

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.8 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.1.9.29

Разрешающая способность и линейное разрешение
для оценки качества и проектирования
аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли

К. Н. Свиридов, д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье исследованы понятия «разрешающая способность» и «пространственное разрешение» (линейное, предельное, дифракционное) аналоговых (фотографических) и цифровых (оптико-электронных) аэрокосмических систем (АКС) ДЗЗ. Получено, что зарубежный критерий оценки предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности — критерий *GSD* — является некорректным для оценки линейного пространственного разрешения, а его использование при проектировании АКС ДЗЗ препятствует согласованию объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста, что ведет к информационным и финансовым потерям. Показано, что критерий *GSD* характеризует минимальный размер объекта, воспринимаемого АКС ДЗЗ на земной поверхности, а не минимальное расстояние между двумя отдельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами, то есть понятие «предельное разрешение» ближе к понятию «резкость» изображения, а не к понятиям «разрешающая способность» и «пространственное разрешение», и потому не может быть использован для оценки пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ. Получено, что для оценки качества и проектирования АКС ДЗЗ необходимо использовать отечественный критерий оценки инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности — критерий РКС, который дает реальную оценку пространственного разрешения, позволяет согласовать проектируемую АКС ДЗЗ по критерию Найквиста с коэффициентом совершенства проектирования, равным единице ($K = 1$), и обеспечивает возможность достижения дифракционного предела линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности. Во избежание дальнейшего ошибочного использования в РФ зарубежного критерия *GSD* предлагается стандартизовать отечественный критерий РКС российским ГОСТ и использовать его для оценки качества и проектирования АКС ДЗЗ.

Ключевые слова: разрешающая способность, пространственное разрешение, предельное геометрическое разрешение — *GSD*, линейное пространственное разрешение — РКС, критерий Найквиста и несовершенное проектирование, совершенное проектирование АКС ДЗЗ

Resolving Power and Linear Resolution for Quality Assessment
and Design of Aerospace Earth Remote Sensing Systems

K. N. Sviridov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. E. Tyulin, Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article examines the concepts of resolving power and spatial resolution (linear, limiting, diffraction) in analog (photographic) and digital (optoelectronic) aerospace ERS systems. It was found that the foreign criterion for assessing the limiting geometric resolution of the remote sensing system of remote sensing on the terrain, the *GSD* criterion, is inadequate for assessing the linear spatial resolution. Its use in the design of the remote sensing system impedes the matching of the lens and the digital detector according to the Nyquist criterion. This leads to information and financial losses. It is shown that the *GSD* criterion characterizes the minimum size of an object perceived by the remote sensing system on the earth's surface, and not the minimum distance between two separately observed (resolvable) objects, that is, the concept of “limiting resolution” is closer to the concept of “sharpness” of the image, and not to the concepts of “resolution” and “spatial resolution”, and therefore cannot be used to assess the spatial resolution and design of the remote sensing system. It was found that to assess the quality and design of ERS systems, it is necessary to use the Russian criterion for assessing the instrumental linear spatial resolution of ERS systems on the terrain, the RSS criterion, which gives a real assessment of the spatial resolution, allows the projected ERS systems to be matched according to the Nyquist criterion with a design excellence factor equal to one ($K = 1$), and provides the ability to achieve the diffraction limit of the linear spatial resolution of the ERS systems on the terrain. 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 the Russian GOST and use it to assess the quality and design of remote sensing systems.

Keywords: resolving power, spatial resolution, limiting geometric resolution — *GSD*, linear spatial resolution — RSS, Nyquist criterion and imperfect design, perfect design of the remote sensing systems

Введение

Наиболее информативным и востребованным потребителями продуктом ДЗЗ является оптическое изображение зондируемого участка земной поверхности. Для оценки качества изображения существует много различных критериев [1]. Вследствие множества современных концепций качества изображения имеет место значительное разнообразие в их терминологии и обозначениях. Лишь тогда, когда предложены или уже существуют соответствующие стандарты, возможно некоторое единообразие. В остальных же случаях правилом является не всегда обоснованное навязывание отдельными авторами своих точек зрения и привычек. Существенное внимание в научно-технической литературе [2] уделяется оценочным характеристикам качества изображения, выражаемым одним числом. Существуют различные одно числовые критерии оценки качества изображений, однако не многие из них пригодны для оценки эффективности наблюдательных систем. В аэрокосмических системах (АКС) ДЗЗ наибольшее распространение получили два одночисловых показателя качества аэрокосмических систем: «разрешающая способность» и «пространственное разрешение». Это две разные одночисловые характеристики качества, имеющие разный физический смысл и размерность. Однако, в отечественной научно-технической литературе [3] и даже в ГОСТе [4] понятия «разрешающая способность» и «пространственное разрешение» 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, — предельным пространственным разрешением.

Строгое определение разрешающей способности применительно к аэрофотосистемам дано в ГОСТе [6], а именно: «Разрешающая способность — характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоматериала, 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». Аналогичное определение разрешающей способности дано и в другом российском ГОСТе [7]: «Разрешающая способность — свойство фотографического материала разделять передавать детали объекта фотографирования, характеризующиеся наибольшей визуальной 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».

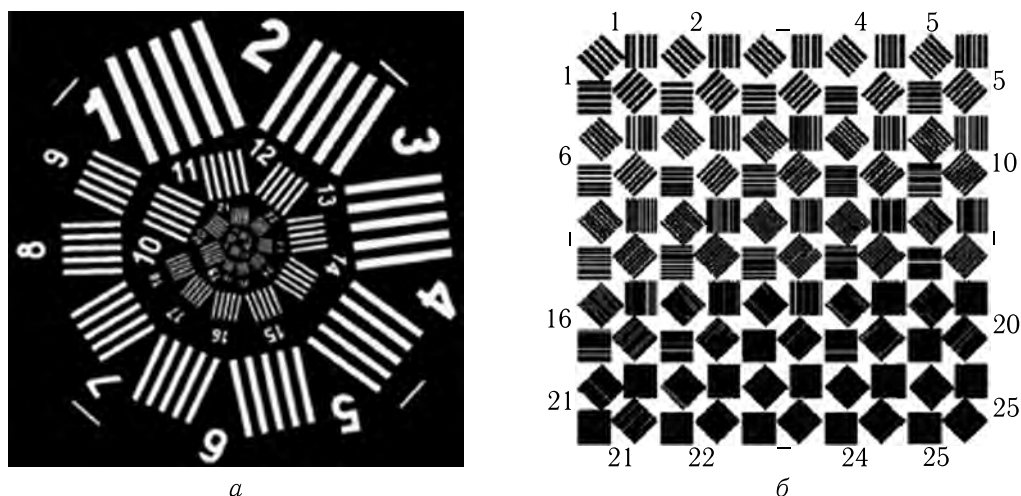


Рис. 1. Штриховые миры: а) мира Ашеулова, б) мира ГОИ

Как следует из определений, разрешающая способность имеет смысл максимальной пространственной частоты, измеряемой обычно в обратных миллиметрах (мм^{-1}), а обратная ей величина — пространственное разрешение — имеет смысл минимального расстояния между раздельно наблюдаемыми (разрешаемыми) объектами, измеряемого в единицах длины, например в миллиметрах (мм). Из определений также ясно, что разрешающая способность — эмпирическая оценка, получаемая при визуальном наблюдении. Достоинством критерия «разрешающая способность» [8] является то, что эта характеристика достаточно наглядна, имеет простой физический смысл и автоматически включает в себя пороговые свойства зрительного анализатора.

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

Критерий «разрешающая способность» в достаточной степени согласуется с функциональным назначением АКС ДЗЗ, когда основным назначением систем является обнаружение и распознавание компактных и малоконтрастных объектов, имеющих малые размеры и малые детали.

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, например, 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 отечественным стандартам при идентичных критериях определения соотносятся, как

$$\begin{aligned} 1(\text{цикл/мм}) &= 1(\text{lp/mm}) = 2(\text{lines/mm}) = \\ &= 1(\text{пара линий/мм}) = 1(\text{мм}^{-1}). \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

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 как ее удвоенное предельное разрешение. В случаях определения предельного разрешения по изображению значение $l_{\text{мин}}$ измеряют на нем в миллиметрах. В тех случаях, когда значение $l_{\text{мин}}$ приведено к масштабу на земной поверхности, говорят о предельном разрешении на местности и измеряют его в метрах.

Обращаясь к определению разрешающей способности, данному в ГОСТе [6, 7], и учитывая выражение (2), можно говорить о том, что объекты (детали) на изображении будут разрешаемы (восприниматься 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 $R = 1/R^* = 2l_{\text{мин}}$ — линейному пространственному разрешению, а не предельному пространственному разрешению — $l_{\text{мин}}$, как часто ошибочно считают. Предельное разрешение не связано с разрешающей способностью как простран-

ственной 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 на его изображении.

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

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

где R_D — радиус диска Эри объектива, определяемый как

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

где λ — средняя длина волны солнечного излучения подсвета, D — диаметр апертуры объектива, а F — фокусное расстояние объектива съёмочной системы.

Радиус диска Эри (5) характеризует дифракционное пространственное разрешение объектива, соответствующее разрешению двух точек по Рэлею. Критерий Рэлея гласит, что при провале в распределении интенсивности суммарного изображения двух близких точек в 20% точки будут восприниматься отдельно, то есть разрешаться. Для этого необходимо, чтобы центральный максимум в изображении одной точки приходился на первый минимум другой (рис. 2).

Дифракционное пространственное разрешение по Рэлею — минимальное расстояние R_D между двумя точками, при котором они разрешаются, то есть дифракционное пространственное разрешение — это максимальное линейное пространственное разрешение, определяемое минимальной величиной (5).

Заметим, что дифракционная разрешающая способность идеального объектива (4) фактически определяет его частоту отсечки

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

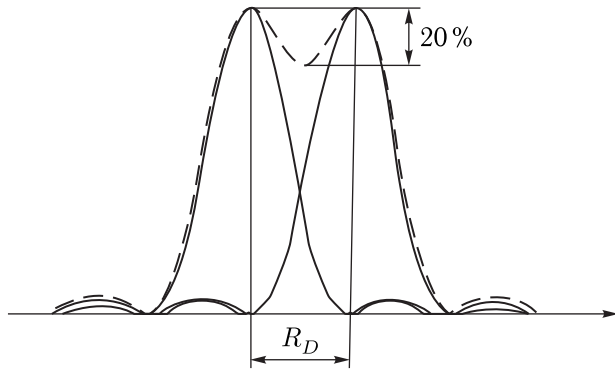
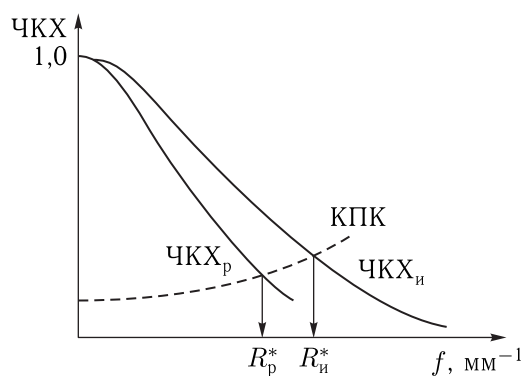


Рис. 2. Пространственное разрешение по Рэлею

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 отдельно.

Для априорной оценки инструментальной разрешающей способности АКС ДЗЗ и апостериорной оценки реальной разрешающей способности с учетом искажающих факторов, влияющих на качество аэрокосмических изображений, определяют идеальную и реальную частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) съемочной системы и кривую порогового контраста (КПК) приемника изображения (фотоматериала). Пересечение этих кривых позволяет приблизительно оценить инструментальную $R_{и}^*$ и реальную $R_{р}^*$ разрешающую способность аналоговой АКС ДЗЗ (рис. 3).

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

Оценив разрешающую способность, определяют пространственное разрешение аналоговых АКС ДЗЗ. При выполнении аэрофотосъемочных работ и использовании материалов аэрофотосъемки 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

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

а с учетом (2) определяемым соотношением

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

и, во-вторых, предельным геометрическим разрешением на местности — минимальным размером детали объекта на местности A , которая может быть воспроизведена с помощью данной АКС ДЗЗ:

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

где H — высота аэрокосмической фотосъемки в надира (км), R^* — разрешающая способность АКС ДЗЗ, определяемая (2) или аналогично (рис. 3) (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.

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, в частности на теореме выборки (отсчетов), и означает частоту выборки (дискретизации), определяемую как

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

На рис. 4 представлена блок-схема опико-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 (ПЗС) детектора.

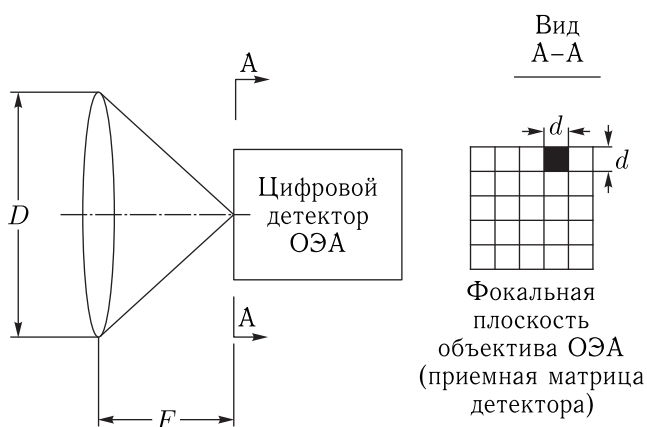


Рис. 4. Опико-электронная аппаратура (ОЭА) аэрокосмической системы дистанционного зондирования Земли (АКС ДЗЗ)

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, 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 $f_N = f_{1/d}/2$, равной половине частоты дискретизации (10) цифрового детектора $f_{1/d} = 1/d$,

и утверждается, что при дискретизации аналогового сигнала полезную неискаженную 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 случае такого совпадения имеем

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

откуда получаем

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

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 следующего выражения:

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

где $R_{пр}^*$ — разрешающая способность цифрового приемника ОЭА, а $R_{об}^*$ — разрешающая способность объектива ОЭА.

Вычисление разрешающей способности приемника изображения осуществляется по формуле

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

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

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

и совпадает с 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 сторонам.

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

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

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

Часто интуитивно из соображений оптимального соотношения цена–качество объектив конструируют с разрешающей способностью $R_{об}^*$, равной разрешающей способности выбранного цифрового приемника $R_{пр}^*$. Тогда, приравнявая (14) и (16), получаем

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

откуда для дифракционного линейного пространственного разрешения имеем

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

а это, как уже отмечалось, 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 $2d$.

Критерий Найквиста — основа совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ, о чем подробнее будет сказано ниже.

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

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

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 $k_{пр}(f)$, определяемой аналитически формулой Сэндвика [10]

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

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

Апостериорно реальная разрешающая способность R_p^* цифровых АКС ДЗЗ может быть определена не только графически, но и аналитически. При аналитическом способе разрешающая способность определяется как пространственная частота $R_p^* = f_p$, для которой справедливо соотношение

$$k_{пр}(f_p) = I(f_p) \cdot k_{об}, \quad (21)$$

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

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

$$L_p = (1/f_p) \cdot H/F \text{ (м)}. \quad (22)$$

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

Остановимся подробнее на анализе пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ как

интегральной характеристики оценки способности АКС ДЗЗ отдельно 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, отдельно 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*

Реально [11] сегодня в качестве характеристики пространственного разрешения цифровых АКС ДЗЗ 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

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

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 более подробно этот подход к определению пространственного разрешения и покажем

неправомерность его использования для оценки способности АКС ДЗЗ отдельно воспринимать (разрешать) близкие объекты и их детали на зондируемом участке земной поверхности.

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 $f_{1/\Delta X} = 2f_N$, 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 f_N , называемой частотой Найквиста.

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 местности (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 отдельного восприятия

(разрешения) должно быть больше или равно $2\Delta X$, а не ΔX (GSD), 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». Сказанное иллюстрируется рис. 1 в [11], на котором дан пример неразрешимости структур при равенстве периода структуры T и элемента дискретизации ΔX . Показано, что при таком равенстве $\Delta X = T$ элементы структуры неразрешимы, тогда как при $\Delta X = T/2$ ($2\Delta X = T$) легко убедиться, что все разрешается.

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, он был принят и в российской практике ДЗЗ [19]. Недостатком критерия GSD (23) является то, что он дает ошибочную оценку пространственного разрешения. 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 данных ДЗЗ на местности [11]. Однако, вопреки результатам многочисленных экспериментов, в качестве оценки величины пространственного разрешения цифровых систем ДЗЗ на местности используют проекцию пикселя на зондируемую земную поверхность GSD (23), то есть на практике имеет место неоправданное отождествление понятий линейного пространственного разрешения и предельного геометрического разрешения. Существует мнение [11], что такой подход к оценке про-

странственного разрешения АКС ДЗЗ на местности критерием GSD (23) «...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. 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 линейного пространственного разрешения российским ГОСТом [21].

Предельное разрешение на местности GSD фактически характеризует минимальный размер воспринимаемого АКС ДЗЗ объекта на зондируемой земной поверхности, а не минимальное расстояние между раздельно воспроизводимыми (разрешаемыми) объектами. Понятие «предельное разрешение» ближе к понятию «резкость» изображения, а не к понятиям «разрешающая способность» и «пространственное разрешение», и потому не может быть использован для оценки линейного пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ.

Реальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности — критерий РКС

В соответствии с проведенным выше анализом очевидно, что реальное пространственное разрешение цифровых АКС ДЗЗ определяется линейным пространственным разрешением в традиционном понимании этого термина как величина, обратная разрешающей способности (здесь — частоте

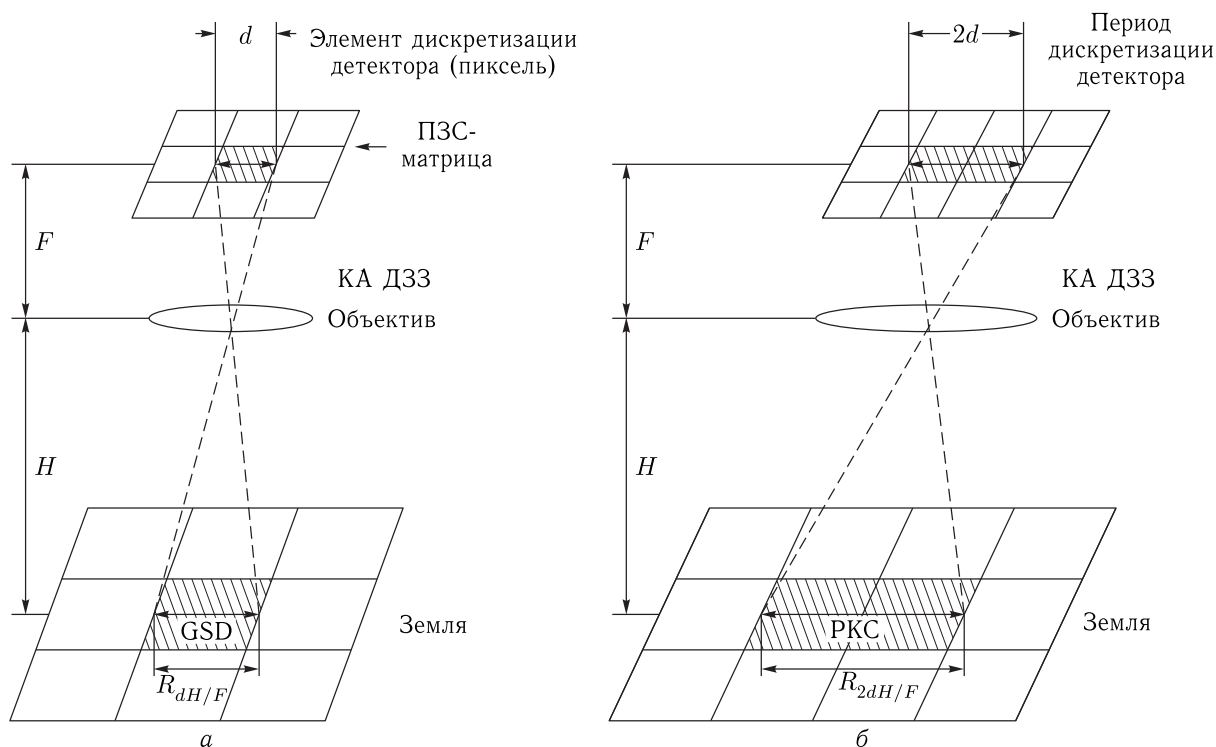


Рис. 5. Оценка инструментального разрешения АКС ДЗЗ на местности: а) предельного — критерий GSD и б) линейного — критерий PKC

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 PKC), интуитивно предложенный в АО «Российские космические системы» [20]. 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 [21]. На основании сравнения (23) и (25) очевидно, что

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

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

На рис. 5 дана иллюстрация критериев оценки предельного (GSD) и линейного (PKC) разрешения АКС ДЗЗ на местности.

Наряду с рассмотренными критериями оценки разрешения цифровых АКС ДЗЗ на местности, существует дифракционный предел линейного пространственного разрешения, который определяет потенциальные возможности ОЭА по достижению максимального пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности в соответствии с известной формулой [2], аналогичной (5)

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

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 несовершенства проектирования ОЭА АКС ДЗЗ

Для оценки степени согласования объектива и цифрового детектора проектируемой ОЭА по критерию Найквиста введено [22] 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 $R_{\text{РКС}} = R_{2dH/F}$ 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

$$R_{\text{РКС}} = R_{\lambda H/D} \text{ (м)}, \quad (29)$$

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

Рассмотрим другой коэффициент качества ОЭА, обозначим его K_O , введенный в [20*], как отношение критерия GSD (23) к дифракционному пределу линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности $\lambda H/D$ (27)

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

где $K_O \geq 1$.

Ситуация, когда $K_O = 1$, представляет границу применимости критерия GSD для оценки предельного 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 [22], противоречит физическому смыслу.

Из сравнения (28) и (30) следует, что

$$K = 2K_O \text{ (раз)} \quad (31)$$

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

$$K \geq 2 \text{ (раз)}. \quad (32)$$

Полученное ограничение (32) на совершенство ОЭА АКС ДЗЗ, обусловленное использованием критерия GSD , подтверждается значениями коэффициентов несовершенства проектирования ОЭА большими двух ($K > 2$) для всех существующих АКС ДЗЗ сверхвысокого разрешения [23], представленных в таблице.

Отсюда видно, 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 предела разрешения АКС ДЗЗ на местности. Покажем это на конкретном примере несовершенного проектирования АКС ДЗЗ на базе критерия предельного геометрического разрешения — критерия GSD .

Технология несовершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия GSD

Проектируя ОЭА АКС ДЗЗ, на базе критерия GSD выполняют следующую последовательность операций [24]:

1) техническим заданием задают паспортные данные для АКС ДЗЗ такие, например, как: требуемое геометрическое разрешение АКС ДЗЗ на местности $R_{GSD} = R_{\text{ГРМ}} = 0,6$ м, средняя высота АКС ДЗЗ над зондируемой земной поверхностью

Таблица. Коэффициент несовершенства проектируемой ОЭА АКС ДЗЗ – K при использовании критерия GSD ($K > 2$)

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Параметр				Согласующий фокус $F_c = FK$ (м)
		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	30
2	QuikBird-2	0,6	8,8	12	2,95	25,96
3	OrbView-3	0,45	3,0	6	3,29	9,87
4	EROS-B	0,5	5,0	7	2,56	12,8
5	Cartosat-2	0,7	5,6	7	3,2	17,92
6	WorldView-1	0,6	8,8	8	2,32	20,42
7	GeoEye-1	1,1	13,3	8	2,4	31,92
8	WorldView-2	1,1	13,3	8	2,4	31,92
9	Pleiades-1	0,65	12,9	13	2,39	30,83
10	WorldView-3	1,1	13,3	6,7	2,01	26,73
11	Ресурс-ДК1	0,5	4,0	9	4,09	16,36
12	Ресурс-П	0,5	4,0	6	2,73	10,92

$H = 600$ км и средняя длина волны солнечного излучения подсвета земной поверхности $\lambda = 0,6$ мкм;

2) выбирают реально существующий цифровой детектор ОЭА с размером элемента разрешения (пикселя) d , равным, например, $d = 4,6$ мкм;

3) определяют исходные данные для проектирования ОЭА, такие как $R_{ГРМ}$, d , H и λ ;

4) формируют оценку предельного инструментального разрешения АКС ДЗЗ на местности $R_{dH/F}(GSD)$, равной требуемому геометрическому разрешению АКС ДЗЗ на местности $R_{ГРМ} = 0,6$ м:

$$R_{dH/F} = R_{ГРМ} = 0,6 \text{ м}; \quad (33)$$

5) определяют дифракционное разрешение МКА ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$, равным требуемому геометрическому разрешению МКА ДЗЗ на местности $R_{ГРМ}$:

$$R_{\lambda H/D} = R_{ГРМ} = 0,6 \text{ м}; \quad (34)$$

6) на основании равенства (34) определяют требуемый диаметр апертуры объектива ОЭА как

$$D = \lambda H / R_{ГРМ} \text{ (м)}, \quad (35)$$

а, подставляя в (35) $\lambda = 0,6$ мкм, $H = 600$ км, $R_{ГРМ} = 0,6$ м, получают

$$D = 0,6 \text{ м}; \quad (36)$$

7) формируют коэффициент качества проектируемой ОЭА АКС ДЗЗ как

$$K_O = R_{dH/F} / R_{\lambda H/D} = dD / \lambda F, \quad (37) \equiv (30)$$

где $K_O \geq 1$;

8) устанавливая требуемый коэффициент качества проектируемой ОЭА K_O , равным единице,

$$K_O = dD / \lambda F = 1, \quad (38)$$

на основании формулы (38) определяют требуемое фокусное расстояние проектируемой ОЭА как

$$F = dD / \lambda \text{ (м)}, \quad (39)$$

а, подставляя в (39) значения величин $d = 4,6$ мкм, $D = 0,6$ м, $\lambda = 0,6$ мкм, получают

$$F = 4,6 \text{ м}; \quad (40)$$

9) из условия (38) следует, что

$$\lambda F/D = d \text{ (мкм)}, \quad (41)$$

то есть здесь на дифракционный элемент разрешения объектива (радиус диска Эри) $\lambda F/D$ в изображении приходится один элемент разрешения (пиксель) d цифрового детектора.

Соотношение (41) свидетельствует о том, что использование критерия GSD ($R_{dH/F}$) при проектировании ОЭА не позволяет согласовать ОЭА АКС ДЗЗ по критерию Найквиста (18) \equiv (12).

Нетрудно убедиться, что коэффициент несовершенства проектирования ОЭА K , определяемый (28), в данном случае, для полученных $D = 0,6$ м и $F = 4,6$ м, равен двум ($K = 2$). Также очевидно, что при проектировании ОЭА на базе геометрического разрешения $R_{ГРМ}$, линейное разрешение $R_{ЛРМ}$ спроектированной ОЭА в соответствии с (26) будет в 2 раза хуже $R_{ГРМ}$, то есть ОЭА, спроектированная на базе критерия GSD ($R_{ГРМ} = 0,6$ м), будет иметь инструментальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности $R_{ЛРМ} = 1,2$ м, а эффективный диаметр $D_{\text{Э}} = D/K = 0,3$ м.

Последовательность операций п. 1–9 несовершенного проектирования ОЭА на базе критерия GSD [24] представлена на рис. 6.

Здесь необходимо заметить, что формула (34) отмечена красным цветом, так как она является некорректной. Нельзя приравнять дифракционное (линейное) пространственное разрешение и геометрическое (предельное) разрешения напрямую, а только с учетом соотношения (26), то есть правильно формулу (34) надо было бы записать так

$$R_{\lambda H/D} = 2R_{ГРМ} = 1,2 \text{ м}, \quad (34^*)$$

а формулу (35) необходимо было бы записать так:

$$D = \lambda H/2R_{ГРМ} \quad (35^*)$$

и после подстановки в (35*) можно было бы получить

$$D = 0,3 \text{ м}, \quad (36^*)$$

то есть при корректном (34*) проектировании получили бы $D = D_{\text{Э}} = 0,3$ м и не было бы неоправданных финансовых потерь [25] на создание телескопа с апертурой $D = 0,6$ м (36).

Проведенные исследования [25] показали, что традиционное несовершенное проектирование ОЭА на базе критерия GSD ведет к информационным (в K раз) и финансовым (в K^β раз) потерям создания АКС ДЗЗ, где β — показатель степени масштабного закона стоимости ($2 \leq \beta \leq 3$).

Технологии совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия РКС

Для предотвращения информационных и финансовых потерь несовершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия GSD и их недопущения в будущем разработаны две новые технологии совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия РКС. Одна технология [26, 27] предложена для совершенствования ранее несовершенного спроектированной ОЭА при модернизации АКС ДЗЗ, а вторая технология [28, 29] предложена для совершенного проектирования вновь создаваемой ОЭА на этапе разработки и создания новой АКС ДЗЗ.

1. Технология совершенствования несовершенной ОЭА при модернизации АКС ДЗЗ

Для согласования ранее созданной несовершенной ОЭА по критерию Найквиста на этапе модернизации АКС ДЗЗ предложена и запатентована [26, 27] технология оценки и максимизации инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности, включающая следующую последовательность операций:

1) задают паспортные данные несовершенного спроектированной ОЭА АКС ДЗЗ, такие как D , F , d , H , λ ;

2) по паспортным данным ОЭА АКС ДЗЗ определяют период дискретизации цифрового детектора $2d$ и формируют его проекцию на зондируемую земную поверхность как $R_{2dH/F} = 2dH/F$

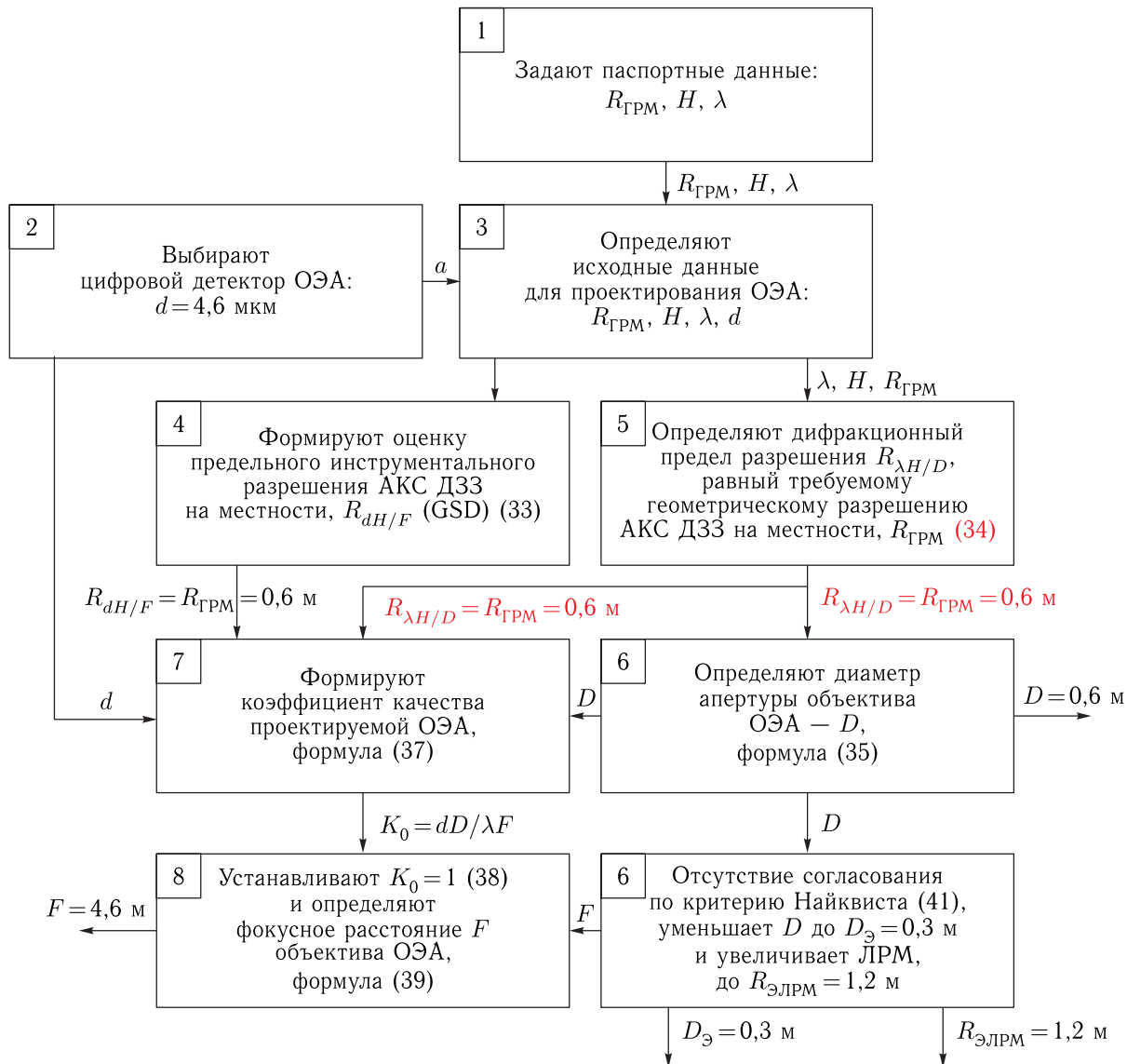


Рис. 6. Блок-схема технологий несовершенного проектирования ОЭА на базе критерия *GSD*

и по полученной величине $R_{2dH/F}$ (критерий РКС) оценивают инструментальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности;

3) далее определяют дифракционный предел линейного пространственного разрешения ОЭА АКС ДЗЗ на местности как $R_{\lambda H/D} = \lambda H/D$;

4) сравнивают его с полученной оценкой инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности $R_{2dH/F}$, для чего формируют их отношение как $R_{2dH/F}/R_{\lambda H/D} = M^X$ и получают величину $M^X = K$, характеризующую степень рассогласования по критерию

Найквиста разрешений объектива и цифрового детектора ОЭА;

5) затем для достижения дифракционного предела линейного разрешения согласуют ОЭА АКС ДЗЗ по критерию Найквиста, для чего определяют величину согласующего элемента разрешения (дискретизации) цифрового детектора d_C как $d_C = d/M^X$;

6) уменьшают величину элемента дискретизации детектора в M^X раз от величины d до величины d_C , при этом инструментальное линейное разрешение АКС ДЗЗ на местности оценивается

как $R_{2d_c H/F} = 2d_c H/F = 2dH/FM^X$ и совпадает с дифракционным пределом разрешения $R_{2dH/F}/M^X = R_{\lambda H/D}$ АКС ДЗЗ на местности;

7) при отсутствии технической возможности уменьшения величины элемента дискретизации детектора до величины d_c определяют величину согласующего фокусного расстояния объектива F_c как $F_c = F \cdot M^X$;

8) увеличивают фокусное расстояние объектива в M^X раз от величины F до согласующей

величины F_c , при этом инструментальное линейное разрешение АКС ДЗЗ на местности оценивается как $R_{2dH/F_c} = 2dH/F_c = 2dH/FM^X$ и совпадает с дифракционным пределом разрешения $R_{2dH/F}/M^X = R_{\lambda H/D}$ АКС ДЗЗ на местности.

Последовательность операций 1–8 технологии совершенствования несовершенной спроектированной ОЭА [26, 27] представлена на рис. 7.

Эта технология может быть использована для совершенствования ранее несовершенной спроекти-

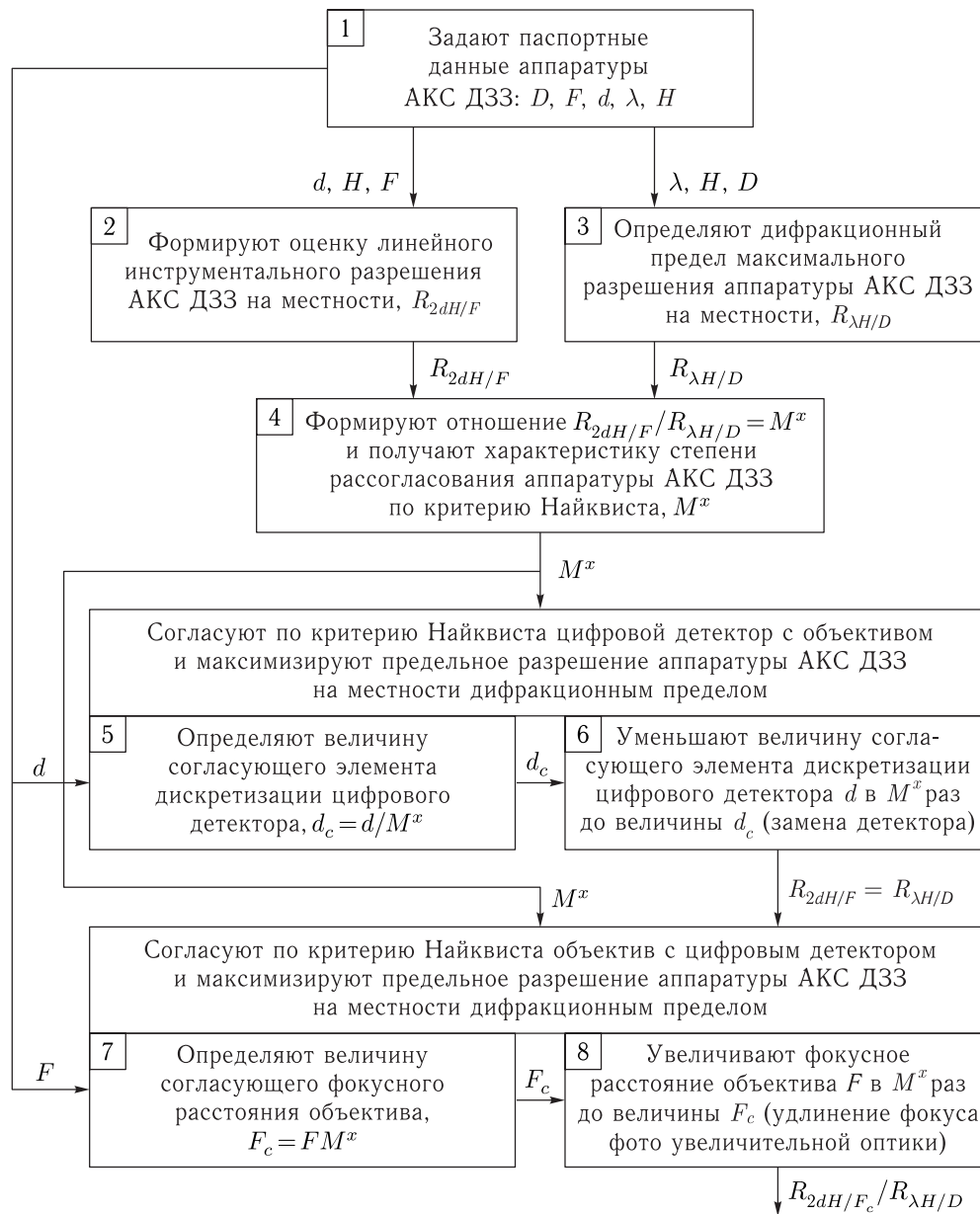


Рис. 7. Блок-схема технологии совершенствования несовершенной ОЭА при модернизации АКС ДЗЗ

рованной ($K \geq 2$) ОЭА при модернизации любых ранее созданных АКС ДЗЗ, представленных, например, в таблице.

2. Технология совершенного проектирования ОЭА при создании новой АКС ДЗЗ

Рассмотрим последовательность операций совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ на базе критерия РКС. Этот критерий дает достоверные результаты оценки инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности и обеспечивает совершенное проектирование его ОЭА [28, 29]:

1) задают паспортные данные для АКС ДЗЗ, такие как: $R_{\text{ЛРМ}} = 0,6$ м, $H = 600$ км, $\lambda = 0,6$ мкм (заметим, что здесь задают линейное разрешение на местности $R_{\text{ЛРМ}}$ вместо геометрического разрешения на местности $R_{\text{ГРМ}}$, задаваемого выше при несовершенном проектировании);

2) выбирают цифровой детектор, например как и в случае несовершенного проектирования с размером пространственного элемента разрешения (пикселем), равным $d = 4,6$ мкм;

3) определяют исходные данные для проектирования ОЭА АКС ДЗЗ: $R_{\text{ЛРМ}}$, d , H , и λ ;

4) формируют проекцию периода дискретизации цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{2dH/F}$;

5) приравнивают сформированную оценку $R_{2dH/F}$ к требуемому линейному пространственному разрешению АКС ДЗЗ на местности:

$$R_{2dH/F} = R_{\text{ЛРМ}} = 0,6 \text{ м}; \quad (42)$$

6) определяют дифракционное разрешение объектива ОЭА АКС ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$ и

7) приравнивают его к требуемому линейному пространственному разрешению АКС ДЗЗ на местности

$$R_{\lambda H/D} = R_{\text{ЛРМ}} = 0,6 \text{ м}; \quad (43)$$

8) исходя из требуемого дифракционного разрешения объектива ОЭА на местности (43), определяют требуемый диаметр апертуры объектива D как

$$D = \lambda H / R_{\text{ЛРМ}} \text{ (м)} \quad (44)$$

и после подстановки исходных данных $\lambda = 0,6$ мкм, $H = 600$ км и $R_{\text{ЛРМ}} = 0,6$ м получают

$$D = 0,6 \text{ м};$$

9) исходя из равенства (42), определяют требуемое фокусное расстояние объектива ОЭА как

$$F = 2dH / R_{\text{ЛРМ}} \text{ {м}} \quad (45)$$

и после подстановки в (45) исходных данных $d = 4,6$ мкм, $H = 600$ км, $R_{\text{ЛРМ}} = 0,6$ м получают

$$F = 9,2 \text{ м}; \quad (46)$$

10) для контроля результатов проектирования определяют коэффициент несовершенства проектируемой ОЭА как

$$K = R_{2dH/F} / R_{\lambda H/D} = 2dD / \lambda F; \quad (47)$$

11) подставляя данные спроектированной ОЭА АКС ДЗЗ ($d = 4,6$ мкм, $D = 0,6$ м, $F = 9,2$ м, $\lambda = 0,6$ мкм) в формулу (47), получают коэффициент совершенства проектируемой ОЭА равным единице ($K = 1$), то есть

$$K = 2dD / \lambda F = 1, \quad (48)$$

откуда

$$2d = \lambda F / D, \quad (49)$$

а

$$R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D}. \quad (50)$$

Полученное выражение (49) есть не что иное, как условие согласования ОЭА АКС ДЗЗ по критерию Найквиста, когда на дифракционный элемент разрешения объектива (радиус диска Эри) $\lambda F / D$ в изображении приходится два элемента разрешения цифрового детектора $2d$.

Итак, получили, что проектируемая ОЭА является совершенной ($K = 1$) (48), согласована по критерию Найквиста (49) и обеспечивает достижение дифракционного предела инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности (50), при этом для нее получено:

$$D = 0,6 \text{ м}, \quad F = 9,2 \text{ м}, \quad d = 4,6 \text{ мкм}, \quad (51)$$

$$R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D} = R_{\text{ЛРМ}} = 0,6 \text{ м}.$$

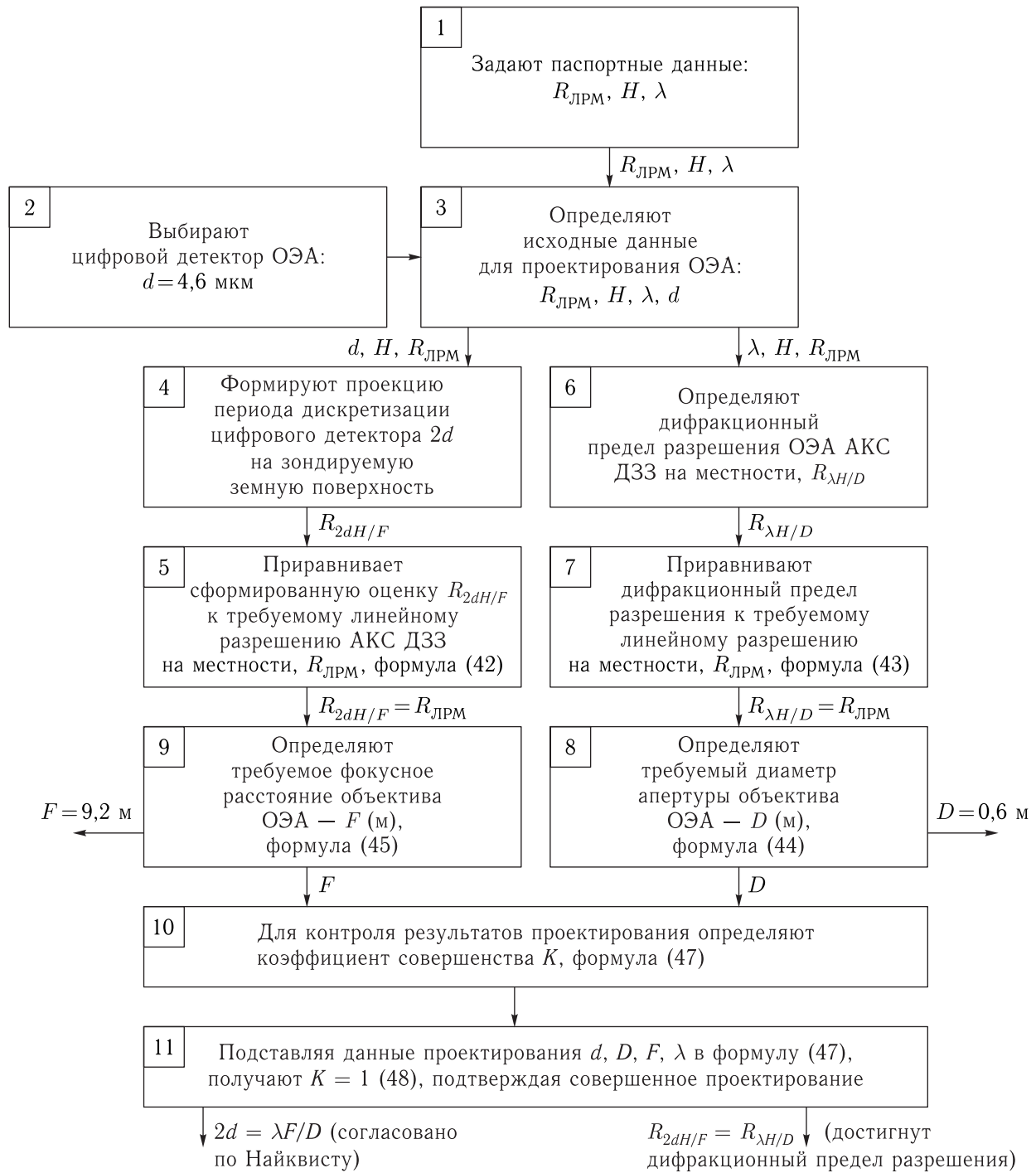


Рис. 8. Блок-схема технологии совершенного проектирования ОЭА на базе критерия РКС

Последовательность операций 1–11 совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ представлена на рис. 8.

В рассмотренном здесь совершенном проектировании на базе критерия РКС получили требуемый

диаметр апертуры объектива $D = 0,6$ м и фокусное расстояние проектируемой ОЭА $F = F_C = 9,2$ м при $K = 1$, а $F_C = F$.

Заметим, что в общем случае (несовершенного) проектирования ОЭА имеем $F_C = F \cdot K$,

где F_C — согласующее фокусное расстояние, F — фокусное расстояние объектива в несогласованной по Найквисту несовершенной ОЭА, а $K = M^X$ — требуемое для согласования увеличение фокусного расстояния объектива, необходимое для совершенствования несовершенной спроектированной ОЭА (см. таблицу) при модернизации АКС ДЗЗ.

В работе [30] на базе критерия «эффективность–стоимость» дана оценка экономической эффективности предложенных технологий [28, 29] совершенного проектирования и компенсации атмосферных искажений в АКС ДЗЗ. Сравнительная оценка экономической эффективности ΔC_{Π} технологий совершенного ($K = 1$) проектирования ОЭА при создании АКС ДЗЗ и экономической эффективности ΔC_{Φ} технологий компенсации атмосферных искажений при функционировании АКС ДЗЗ показала, что в задачах ДЗЗ при обеспечении отсутствия пространственного, временного и частотного усреднений атмосферных искажений [28, 29] ΔC_{Φ} много меньше ΔC_{Π} и суммарная экономическая эффективность создания и функционирования АКС ДЗЗ сверхвысокого разрешения ΔC фактически определяется только экономической эффективностью проектирования ΔC_{Π} , что подчеркивает важность совершенного проектирования ОЭА АКС ДЗЗ ($K = 1$) на базе предложенного критерия РКС.

Полученный результат малой экономической эффективности технологий компенсации атмосферных искажений или, что то же, малых финансовых потерь из-за неиспользования этих технологий, по сравнению с финансовыми потерями из-за несовершенного проектирования ОЭА, является чрезвычайно важным, так как свидетельствует, что атмосферными ограничениями разрешения, а именно случайными сдвигами коротко-экспозиционных изображений ДЗЗ при их ВЗН-детектировании, можно пренебречь при наличии инструментальных ограничений несовершенного проектирования ОЭА, когда $K \geq 2$. При осуществлении предложенной нами технологии совершенного проектирования ОЭА, когда $K = 1$, то есть при устранении инструментальных ограничений разрешения АКС ДЗЗ, необходимо устранять и атмосферные ограничения разрешения, то есть компенсировать атмосферные искажения изображений ДЗЗ технологиями, предложенными в [28, 29].

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 системы его наблюдения, является разрешающая способность. При этом величина, обратная разрешающей способности, называется линейным пространственным разрешением, а размер минимальной детали в изображении, которая еще может быть разрешена, называется предельным разрешением. Разрешающая способность выражает максимальную пространственную частоту с периодом, равным удвоенному значению минимальной ширины предельно разрешаемых объектов. Этот период определяет линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ как удвоенную величину предельного разрешения.

2. Зарубежный критерий оценки предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности — критерий GSD — является некорректным для оценки линейного 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 ($K \geq 2$), что делает невозможным достижение дифракционного предела инструментального 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 об их несовершенстве.

3. В несогласованной по критерию Найквиста (несовершенной) ОЭА критерий GSD дает оценку предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности $R_{GSD} = R_{ГРМ} = R_{dH/F}$, которая в 2 раза меньше инструментального линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности, определяемого $R_{ЛРМ} = R_{2dH/F}$, а в согласованной по Найквисту ОЭА критерий GSD

дает оценку предельного геометрического разрешения АКС ДЗЗ на местности R_{dH/F_C} (где $F_C = F \times K$ — согласующее фокусное расстояние), которая оказывается в 2 раза меньше дифракционного линейного пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности, определяемого $R_{\lambda H/D} = \lambda H/D$, что противоречит физическому смыслу и подтверждает ошибочность использования критерия GSD для оценки пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности.

4. Отсутствие согласования ОЭА АКС ДЗЗ по критерию Найквиста ограничивает инструментальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности величиной $R_{\lambda H/D_{\text{Э}}} = \lambda H/D_{\text{Э}}$, где $D_{\text{Э}}$ — эффективный диаметр апертуры объектива диаметра D , определяемый как $D_{\text{Э}} = D/K$. Обусловленное этим рассогласованием физическое диафрагмирование апертуры объектива диаметра D эффективным диаметром $D_{\text{Э}}$ ухудшает инструментальное линейное пространственное разрешение АКС ДЗЗ на местности в K раз, приводя к информационным потерям дистанционного зондирования, и также приводит к финансовым потерям создания ОЭА АКС ДЗЗ в K^β раз, где $2 \leq \beta \leq 3$. Все это свидетельствует о том, что необоснованное и неоправданное использование критерия GSD при проектировании ОЭА снижает информационные возможности АКС ДЗЗ и ведет к существенным финансовым потерям их создания.

5. 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.

6. Для обеспечения возможности достижения дифракционного инструментального линейного разрешения на местности $R_{\lambda H/D}$ существующих несовершенен спроектированных АКС ДЗЗ предложено при их модернизации на базе критерия РКС согласовывать по критерию Найквиста дифракционное разрешение объектива с пространственным

разрешением (пикселем) цифрового детектора либо путем увеличения фокусного расстояния объектива в M^X раз от F до $F_C = F \cdot M^X$, либо путем уменьшения в M^X раз элемента разрешения (пикселя) цифрового детектора от d до $d_C = d/M^X$, где $M^X = K$.

7. На базе критерия РКС предложена технология совершенного проектирования ОЭА при создании новых АКС ДЗЗ, которая позволяет согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста ($\lambda F/D = 2d$) с коэффициентом совершенства проектируемой ОЭА, равным единице ($K = 1$), и обеспечивает возможность достижения дифракционного предела линейного пространственного разрешения АКС ДЗЗ на местности ($R_{\text{ЛРМ}} = 2dH/F = \lambda H/D$).

8. Предельное геометрическое 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 раздельно, то есть разрешаться. Расстояние между двумя точками на Земле для их раздельного восприятия (разрешения) должно быть больше или равно $2GSD = \text{РКС}$, а не GSD , как часто ошибочно считают. Критерий GSD соответствует половине периода штриховой миры аналогового изображения, то есть GSD , введенный в практику ДЗЗ в соответствии с зарубежными стандартами разрешения, эквивалентен одной (светлой или темной) линии штриховой миры и не может оценивать линейное пространственное разрешение, требуемое для оценки разрешения российским ГОСТом. Предельное пространственное разрешение не связано с разрешающей способностью как пространственной частотой, а потому не может характеризовать способность АКС ДЗЗ раздельно воспринимать (разрешать) близкие мелкие детали объекта. Предельное разрешение на местности GSD характеризует минимальный размер разрешаемого АКС ДЗЗ объекта на земной поверхности, а не минимальное расстояние между раздельно воспроизводимыми (разрешаемыми) объектами. Фактически в ДЗЗ понятие «предельное разрешение» ближе к понятию «резкость» изображения [3, 31], а не к понятиям «разрешающая способность» и «пространственное

разрешение» и потому не может быть использовано для оценки пространственного разрешения и проектирования АКС ДЗЗ. Заметим, что в наземной астрономии [32] понятие «резкость» изображения давно и успешно используется в адаптивных технологиях перед детекторной и последетекторной компенсации атмосферных искажений для повышения резкости изображений космических объектов.

9. Во избежание дальнейшего ошибочного использования в РФ [20*] зарубежного критерия оценки предельного геометрического разрешения — критерия *GSD* — в АО «Российские космические системы» предложен [20] и запатентован [26] российский критерий оценки инструментального линейного пространственного разрешения — критерий РКС, который должен быть стандартизован российским ГОСТом и использован для оценки качества и проектирования АКС ДЗЗ.

Список литературы

- Image Quality. Ed. P.S. Cheatham // Proc. of the SPIE. 1981. Vol. 310. 350 p.
- Уэзерелл У. Оценка качества изображения / Проектирование оптических систем. Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. С. 178–332.
- Занин К.А. Методы проектирования оптико-электронных комплексов космических аппаратов / Проектирование автоматических космических аппаратов. Под ред. В.В. Ефанова, К.М. Пичхадзе. М.: НПО им. С.А. Лавочкина, 2013. Т. 1. 261 с.
- ГОСТ 2653-80. Фотографическая сенситометрия. Термины, определения и буквенные обозначения величин. Введен 01.01.1982 г. М.: Изд-во стандартов, 1980. 40 с.
- Lord Rayleigh / (Strutt J.W.) // Phil. Mag. 1896. V. XLII. P. 167.
- ГОСТ 23935-79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. Введен 01.01.1981 г. М.: Изд-во стандартов, 1979. 20 с.
- ГОСТ 2819–84. Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности. Введен 01-01-85. М.: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
- Кононов В. Основы методики расчета разрешающей способности и точности определения координат аэрофототопографических систем. <http://www.geomatika.kiev.ua/training/Data Capture/Remote Sensing/chapter 103.html>
- Характеристика качества изображения на сайте НТЦ Красноярский завод им. С.А. Зверева. <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html>
- Алтынов А.Е., Севастьянова М.Н., Серебряков С.А. Расчет пространственного разрешения съемочной системы. Учеб. пособ. М.: МИИГАиК, 2019. 205 с.
- Замшин В.В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 1. С. 43–51.
- Лавров В.В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. 2010. № 2. С. 19–24.
- Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 386 с.
- Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи — Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале УФН. 2006. Т. 176, № 7. С. 762–770.
- Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Trans. AIEE. April, 1928. Vol. 47. P. 617–644.
- Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proc. Institute of Radio Engineers. 1948. Vol. 37, № 1. P. 10–21.
- Молчанов А.С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова–Найквиста–Шеннона // Инженерные решения. 2019. № 2 (3). С. 1–7.
- Ground sample distance — Wikipedia. https://www.yandex.ru/en.wikipedia.org/wiki/ground_sample_distance
- Хмелевской С.И. Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. Критерии сравнения и оценки // Геопрофи. 2011. № 1. С. 11–16.
- Свиридов К.Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4, вып. 2. С. 20–28.

- 20.* 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, том 4, выпуск 2, с. 20–28 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, вып. 1. С. 48–51.
21. ГОСТ 15114–78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. Введен 30-01-78. М.: Изд-во стандартов, 1978. 6 с.
22. Свиридов К.Н., Тюлин А.Е. О критериях оценки предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности // Информация и космос. 2018. №3. С. 143–146.
23. Свиридов К.Н., Тюлин А.Е., Волков С.А. Реальное инструментальное разрешение на местности зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения // Информация и космос. 2019. №1. С. 150–159.
24. Свиридов К.Н. Тюлин А.Е. О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2018. №4. С. 136–145.
25. Тюлин А.Е., Свиридов К.Н. Информационные и финансовые потери несовершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) // Информация и космос. 2020. №1. С. 152–160.
26. Патент №2669262 Российской Федерации, МПК: 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; заявлено 20.12.2017; опубликовано 09.10.2018. Бюлл. №28. 23 с.
27. Свиридов К.Н., Тюлин А.Е. Новая технология оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2019. №2. С. 118–124.
28. Патент №2730886 Российской Федерации, МПК 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»; заявлено 04.10.2019; опубликовано 26.08.2020. Бюлл. №24. 35 с.
29. Свиридов К.Н., Тюлин А.Е., Гектин Ю.М. Технологии достижения дифракционного разрешения изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов // Информация и космос. 2021. №1. С. 160–177.
30. Тюлин А.Е. Экономическая эффективность новых технологий создания и функционирования малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения // Информация и космос. 2021. №2. С. 156–164.
31. Молчанов А.С. Оценка качества аэрофотосистем методом математического моделирования с использованием критерия Шаде // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. №1. С. 28–33.
32. Свиридов К.Н. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. М.: Знание, 2005. 452 с.