценки пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ.

5. Во избежание дальнейшего ошибочного использования в РФ [16\*] зарубежного критерия оценки предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности – критерия  $GSD$ , в АО «Российские космические системы» предложен [16] и запатентован [17] российский критерий оценки реального инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС, который целесообразно стандартизовать российским ГОСТ и использовать для оценки пространственного разрешения и проектирования цифровых АКС ДЗЗ.

6. Российский критерий РКС является примером эффективного импортозамещения в ДЗЗ зарубежного критерия *GSD*.

### Литература

1. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – Москва : Наука. – 1973. – 720 с.

2. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения. Проектирование оптических систем / У. Уэзерелл ; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – Москва : Мир, 1983. – 431 с.

3. Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис. – Москва : Мир. – 1971. – 496 с.

4. ГОСТ 23935–79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1979. – 20 с.

5. Характеристика качества изображения // Zenitcamera : [сайт]. – URL: <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html> (дата обращения: 10.10.2022).

6. 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.

7. Лавров, В. В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения / В.В. Лавров // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. – 2010. – № 2. – С. 19–24.

8. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. – Москва : Мир, 1970. – 386 с.

9. Котельников, В. А. О пропускной способности «эффира» и проволоки в электросвязи / В.А. Котельников // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770.

10. Nyquist, H. Certain topics in telegraph transmission theory / H. Nyquist // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1928. – Vol. 47, No. 2. – P.617–644.

11. Shannon, C. E. Communication in the presence of noise / C.E. Shannon // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. – 1949. – Vol. 37, No. 1. – P. 10–21.

12. Макаров, А. Ю. Методика автоматизированного распознавания образов железнодорожных путей по данным дистанционного аэрокосмического зондирования : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.35 «Геоинформатика» / Макаров Алексей Юрьевич ; МИИТ. – Москва, 2009. – 177с.

13. Ground sample distance [Электронный ресурс] : Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground\\_sample\\_distance](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_sample_distance) (дата обращения: 02.08.2023).

14. Хмелевской, С. И. Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. Критерии сравнения и оценки / С.И. Хмелевской // Геопрофи. – 2011. – № 1. – С. 11–16.

15. ГОСТ 15114–78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. – Москва : Издательство стандартов, 1978. – 6 с.

16. 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, Вып. 2. – С. 20–28.

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, Вып. 1. – С. 48–51.

17. Патент № 2669262. Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности ; № 2017144878 : заявл. 20.12.2017 : опубл. 09.10.2018 / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов ; правообладатель и заявитель АО «Российские космические системы». – 23 с.

18. Image of the day // Satellite imaging corporation : [сайт]. – URL: <http://www.satimagingcorp.com> (дата обращения: 10.10.2022).

19. Свиридов, К. Н. Реальное инструментальное разрешение на местности зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, С.А. Волков // Информация и Космос. – 2019. – № 1. – С.150–159.

20. Кучейко, А. WorldView-3: коммерческий спутник достиг разрешения 30 см / А. Кучейко // Новости космонавтики. – 2014. – № 10 (381), Т. 24. – С. 23–25.

21. Тюлин, А. Е. Информационные и финансовые потери несовершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов // Информация и Космос. – 2020. – № 1. – С. 152–160.

22. Свиридов, К. Н. О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Информация и Космос. – 2018. – № 4. – С. 136–145.

23. Свиридов, К. Н. Новая технология оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на местности / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Информация и Космос. – 2019. – № 2. – С. 118–124.

24. Патент № 2730886. Способ достижения дифракционного предела разрешения изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов ; № 2019131343 : заявл. 04.10.2019 : опубл. 26.08.2020 / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, Ю.М. Гектин ; патентообладатель АО «Российские космические системы». – 35 с.

25. Свиридов, К. Н. Технологии достижения дифракционного разрешения изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, Ю.М. Гектин // Информация и Космос. – 2021. – № 1. – С. 160–177.