

О разрешающей способности и пространственном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли

On the resolving power and spatial resolution of aerospace Earth remote sensing systems

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

Тюлин / Tyulin A.

Андрей Евгеньевич

(tyulin@spacecorp.ru)

доктор экономических наук, кандидат технических

наук, профессор, член-корреспондент РАН.

АО «Российская корпорация ракетно-космического

приборостроения и информационных систем»,

генеральный директор.

г. Москва

Ключевые слова: разрешающая способность – resolution; 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 for perfect design.

Рассмотрены понятия «разрешающая способность» и «пространственное разрешение» аналоговых и цифровых аэрокосмических систем (АКС) ДЗЗ. Показано, что повсеместно используемый зарубежный критерий оценки предельного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий GSD не является характеристикой пространственного разрешения, и его использование при проектировании АКС ДЗЗ препятствует согласованию объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста, приводя к информационным и финансовым потерям. Отмечено, что критерий GSD определяет минимальный размер объекта, воспринимаемого АКС ДЗЗ на земной поверхности, то есть характеризует «резкость» изображения, а не минимальное расстояние между двумя разделяемо наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами, характеризующее пространственное разрешение. Предложено для оценки пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ использовать отечественный критерий оценки линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС, который дает реальную оценку пространственного разрешения, позволяет согласовать проектируемую АКС ДЗЗ по критерию Найквиста и обеспечивает возможность достижения дифракционного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. Во избежание дальнейшего ошибочного использования в РФ зарубежного критерия GSD предложено стандартизировать отечественный критерий РКС российским ГОСТ и использовать его для оценки пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ.

The concepts of resolving power and spatial resolution of analog and digital ERS aerospace systems are considered. It is shown that the widely used foreign criterion for assessing the limiting resolution of aerospace ERS systems on the terrain, the GSD criterion, is not a characteristic of spatial resolution, and its use in the design of ERS systems prevents the lens and digital detector from being matched according to the Nyquist criterion, leading to data and financial losses. It is noted that the GSD criterion determines the minimum size of an object perceived by the remote sensing system on the earth's surface. It characterizes the "sharpness" of the image, and not the minimum distance between two separately observed (resolvable) objects, which characterizes the spatial resolution. It is proposed to use a Russian criterion for assessing the linear spatial resolution of aerospace ERS systems on the terrain to assess the spatial resolution and efficiency of design of a system, the RSS criterion, which gives a real assessment of the spatial resolution, allows the projected ERS system to be matched according to the Nyquist criterion and provides the possibility of achieving the diffraction spatial resolution of aerospace ERS systems on the ground. In order to avoid further erroneous use of the foreign GSD criterion in the Russian Federation, it is proposed to standardize the domestic RSS criterion with a Russian State Standard and use for assessment of spatial resolution and design of remote sensing systems.

Введение

Наиболее информативным и востребованным потребителями продуктом ДЗЗ является оптическое изображение зондируемого участка земной поверхности. Для оценки качества изображений существует множество критериев [1]. Вследствие большого числа современных концепций оценки качества изображений имеет место значительное разнообразие в их терминологии и обозначениях. Лишь тогда, когда предложены или уже существуют соответствующие стандарты, возможно некое единообразие. В остальных случаях правилом является не всегда обоснованное навязывание отдельными авторами своих точек зрения и привычек. Это касается и критериев оценки качества изображений. 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, например в [3], и даже в ГОСТ [4] 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 определялись 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 [5]. Физически под разрешающей способностью понимается свойство системы формирования изображений воспроизводить на изображении отдельно 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 [6], а именно: «Разрешающая способность – характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоаппарата, 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». Сегодня этот ГОСТ не является действующим. Аналогичное определение разрешающей способности дано и в другом (действующем) российском ГОСТ [7]: «Разрешающая способность – свойство фотографического материала разделять детали объекта фотографирования, характеризуемые наибольшей визуально различимой пространственной частотой в изображении миры».

Здесь [7] также стандартизованы термины «пространственная частота» и «мира»: «Пространственная частота – число периодов синусоидального или иного периодического распределения интенсивности излучения, приходящееся на единицу длины», а «Мира – тест-объект, содержащий набор групп штрихов-решеток постоянного контраста с закономерно изменяющейся пространственной частотой».

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 отдельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами, измеряемого в единицах длины. Достоинством критерия разрешающей способности [8] является то, что «эта характеристика достаточно наглядна и включает в себя пороговые свойства зрительного анализатора».

В аэрокосмической фотосъемке наиболее часто используются штриховые прямоугольные миры, представленные на рис. 1.

В отечественной теории и фотографической практике [9] «штрихи миры всегда считаются разделенными промежутками контрастного фона, толщиной равной толщине штриха». То есть штрихи («линии») 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], 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 [9], выраженной в парах линий на миллиметр $\{lp/mm\}$, выраженной в линиях на миллиметр $\{lines/mm\}$ по ISO и выраженной в линиях на миллиметр $\{мм^{-1}\}$ по ГОСТ соотносятся, как

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

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

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

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

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

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

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.

Обращаясь к определению разрешающей способности, данному в ГОСТ [7], и учитывая выражение (2), можно говорить о том, что объекты (детали) на изображении будут разрешаемы (наблюдаться отдельно) пока их пространственная частота не превысит разрешающую способность R^* , то есть можно утверждать, что совокупность малых объектов (деталей) с относительно высоким уровнем яркости в изображении разрешится только при условии, что расстояние между ними будет больше или равно $R = 1/R^* = 2l_{мин}$ – линейному пространственному разрешению, а не предельному разрешению – $l_{мин}$, как многие ошибочно считают. Предельное разрешение не связано с разрешающей способностью, как пространственной частотой, а потому не может характеризовать способность АКС ДЗЗ отдельно наблюдать (разрешать) близкие мелкие детали объекта. Предельное разрешение определяет размер минимальной детали объекта, воспринимаемой АКС ДЗЗ, и характеризует способность АКС ДЗЗ воспроизводить «резкие границы» и мелкие детали объекта, то есть характеризует резкость изображения, а не пространственное разрешение АКС ДЗЗ.

Наряду с определенными выше предельным и линейным разрешениями АКС ДЗЗ, существует дифракционное линейное пространственное разрешение, обратное дифракционной разрешающей способности. Для определения дифракционной разрешающей способности идеального объектива R^*_D используют [2] формулу

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

где R_D – радиус диска Эри объектива, определяемый, как

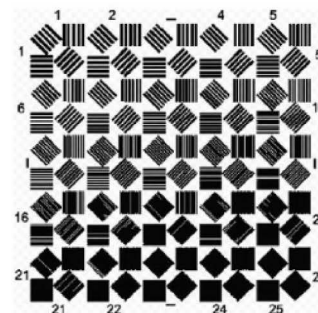


Рис. 1. Штриховые миры: а) мира Ашеулова, б) мира ГОИ

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

где λ – 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 по Рэлю. Критерий Рэля гласит, что при провале в распределении интенсивности суммарного изображения двух близких точек в 20%, точки будут восприниматься раздельно, то есть разрешаться. Для этого необходимо, чтобы центральный максимум в изображении одной точки приходился на первый минимум другой (рис. 2).

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, определяемое минимальной величиной R_D (5). Заметим, что дифракционная разрешающая способность идеального объектива (4) фактически определяет его частоту отсечки

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

Разрешающая способность зависит от контраста соседних элементов изображения, а также от порогового контраста приемника изображений [10]. «Под пороговым контрастом приемника изображений понимают минимальный контраст соседних деталей изображения, при котором они могут быть зарегистрированы раздельно».

Для априорной оценки инструментальной разрешающей способности АКС ДЗЗ и апостериорной оценки реальной с учетом искажающих факторов

разрешающей способности определяют идеальную и реальную частотно-контрастную характеристики (ЧКХ) съёмочной системы и кривую порогового контраста (КПК) приемника изображения. Пересечение этих кривых позволяет приблизительно оценить инструментальную R^*_i и реальную R^*_p разрешающую способность аналоговой АКС ДЗЗ (рис. 3).

Оценив разрешающую способность, определяют пространственное разрешение аналоговых АКС ДЗЗ. При выполнении аэрофотосъёмочных работ и использовании материалов аэрофотосъёмки важное значение имеют способности АКС ДЗЗ: во-первых, воспроизводить близкие мелкие детали ландшафта земной поверхности раздельно и, во-вторых, воспринимать эти мелкие детали на местности.

Количественно эти способности оцениваются:

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

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

а с учетом (2), определяемым соотношением

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

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

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

где H – высота аэрокосмической фотосъёмки в надир {км}, R^* – разрешающая способность АКС ДЗЗ в изображении, определяемая (2) или аналогично (рис. 3),

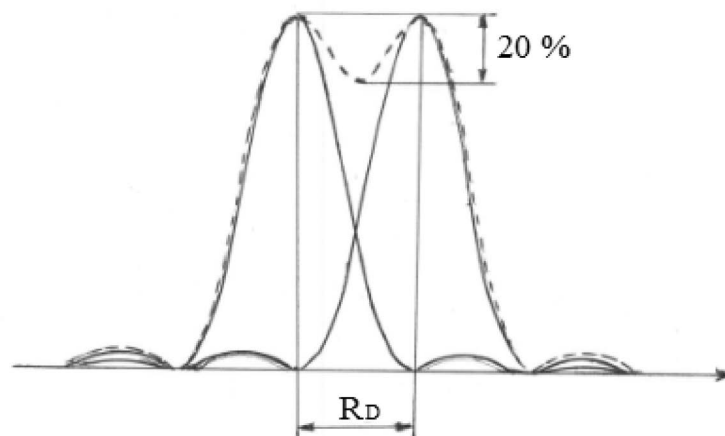


Рис. 2. Пространственное разрешение по Рэлю

{мм⁻¹}, 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 диодных линеек и матриц в качестве приемников изображения в ДЗЗ 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 (отсчетов), и означает частоту выборки (дискретизации), определяемую как

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

На рис. 4 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 (элемента дискретизации) матрицы цифрового детектора.

Совершенное проектирование ОЭА подразумевает определение величин D , F и d , обеспечивающих согласование 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) $R_{\lambda F/D} = \lambda F/D$ приходились, как минимум, два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора». При этом вводится понятие частоты Найквиста $f_N = f_{1/d}/2$, равной половине частоты дискретизации (10) цифрового детектора $f_{1/d} = 1/d$, и утверждается, что «при дискретизации аналогового сигнала неискаженную полезную информацию несут только пространственные частоты f , которые ниже частоты Найквиста ($f < f_N$)». Поэтому в согласованной по Найквисту (совершенной) ОЭА частота Найквиста цифрового детектора f_N оптимально должна совпадать с частотой отсечки объектива $f_{D/\lambda F} = D/\lambda F$. В случаях такого совпадения имеем

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

откуда получаем

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

а это и есть условие согласования ОЭА по критерию Найквиста, упомянутое выше.

В соответствии с методикой, изложенной в [10], «оценочный расчет разрешающей способности изображения $R^*_{из}$, полученного цифровой АКС ДЗЗ, может быть выполнен с использованием выражения

$$1/R^{*2}_{из} = 1/R^{*2}_{пр} + 1/R^{*2}_{об}, \quad (13)$$

где $R^*_{пр}$ – разрешающая способность цифрового приемника ОЭА, а $R^*_{об}$ – разрешающая способность объектива ОЭА».

Вычисление разрешающей способности приемника изображения осуществляется по формуле

$$R^*_{пр} = 1/\Pi = 1/2d \quad \{\text{пар линий/мм}\}, \quad (14)$$

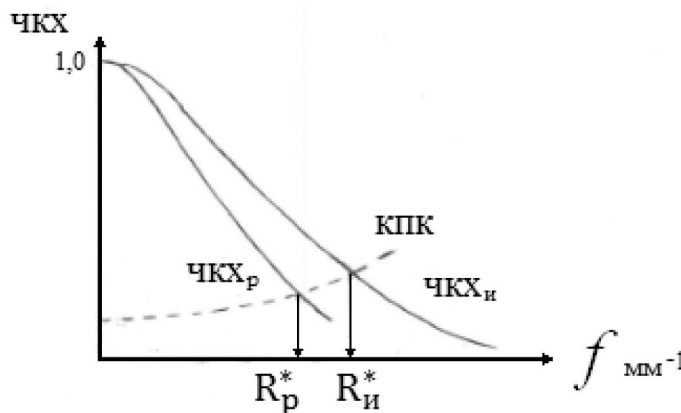


Рис. 3. Графическое определение разрешающей способности АКС ДЗЗ: $R^*_{и}$ – инструментальной по ЧКХ_и и $R^*_{р}$ – реальной по ЧКХ_р

где d – размер пикселя (элемента дискретизации) цифрового детектора в миллиметрах, а $\Pi = 2d$ – период дискретизации цифрового детектора.

По аналогии с фотографическими АКС ДЗЗ здесь d – предельное разрешение в цифровом изображении, эквивалентное l , а Π – линейное пространственное разрешение в цифровом изображении, эквивалентное P , при этом разрешающая способность цифрового приемника $R_{пр}^*$ связана с частотой дискретизации (10) соотношением

$$R_{пр}^* = f_{1/d} / 2 = f_N \quad \{\text{пар линий/мм}\} \quad (15)$$

и является частотой Найквиста (11) цифрового приемника.

Размер пикселя d берется из паспортных данных цифрового приемника или вычисляется, исходя из линейного размера матрицы и количества пикселей по ее стороне.

Разрешающая способность идеального объектива характеризует его дифракционное линейное пространственное разрешение (5) и, как в фотографических АКС ДЗЗ, аналогично (4), она определяется, как

$$R_{об}^* = D/\lambda F \quad \{\text{пар линий/мм}\} \quad (16)$$

Формула (16) с точностью до опущенного здесь множителя 1,22 определяет дифракционную разрешающую способность (частоту отсечки) идеального объектива.

Согласно [10] «иногда интуитивно из соображений оптимального соотношения цена-качество объектив конструируют с разрешающей способностью $R_{об}^*$, равной разрешающей способности выбранного цифрового приемника $R_{пр}^*$ ». Тогда, приравнивая (14) и (16), получаем

$$R_{об}^* = D/\lambda F = 1/2d = R_{пр}^* \quad \{\text{пар линий/мм}\} \quad (17)$$

откуда для дифракционного линейного пространственного разрешения имеем

$$\lambda F/D = 2d \quad \{\text{мм}\} \quad (18) \equiv (12)$$

а это, как уже отмечалось, и есть критерий Найквиста согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по разрешению, когда на элемент разрешения (радиус диска Эри) объектива $\lambda F/D$ приходится два элемента разрешения (пикселя) цифрового детектора $2d$.

На основании (13) и с учетом (17) получаем оценочную (априорную) разрешающую способность цифрового изображения

$$R_{из}^* = R_{пр}^* / 2^{1/2} \quad \{\text{пар линий/мм}\} \quad (19)$$

Реальную разрешающую способность цифровых АКС ДЗЗ, как и в случае аналоговых АКС ДЗЗ (рис. 3), апостериорно можно определять графически по пересечению ЧКХ АКС ДЗЗ и кривой порогового контраста (КПК) цифрового приемника $k_{п}(f)$, опреде-

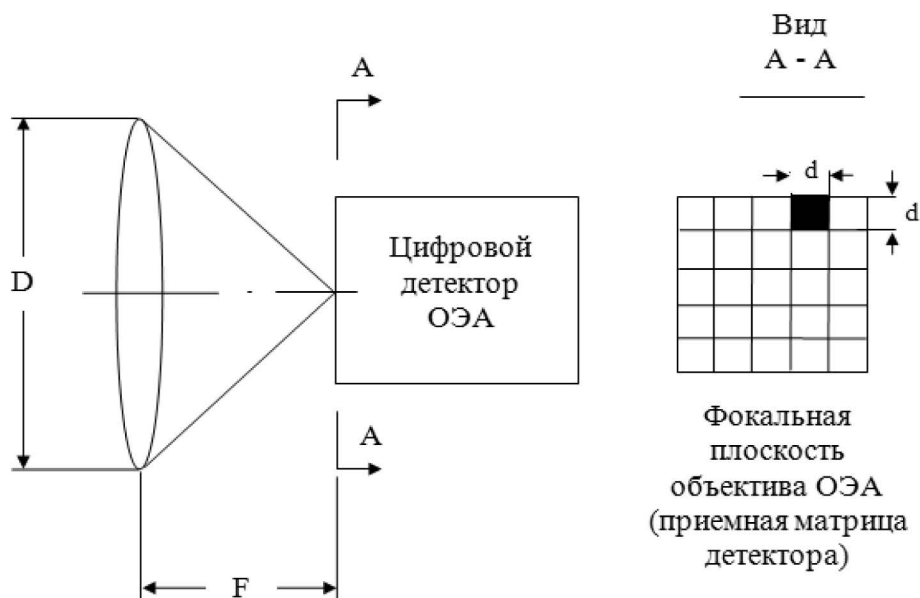


Рис. 4. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) аэрокосмической системы дистанционного зондирования Земли (АКС ДЗЗ)

ляемой аналитически формулой Сэндвика [10], как

$$k_{\text{пр}}(f) = f / (2R_{\text{пр}}^* - f), \quad (20)$$

где f – пространственная частота в {пар линий/мм}, а $R_{\text{пр}}^*$ – разрешающая способность цифрового приемника в {пар линий/мм}, определяемая при контрасте изображения, равном единице ($k = 1$).

Апостериорно реальная разрешающая способность $R_{\text{р}}^*$ цифровых АКС ДЗЗ может быть определена не только графически, но и аналитически. При аналитическом способе разрешающая способность определяется как пространственная частота $R_{\text{р}}^* = f_{\text{р}}$, для которой справедливо соотношение

$$k_{\text{пр}}(f_{\text{р}}) = I(f_{\text{р}}) \cdot k_{\text{об}}, \quad (21)$$

где $I(f)$ – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) АКС ДЗЗ, $k_{\text{пр}}(f_{\text{р}})$ – пороговый контраст (20) цифрового приемника на пространственной частоте $f_{\text{р}}$, $k_{\text{об}}$ – контраст объекта, а $I(f_{\text{р}}) \cdot k_{\text{об}}$ – контраст оптического изображения на частоте $f_{\text{р}}$.

Определив реальную разрешающую способность, оценивают реальное линейное пространственное разрешение цифровой АКС ДЗЗ на местности по формуле, представленной в [8] и аналогичной формуле (7)

$$L_{\text{р}} = (1/f_{\text{р}}) \cdot H/F \quad \{\text{м}\} \quad (22)$$

Рассмотренные выше методы определения разрешающей способности аналоговых и цифровых АКС ДЗЗ по пересечениям ЧКХ и КПК являются апостериорными и обычно используются для подтверждения технических характеристик эксплуатируемых АКС ДЗЗ. При проектировании АКС ДЗЗ наибольший интерес представляют критерии априорной оценки «разрешающей способности» и «пространственного разрешения» вновь создаваемых съемочных систем. Рассмотрим использование этих одно числовых характеристик для априорной оценки качества цифровых АКС ДЗЗ.

Остановимся подробнее на анализе пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ, как интегральной характеристики для оценки способности АКС ДЗЗ разделять воспроизводить (разрешать) близкие детали на зондируемом участке земной поверхности. Эта величина обычно декларируется операторами АКС ДЗЗ в качестве одной из основных технических характеристик их продукции. Именно заявленное оператором пространственное разрешение принимается во внимание пользователями при выборе данных ДЗЗ для решения конкретных задач. По аналогии с аналоговыми АКС ДЗЗ разрешающая способность на местности цифровых АКС ДЗЗ должна характеризоваться максимальной пространственной частотой, на которой могут быть расположены высококонтрастные объекты, разделяемо воспринимаемые

(разрешаемые) на местности. При этом величиной обратной разрешающей способности в соответствии с (22) является линейное пространственное разрешение на местности, которое и характеризует качество наблюдательных АКС ДЗЗ.

Предельное геометрическое разрешение АКС ДЗЗ на местности – критерий GSD

Сегодня [11] в качестве характеристики пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ ошибочно используется предельное разрешение, а именно, размер пикселя цифрового детектора в изображении d и/или его проекция – предельное геометрическое разрешение – на местности, называемое *GSD* [12] и определяемое, как

$$R_{\text{GSD}} = R_{\text{дН/Ф}} = dH/F \quad \{\text{м}\} \quad (23)$$

Данная тенденция наиболее четко прослеживается в информационном поле, охватывающем космические оптические изображения ДЗЗ. В ТЗ 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*.

Рассмотрим этот подход к определению пространственного разрешения и покажем неправомерность его использования для оценки способности АКС ДЗЗ разделять (разрешать) близкие объекты и 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 в цифровую (дискретную) форму. Под дискретизацией понимают представление непрерывного аналогового сигнала совокупностью отсчетов-выборок [13]. В соответствии с теоремой Котельникова [14], (Найквиста [15], Шеннона [16],) любую непрерывную функцию с ограниченным спектром, занимающим полосу от 0 до f_N , можно представить с помощью ее дискретных значений, взятых через равные интервалы ΔX с частотой выборки (дискретизации) $f_{1/\Delta X} = 2f_N$, где $f_{1/\Delta X} = 1/\Delta X$. Реально любая непрерывная функция представима рядом Котельникова с некоторой погрешностью, обусловленной некоторыми 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 (23) $\Delta X = R_{dH/F} = dH/F$ (GSD) можно считать интервалом дискретизации на местности. Тогда $f_{1/\Delta X} = 1/\Delta X$ – частота дискретизации на местности, а разрешающая способность цифровых АКС ДЗЗ на Земле определяется частотой Найквиста $f_N = 1/2\Delta X$, обратной периоду дискретизации $2\Delta X$, определяющему линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности. При этом системой могут быть переданы пространственные частоты f , не превышающие максимальную пространственную частоту f_N

$$f \leq f_N = 1/2\Delta X \text{ \{пар линий/мм\}} \quad (24)$$

с минимальным периодом $2\Delta X$.

Это означает, что расстояние между двумя точками на Земле для их раздельного восприятия (разрешения) должно быть больше или равно $2\Delta X$, а не ΔX (GSD), как многие ошибочно считают, и это важно! Этот результат, упоминавшийся выше при рассмотрении пространственного разрешения аналоговых АКС ДЗЗ, свидетельствует о том, что предельное геометрическое разрешение GSD , как проекция пикселя d на Землю, ΔX (23), зачастую ошибочно отождествляемое с пространственным разрешением цифровых АКС ДЗЗ, нельзя воспринимать в том смысле, что объекты или их детали, находящиеся друг от друга на расстоянии ΔX , будут восприниматься раздельно, то есть разрешаться, хотя возможны частные случаи с вероятностью 11% [17], когда это может произойти за счет «попадания в пиксель».

Критерий GSD (23) оценки предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ с появлением цифровых детекторов: сначала за рубежом, где он был назван GSD (Ground Sample Distance) [18], а впоследствии без каких-либо обоснований правомерности его использования и вопреки российским ГОСТ он был принят и в российской практике ДЗЗ [19]. Недостатком критерия GSD (23) является то, что он дает ошибочную оценку пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. 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 [11]. Однако вопреки результатам многочисленных экспериментов, в качестве оценки величины пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ на местности используют проекцию пикселя на зондируемую земную поверхность GSD (23), то есть на практике имеет место ошибочное отождествление понятий линейного пространственного разрешения и предельного разрешения. Существует мнение [11], 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».

Один пиксель d в цифровом изображении, как и его проекция на зондируемую земную поверхность GSD , соответствуют половине периода штриховой миры аналогового изображения, то есть GSD эквивалентен одной (светлой или темной) линии штриховой миры и не может оценивать линейное пространственное разрешение, определяемое периодом. 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 [20].

Предельное разрешение на местности GSD фактически характеризует минимальный размер наблюдаемого АКС ДЗЗ объекта на зондируемой земной поверхности, а не минимальное расстояние между раздельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами. Таким образом, очевидно, что 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.

Линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС

В соответствии с проведенным выше анализом очевидно, что реальное пространственное разрешение цифровых АКС ДЗЗ на местности определяется линейным пространственным разрешением как величиной обратной разрешающей способности, (здесь, частоте Найквиста (24)), то есть оно определяется периодом частоты Найквиста на местности, как

$$2\Delta X = R_{2dH/F} = 2dH/F = R_{PKC} \text{ \{м\}} \quad (25)$$

Полученное выражение для оценки линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности как проекции периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{2dH/F}$, есть новый критерий оценки (критерий РКС), интуитивно предложенный [21] и запатентованный [22] АО «Российские космические системы». Здесь он получен на основании того, что период дискретизации (два пикселя) цифрового детектора, как и его проекция на зондируемую земную поверхность, для цифровых изображений ДЗЗ эквивалентен периоду штриховой миры, используемой при определении

линейного разрешения на местности для аналоговых изображений ДЗЗ в соответствии с действующим российским стандартом оценки разрешения [20]. На основании сравнения (23) и (25) очевидно, что

$$R_{PKC} = R_{LPM} = 2 R_{ГPM} = 2 R_{GSD} \text{ {м}}, \quad (26)$$

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

На рис. 5 дана иллюстрация критериев оценки предельного (GSD) и линейного (PKC) разрешений АКС ДЗЗ на местности [23].

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 [2], аналогичной (5), как

$$R_{\lambda H/D} = \lambda H/D \text{ {м}}, \quad (27)$$

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

Заметим, что дифракционный предел пространственного разрешения (27) в ОЭА АКС ДЗЗ может быть достигнут только при согласовании объектива и цифрового детектора 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 [23] понятие коэффициента совершенства 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 инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерия РКС $R_{PKC} = R_{2dH/F}$ к дифракционному пределу линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$

$$K = (D/\lambda F)/(1/2d) = (2dH/F)/(\lambda H/D) = 2dD/\lambda F \text{ {раз}}, \quad (28)$$

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 условие согласования (18) и

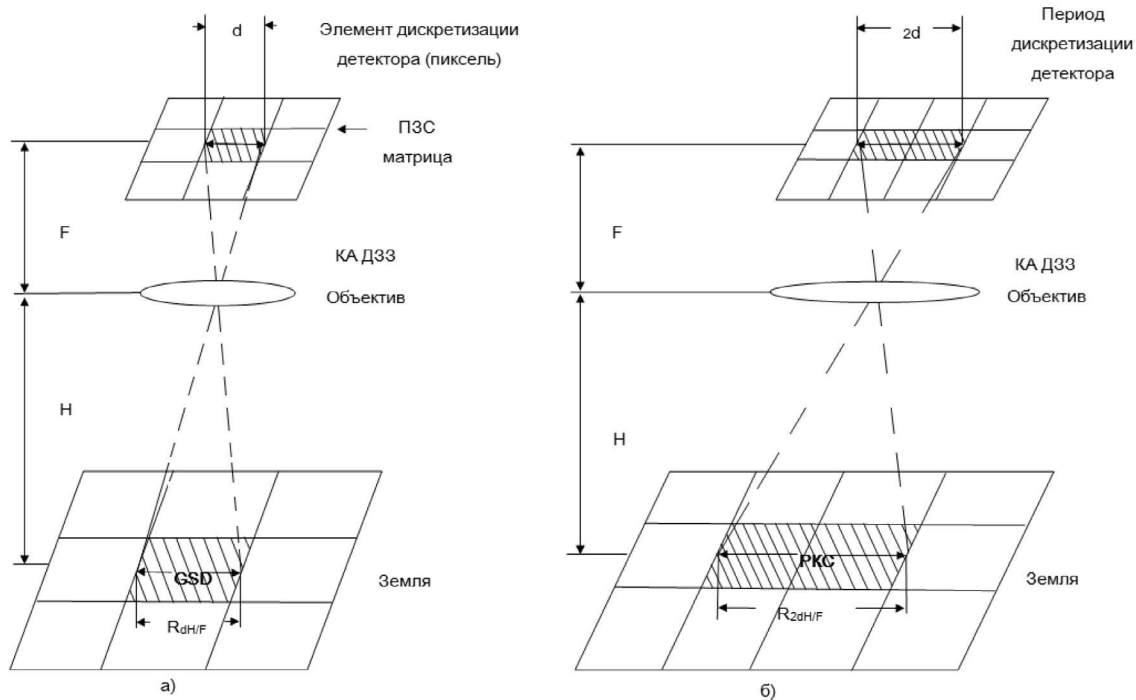


Рис. 5. Оценки инструментального разрешения АКС ДЗЗ на местности:

- а) предельного геометрического – критерий GSD
- б) линейного пространственного – критерий РКС

$$R_{\text{PKC}} = R_{\lambda H/D} \quad \{\text{м}\}, \quad (29) \quad K \geq 2 \quad \{\text{раз}\} \quad (32)$$

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

Рассмотрим другой коэффициент качества ОЭА, обозначим его K_0 , введенный в [21*], как отношение критерия GSD (23) оценки предельного геометрического разрешения к дифракционному линейному пространственному разрешению АКС ДЗЗ на местности $\lambda H/D$ (27)

$$K_0 = dH/F/\lambda H/D = dD/\lambda F \quad \{\text{раз}\}, \quad (30)$$

где $K_0 \geq 1$.

Ситуация, когда $K_0 = 1$, представляет границу применимости критерия GSD для оценки пространственного разрешения АКС 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 [23], противоречит физическому смыслу и свидетельствует об ошибочности определения K_0 (30) [21*].

Из сравнения (28) и (30) следует, что

$$K = 2K_0 \quad \{\text{раз}\} \quad (31)$$

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

Полученное ограничение (32) на несовершенство ОЭА АКС ДЗЗ, обусловленное использованием критерия GSD , подтверждается значениями коэффициентов несовершенства проектирования ОЭА большими двух ($K > 2$) для всех существующих АКС ДЗЗ сверхвысокого разрешения [24], представленных в таблице 1.

Отсюда видно в подтверждение вышесказанного, что, используя критерий GSD для оценки инструментального пространственного разрешения АКС 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 АКС ДЗЗ на местности.

Проведенные исследования последствий несовершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия GSD [25] показали, что несовершенное проектирование с коэффициентом несовершенства $K > 1$ ведет к информационным потерям разрешения АКС ДЗЗ в K раз и к финансовым потерям создания АКС ДЗЗ в K^β раз, где β – показатель степени масштабного закона стоимости ($2 \leq \beta \leq 3$).

Для предотвращения информационных и финансовых потерь цифровых АКС ДЗЗ из-за несовершенного проектирования их ОЭА на базе предельного геометрического разрешения GSD [25] были предложены и исследованы новые технологии совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия РКС [27, 28, 29, 30].

Таблица 1

Коэффициент K несовершенства проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия GSD , ($K > 2$)

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Параметр			
		Диаметр объектива D {м}	Фокус объектива F {м}	Пиксель детектора d {мкм}	$K=2dD/\lambda F$ ($\lambda=0.55$ 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

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, равным удвоенному значению минимальной ширины предельно разрешаемых объектов. Этот период 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 разрешения, спроектированные на базе критерия *GSD*, имеют коэффициент несовершенства ОЭА, больший двух ($K>2$), что свидетельствует о их несовершенстве.

3. Для априорной оценки реально достижимого пространственного разрешения на местности проектируемой АКС ДЗЗ необходимо использовать отечественный критерий оценки инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности – критерий РКС ($R_{\text{РКС}}=2dH/F$), предложенный в АО «Российские космические системы» и основанный на формировании и оценке проекции двух пикселей (периода дискретизации) цифрового детектора на зондируемую земную поверхность.

4. Предельное разрешение *GSD*, как проекция пикселя d на Землю, ошибочно отождествляемое с пространственным разрешением цифровых АКС ДЗЗ, 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 $2GSD = \text{РКС}$, 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. Заметим, что в наземной астрономии [26] понятие «резкость» изображения давно и успешно используется в адаптивных технологиях преддетекторной и последдетекторной компенсации атмосферных искажений.

5. Во избежание дальнейшего ошибочного использования в РФ [21*] зарубежного критерия оценки предельного геометрического разрешения – критерия *GSD*, в АО «Российские космические системы» предложен [21] и запатентован [22] российский критерий оценки инструментального линейного пространственного разрешения – критерий РКС, который предлагается стандартизовать российским ГОСТ и использовать для оценки пространственного разрешения и проектирования цифровых АКС ДЗЗ.

Литература

1. Image Quality / ed. P.S. Cheatham // Proceedings of the SPIE. – 1981. – Vol. 310. – 350 p.
2. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения. Проектирование оптических систем / У. Уэзерелл ; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – М.: Мир, 1983. – 431 с.
3. Занин, К. А. Методы проектирования оптико-электронных комплексов космических аппаратов / К.А. Занин // Проектирование автоматических космических аппаратов / под ред. В.В. Ефанова, К.М. Пичхадзе. – М.: НПО им. С.А. Лавочкина, 2013. – Т. 1. – 261 с.
4. ГОСТ 2653–80. Фотографическая сенситометрия. Термины, определения и буквенные обозначения величин. – Введ. 1982–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 40 с.
5. Lord Rayleigh, Theory of optical images, with special reference to the microscope / Lord Rayleigh // Philosophical Magazine. – 1896. – Vol. XLII. – P. 167–195.
6. ГОСТ 23935–79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. – Введ. 1981–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 20 с.
7. ГОСТ 2819–84. Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности. – Введ. 1985–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 6 с.
8. Кононов, В. Основы методики расчета разрешающей способности и точности определения координат аэрофотографических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geomatika.kiev.ua/training/Data Capture /Remote Sensing/chapter 103.html>, свободный. – Загл. с экрана.
9. Характеристика качества изображения [Электронный ресурс] / Сайт НТЦ Красногорский завод им. С.А. Зверева. – Режим доступа: <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html> [дата обращения: 05.05.2022], свободный. – Загл. с экрана.
10. Алтынов, А. Е. Расчет пространственного разрешения съемочной системы. Учебное пособие / А.Е. Алтынов,

М.Н. Севастьянова, С.А. Серебряков. – М.: МИИГАиК, 2019. – 205 с.

11. 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.

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

13. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. – М.: Мир, 1970. – 364 с.

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

15. 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.

16. 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.

17. Молчанов, А. С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова–Найквиста–Шеннона / А.С. Молчанов // Инженерные решения. – 2019. – № 2 (3). – С. 8–14.

18. Ground sample distance [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_sample_distance [дата обращения 05.05.2022], свободный. – Загл. с экрана.

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

20. ГОСТ 15114–78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. – Введ. 1978–01–30. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 6 с.

21. 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.

21*. 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.

22. Пат. № 2669262 Российская Федерация, МПК: G02В 23/12, G03 В37/00. Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов; заявитель и правообладатель АО «Российские космические системы»; № 2017144878; заявл. 20.12.2017; опубл. 09.10.2018, Бюл. № 28. – 23 с.

23. Свиридов, К. Н. О критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Информация и Космос. – 2018. – № 3. – С. 143–146.

24. 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.

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

26. Свиридов, К. Н. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения / К.Н. Свиридов. – М.: Знание, 2005. – 452 с.

27. 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.

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

29. Пат. № 2730886 Российская Федерация, МПК G01С11/02, B64G4/00, G02В7/02. Способ достижения дифракционного предела разрешения изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, Ю.М. Гектин; заявитель и правообладатель АО «Российские космические системы»; заявл. 04.10.2019; опубл. 26.08.2020, Бюл. № 24. – 35 с.

30. 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.