

УДК 528.8

Зарубежный критерий *GSD* – причина несовершенного проектирования малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Foreign *GSD* criterion is the reason for the imperfect design of small spacecraft for Earth remote sensing

Свиридов / Sviridov K.

Константин Николаевич

(contact@spacecorp.ru)

доктор технических наук, профессор,

заслуженный изобретатель РФ.

АО «Российская корпорация ракетно-космического

приборостроения и информационных систем»,

главный научный сотрудник.

г. Москва

Ключевые слова: критерий Найквиста – Nyquist criterion; критерий *GSD* и несовершенное проектирование *GSD* – criterion and imperfect design; информационные потери – information loss; финансовые потери – financial loss; критерий РКС и совершенное проектирование – RSS criterion and perfect design.

Рассматриваются существующие малые космические аппараты (МКА) ДЗЗ. Анализируется их оптико-электронная аппаратура (ОЭА). Показано, что несовершенство проектирования ОЭА на базе критерия *GSD* ($K \neq 1$), помимо информационных потерь линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности в K раз, ведет и к финансовым потерям создания МКА ДЗЗ в K^β раз, где K – коэффициент несовершенства проектирования ОЭА, β – показатель степени масштабного закона стоимости ($2 \leq \beta \leq 3$). Причина несовершенного проектирования и указанных потерь создания МКА ДЗЗ в том, что критерий *GSD* не является характеристикой пространственного разрешения, а потому не может быть использован для оценки линейного пространственного разрешения и проектирования МКА ДЗЗ. Во избежание отмеченных потерь в планируемых к созданию МКА ДЗЗ предложен российский критерий РКС оценки инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности.

Existing small remote sensing spacecraft (ERS SSC) are considered. Their optical-electronic equipment (OEE) is analyzed. It is shown that the imperfection of design OEE based on the *GSD* criterion ($K \neq 1$), in addition to the information loss of the linear spatial resolution of the ERS SSC on the terrain by K times, also leads to financial losses in the creation of the ERS SSC by K^β times, where K is the OEE design imperfection factor, β is the exponent of the scale cost law ($2 \leq \beta \leq 3$). The reason for the imperfect design and the indicated losses in the creation of ERS SSC is that the *GSD* criterion is not a characteristic of spatial resolution, and therefore cannot be used to assess the linear spatial resolution and design of ERS SSC. In order to avoid the noted losses in the future ERS SSC design, the Russian RSS criterion for estimating the linear spatial resolution of the ERS SSC on the terrain is proposed.

Введение

Согласно общепринятой классификации [1], космические аппараты ДЗЗ разделяются по массогабаритным характеристикам на большие и малоразмерные. Границей раздела считается масса – 1000 кг. Малоразмерные космические аппараты, в свою очередь, подразделяются на:

- пикоспутники – менее 5 кг;
- наноспутники – от 5 до 50 кг;
- микроспутники – от 50 до 200 кг;
- малые КА ДЗЗ – от 200 до 1000 кг.

В соответствии с этой классификацией рассмотрим малые КА (МКА) ДЗЗ.

Анализ мировых тенденций развития аппаратуры и технологий построения и применения средств ДЗЗ демонстрирует повышенный интерес к созданию и использованию группировок МКА ДЗЗ, обеспечивающих возможность наблюдения «...любого участка земной поверхности в любое время...» с высоким пространственным разрешением. Подобные группировки могут состоять из 50–60 МКА ДЗЗ, расположенных на низких круговых солнечно-синхронных орбитах. Орбитальное положение МКА в группировке

выбирается и поддерживается таким образом, чтобы обеспечивать минимальное время подлета к зоне интереса. При указанном числе МКА перерывы в наблюдении произвольных участков земной поверхности могут составлять 20–30 минут. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) таких МКА ДЗЗ должна иметь высокую пространственную разрешающую способность при малых весах и габаритах.

Каждый МКА в группировке должен обеспечивать максимально возможное время наблюдения выбранного участка земной поверхности с максимальным (дифракционным) разрешением, при этом важно подчеркнуть, что требования к МКА ДЗЗ по его производительности, определяемой размером поля зрения ОЭА, здесь не предъявляются вследствие большого количества МКА.

На практике трудно совместить несовместимое и обеспечить одновременно широкое поле зрения и высокое разрешение. При наличии не одного, а группировки малых космических аппаратов ДЗЗ отпадает необходимость обеспечения широкого поля зрения каждого МКА ДЗЗ в ущерб достижению его высокого пространственного разрешения.

В последние годы широкое применение диодных линеек и матриц в качестве приемников изображений 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

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

На рис. 1 представлена блок-схема оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) МКА 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 инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности. Информационный критерий Найквиста [2] устанавливает условие согласования по разрешению объектива и цифрового детектора ОЭА, а именно требует, чтобы «на дифракционный элемент разрешения объектива в фокальной плоскости (радиус диска Эри) $R_{\lambda F/D} = \lambda F/D$ 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 (1) 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:

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

откуда получаем:

$$\lambda F / D = 2d \{ \text{мм} \}, \quad (3)$$

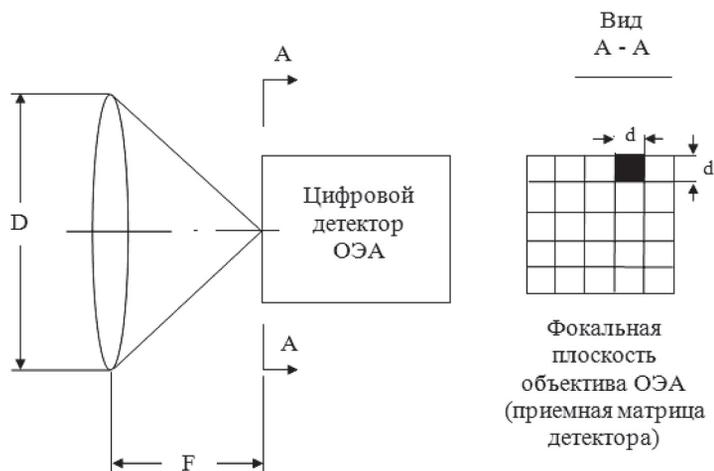


Рис. 1. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли (МКА ДЗЗ)

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

Зарубежный критерий GSD оценки предельного геометрического разрешения МКА ДЗЗ на местности

Сегодня [3] в качестве характеристики пространственного разрешения цифровых МКА ДЗЗ ошибочно используется предельное разрешение, а именно размер пикселя цифрового детектора в изображении d и/или его проекция – предельное геометрическое разрешение КА ДЗЗ на местности, называемое GSD [4] и определяемое как:

$$R_{GSD} = R_{ГРМ} = R_{dH/F} = dH / F \text{ } \{M\}, \quad (4)$$

где H – высота МКА ДЗЗ над земной поверхностью.

«Данная тенденция [3] 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 «пиксельный» подход и покажем неправомерность его использования для оценки пространственного разрешения, то есть способности МКА ДЗЗ разделять (разрешать) близкие объекты и/или 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 понимаются представление непрерывного аналогового сигнала совокупностью отсчетов-выборок [5]. В соответствии с теоремой Котельникова [6] (Найквиста [7], Шеннона [8]) любую непрерывную функцию с ограниченным спектром, занимающим полосу от 0 до f_N , можно представить с помощью ее дискретных значений, взятых через равные интервалы d с частотой выборки (дискретизации) $f_{1/d} = 2f_N$. 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 детектора.

Рассмотрим теорему Котельникова, введенную для временных сигналов, с точки зрения дискретизации пространственного распределения интенсивности изображения, получаемого в цифровых МКА ДЗЗ. В этом случае размер проекции пикселя d на местности (4) $\Delta X = R_{dH/F} = dH / F$ (GSD) можно считать интер-

валом дискретизации на местности. Тогда $f_{1/\Delta X} = 1/\Delta X$ – частота дискретизации на местности, а разрешающая способность цифровых МКА ДЗЗ на местности определяется проекцией частоты Найквиста f_N (2) на Землю, обратной периоду дискретизации $2\Delta X = 2dH / F = R_{ПКС}$ [16], характеризующему инструментальное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ на местности. При этом системой могут быть переданы пространственные частоты на местности f , не превышающие максимальную пространственную частоту $f_{1/2\Delta X}$

$$f \leq f_{1/2\Delta X} = 1/R_{ПКС} \text{ } \{\text{пар линий/мм}\} \quad (5)$$

с минимальным периодом на местности

$$R_{ПКС} = (1/f_N)H / F = 2R_{GSD}.$$

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), как ошибочно считают, и это очень важно! Этот результат свидетельствует о том, что предельное геометрическое разрешение GSD , как проекция пикселя d на Землю, ΔX (4), ошибочно отождествляемое с линейным пространственным разрешением цифровых МКА ДЗЗ, нельзя воспринимать в том смысле, что объекты или их детали, находящиеся друг от друга на расстоянии ΔX , будут восприниматься отдельно, то есть разрешаться, хотя возможны частные случаи с вероятностью 11% [9], когда это может произойти за счет «попадания в пиксель». Критерий GSD (4) оценки предельного геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности был принят в практике ДЗЗ с появлением цифровых детекторов: сначала за рубежом, где он был назван GSD (*Ground Sample Distance*) [10], а впоследствии, без каких-либо обоснований правомерности его использования и вопреки российскому ГОСТ [11], он был принят и в российской практике ДЗЗ [12]. «Эксперименты [3] по оценке пространственного разрешения КА 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». Однако, вопреки результатам многочисленных экспериментов, в качестве оценки величины пространственного разрешения цифровых систем ДЗЗ на местности используют проекцию пикселя на зондируемую земную поверхность GSD (4), то есть на практике имеет место неоправданное отождествление понятия линейного пространственного разрешения с понятием предельного геометрического разрешения. Существует мнение [3], что такой подход к оценке пространственного разрешения КА ДЗЗ на местности критерием GSD , а не $2GSD$, «...используется для преднамеренного завышения деклари-

руемых 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. За рубежом введение в практику ДЗЗ критерия GSD было связано с зарубежными стандартами разрешения [13], 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 ГОСТ [11].

Предельное разрешение на местности GSD фактически характеризует минимальный размер объекта, воспринимаемого МКА ДЗЗ на зондируемой земной поверхности, а не минимальное расстояние между двумя раздельно воспринимаемыми (разрешаемыми) объектами. Понятие «предельное разрешение» ближе к понятию «резкость» изображения, а не к понятиям «разрешающая способность» и «пространственное разрешение», а потому не может быть использовано для оценки пространственного разрешения и проектирования ОЭА МКА ДЗЗ, так как это ведет к несовершенному проектированию ОЭА, и, как следствие, к информационным и финансовым потерям создания МКА ДЗЗ. Покажем это.

Критерий Найквиста совершенного проектирования ОЭА МКА ДЗЗ

Для обеспечения возможности достижения дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности необходимо осуществлять совершенное проектирование ОЭА, то есть согласовывать объектив и цифровой детектор ОЭА по критерию Найквиста (3). Оценим наличие такого согласования ОЭА в существующих МКА ДЗЗ.

Анализ проведем на примере МКА ДЗЗ «Аист-2Д», а полученные результаты обобщим на все существующие МКА ДЗЗ, представленные ниже в таблице 1. Исследуем его ОЭА, имеющую в результате проектирования на базе критерия GSD следующие технические характеристики [14]: диаметр объектива ОЭА $D=0,36$ м; фокусное расстояние объектива ОЭА $F=2$ м; размер пикселя цифрового детектора ОЭА $d=6$ мкм при заданных: средней высоте МКА ДЗЗ $H=490$ км; проекции пикселя на Землю (предельном геометрическом разрешении МКА ДЗЗ на местности) $GSD=R_{ГРМ}=1,47$ м и средней длине волны солнечного излучения подсвета земной поверхности $\lambda=0,6$ мкм.

Высшая пространственная частота объектива (частота отсечки), присутствующая в формируемом

дифракционном изображении, с точностью до коэффициента определяется соотношением [15]:

$$f_{\max} = f_{D/\lambda F} = D / \lambda F \text{ \{пар линий/мм\}} \quad (6)$$

и для МКА «Аист-2Д» при $\lambda=0,6$ мкм, $D=0,36$ м, $F=2$ м она оказывается равной

$$f_{D/\lambda F} = 300 \text{ пар линий/мм}$$

В соответствии с критерием Найквиста [2] для передачи данной пространственной частоты $f_{D/\lambda F} = f_{\max}$ цифровым детектором, то есть для согласования разрешения детектора с дифракционным разрешением объектива (6), требуемая высшая пространственная частота дискретизации согласующего детектора должна быть равна:

$$f_{1/dc} = B \cdot f_{D/\lambda F} \text{ \{пар линий/мм\}}, \quad (7)$$

где $B \geq 2$ – частота выборки, то есть по критерию Найквиста на дифракционный элемент разрешения объектива (радиус диска Эри) $\lambda F/D$ должны приходиться как минимум два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора

$$\lambda F / D = 2d \text{ \{мкм\}} \quad (8) \equiv (3)$$

Тогда при $B=2$ получаем, в соответствии с (7), требование к согласованной по Найквисту пространственной частоте $f_{1/dc}$ выбираемого согласующего цифрового детектора (аналогично рис. 1 [16]), как

$$f_{1/dc} = 2 f_{D/\lambda F} \text{ пар линий/мм} \quad (9)$$

В связи с отсутствием сегодня чувствительных электронных детекторов оптического излучения с таким разрешением (9), соответствующим согласующему пикселю $d_c = 1,7$ мкм, необходимо сначала выбрать реально существующий цифровой детектор с некоторой пространственной частотой $f_{1/d}$ и частотой Найквиста $f_N = f_{1/2d}$, а затем необходимо увеличить фокусное расстояние объектива от величины F до некоторой согласующей величины $F_C = F \cdot M^X$, чтобы удовлетворить условию согласования (10)

$$f_N = f_{1/2d} = D / \lambda F_C = f_{D/\lambda F_C} \text{ \{пар линий/мм\}}, \quad (10)$$

где $f_{D/\lambda F_C} = f_N$ – частота отсечки объектива, согласованного по Найквисту с выбранным цифровым детектором.

Для цифрового детектора МКА ДЗЗ «Аист-2Д» с элементом разрешения (пикселем), равным $d=6$ мкм, и частотой дискретизации $f_{1/d}$, равной $f_{1/d}=166$ пар линий/мм, (аналогично рис. 2 [16]) имеем:

$$f_N = f_{1/2d} = 83 \text{ пар линий/мм} \quad (11)$$

Оценим требуемое увеличение M^X канала формирования изображений, обеспечиваемое фотоувеличительной оптикой, вводимой в оптико-механический тракт канала формирования изображений для согласования разрешения объектива с разрешением детектора [15]

$$M^X = f_{D/\lambda F} / f_N = 2dD / \lambda F = K \text{ \{раз\}} \quad (12)$$

Величина M^X определяется отношением частоты отсечки объектива к частоте Найквиста цифрового детектора и характеризует степень рассогласования по критерию Найквиста разрешений объектива и цифрового детектора, то есть характеризует степень несовершенства K проектирования ОЭА. При их согласовании (в совершенной ОЭА) имеем $M^X=K=1$.

Тогда при $f_{D/\lambda F} = 300$ пар линий/мм, $f_N = 83$ пар линий/мм и $F = 2$ м, получаем:

$$M^X = K = 3,6 \text{ раз, а } F_C = F \cdot M^X = 7,2 \text{ м} \quad (13)$$

Таким образом получили, что для обеспечения возможности достижения дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности необходимо увеличить фокусное расстояние канала формирования изображений в $M^X=3,6$ раз с $F=2$ м до $F_C=7,2$ м. Подобное увеличение фокусного расстояния фактически без увеличения весов и габаритов ОЭА легко может быть достигнуто с помощью стандартных микрообъективов, давно и успешно используемых для этих целей в астрономии: рис. 2 (рис. 1 из [17]).

При обеспечении указанного согласования дифракционное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ на местности с точностью до коэффициента можно оценить соотношением [2]

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

и при $\lambda = 0,6$ мкм, $H = 490$ км, $D = 0,36$ м для МКА ДЗЗ «Аист-2Д» оно оказывается равным

$$R_{\lambda H/D} = 0,82 \text{ м} \quad (15)$$

Дифракционное разрешение устанавливает предел линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности, который характеризуется минимальной величиной (15).

Информационные потери несовершенного проектирования МКА ДЗЗ

В действительности, однако, рассмотренное выше согласование по Найквисту разрешения объектива с разрешением цифрового детектора ОЭА в МКА ДЗЗ «Аист-2Д» отсутствует, что препятствует достижению его дифракционного пространственного разрешения (15).

Оценим реальное инструментальное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ «Аист-2Д», ограниченное существующим рассогласованием ($K=3,6$) его ОЭА по критерию Найквиста.

При существующем фокусном расстоянии канала формирования изображений в МКА ДЗЗ «Аист-2Д»,

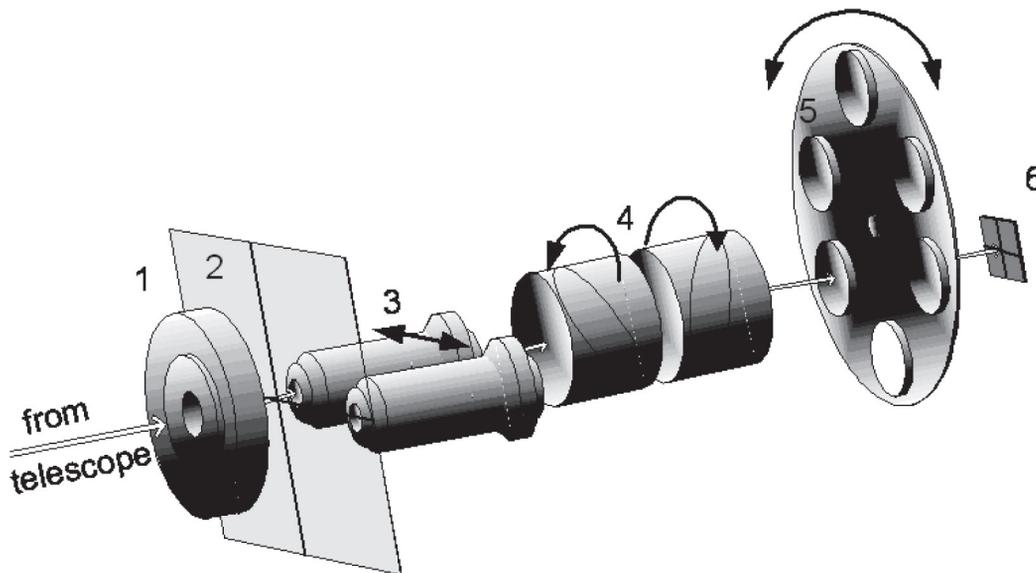


Рис. 2. Компоненты оптико-механического блока спекл-интерферометра БТА: 1 – затвор, 3 – сменные микрообъективы, 4 – призмы для компенсации атмосферной хроматической аберрации, 5 – набор интерференционных фильтров, 6 – EMCCD. Цифрой 2 обозначена фокальная плоскость телескопа. Черными стрелками показано направление перемещения компонентов [17]

равном $F=2$ м, и пространственном элементе разрешения (пикселе) цифрового детектора, равно $d=6$ мкм ($f_{1/d}=166$ пар линий/мм), максимальная пространственная частота объектива, передаваемая детектором без генерации шумов, определяется в соответствии с (5) частотой Найквиста как

$$f_{D_3/\lambda F} = f_N \text{ \{пар линий/мм\}} \quad (16)$$

и равна (аналогично рис. 3 [16])

$$f_{D_3/\lambda F} = 83 \text{ пар линий/мм}$$

Пространственная частота (16) при $\lambda=0,6$ мкм и $F=2$ м соответствует эффективному диаметру апертуры объектива D_3 , определяемому в соответствии с (7), как

$$D_3 = f_{D_3/\lambda F} \lambda F \text{ \{м\}}, \quad (17)$$

и равному

$$D_3 = 0,1 \text{ м}$$

Оценим, какое инструментальное линейное пространственное разрешение на Земле с высоты $H = 490$ км может быть достигнуто в МКА ДЗЗ «Аист-2Д» при эффективном диаметре апертуры его объектива, равно $D_3 = 0,1$ м.

В соответствии с (14) при $\lambda = 0,6$ мкм имеем

$$R_{\lambda H/D_3} = \lambda H / D_3 = 2,94 \text{ м} \quad (18)$$

Итак, получили, что линейное пространственное разрешение на местности, достижимое в МКА ДЗЗ «Аист-2Д», равно $R_{\lambda H/D_3} = 2,94$ м, то есть оно в два раза

хуже заданного предельного геометрического разрешения $R_{GSD} = R_{ГРМ} = 1,47$ м и в $K=3,6$ раз хуже дифракционного линейного пространственного разрешения (15) $R_{\lambda H/D} = 0,82$ м.

Таким образом, на основании полученного результата видно, что несовершенство проектирования ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» с коэффициентом несовершенства, равным $K=3,6$ раз, ведет к информационным потерям разрешения также в $K=3,6$ раз.

Коэффициент несовершенства проектирования ОЭА

Выше мы определили коэффициент несовершенства проектирования ОЭА через отношения пространственных частот (12), а именно отношение частоты отсечки объектива ОЭА (6) к частоте Найквиста цифрового детектора ОЭА (11).

$$K = M^X = f_{D/\lambda F} / f_N = 2dD / \lambda F \quad (19) \equiv (12)$$

В дальнейшем будем называть коэффициент K при $K>1$ коэффициентом несовершенства ОЭА, так как в согласованной по критерию Найквиста (совершенной) ОЭА коэффициент K равен единице ($K=M^X=1$).

При $K=1$ из формулы (19) следует, что

$$2d = \lambda F / D \text{ \{мкм\}}, \quad (20) \equiv (3)$$

а это и есть условие согласования объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста, когда на дифракционный элемент разрешения объектива (радиус диска Эри) $\lambda F/D$ приходится как минимум два (вдоль линии) элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора.

Таблица 1

Несовершенство проектирования оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) МКА ДЗЗ на базе зарубежного критерия GSD ($K \geq 2$)

№ п/п	Наименование МКА ДЗЗ	Страна	Масса М (кг)	Высота орбиты Н (км)	Захват Ш (км)	Диаметр объектива D (м)	Фокус объектива F (м)	Пиксель детектора d (мкм)	Несовершенство ОЭА $K=2dD/\lambda F$ (раз)
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
1.	IKONOS-2	США	726	681	11	0,7	10	12	2,8
2.	Cartosat-2	Индия	712	505	10	0,7	5,6	7	2,9
3.	KompSat-3	Корея	980	685	16,8	0,8	8,6	8,75	2,7
4.	SuperView-1	Китай	560	530	12	0,6	10	9,5	2
5.	EROS-B	Израиль	350	500	7	0,5	5	7	2,3
6.	Pleiades-1	Франция	995	694	20	0,65	12,9	13	2,2
7.	Аист-2Д	Россия	531	490	39	0,36	2	6	3,6

Рассмотрим другой коэффициент качества проектирования ОЭА, обозначим его K_o , введенный ранее в [16*] как отношение критерия $GSD (R_{dH/F})$ к дифракционному пределу разрешения КА ДЗЗ на местности $R_{\lambda H/D}$

$$K_o = (dH / F) / (\lambda H / D) = dD / \lambda F \text{ {раз}}, \quad (21)$$

где $K_o \geq 1$.

Ситуация, когда $K_o = 1$, представляет границу применимости критерия GSD для оценки предельного геометрического разрешения систем ДЗЗ на местности, когда $dH / F = \lambda H / D$, так как ситуация, когда GSD становится меньше дифракционного предела ($K_o < 1$) противоречит физическому смыслу.

Из сравнения (19) и (21) следует, что

$$K = 2K_o \text{ {раз}} \quad (22)$$

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

$$K \geq 2 \text{ {раз}} \quad (23)$$

Полученное ограничение (23) на совершенство ОЭА МКА ДЗЗ, обусловленное использованием критерия GSD , подтверждается существующими на практике значениями коэффициентов несовершенства ОЭА,

большими двух ($K > 2$), для существующих МКА ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения [18], представленных в таблице 1.

Отсюда видно, что, используя критерий GSD , нельзя достичь совершенного проектирования ОЭА, когда $K=1$, то есть нельзя при проектировании согласовать ОЭА по критерию Найквиста и достичь дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности.

Помимо отмеченных выше информационных потерь МКА ДЗЗ «Аист-2Д» из-за несовершенного проектирования его ОЭА имеют место и существенные финансовые потери, обусловленные неоправданными затратами заказчика на создание объектива большого диаметра D при реально определяющем пространственное разрешение МКА ДЗЗ на местности эффективном диаметре $D_э$, меньшем D в K раз. Оценим эти финансовые потери.

Финансовые потери несовершенного проектирования МКА ДЗЗ

Ретроспективный взгляд на совокупную историю создания традиционных астрономических телескопов с точки зрения стоимости их создания C является весьма полезным, так как позволяет определить линию тенденций [19] (масштабный закон) зависимости стоимости создания C от диаметра апертуры D и позволяет по ней оценить как перспективу капи-

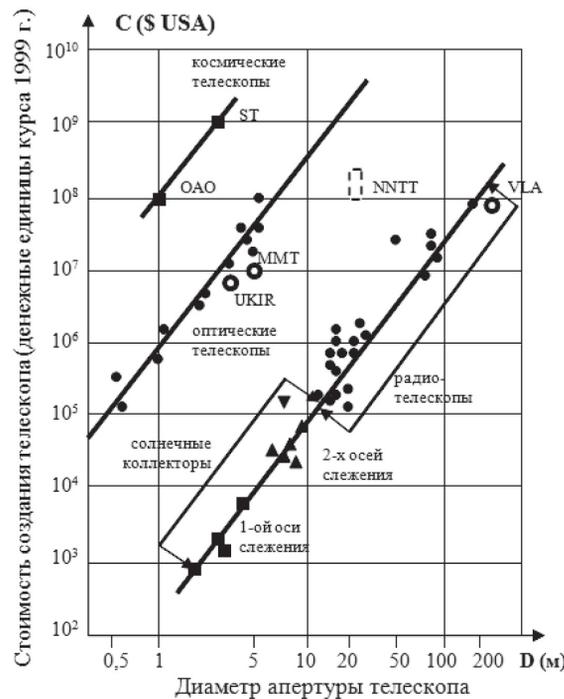


Рис. 3. Масштабные законы (линии тенденций) стоимости создания традиционных телескопов в зависимости от диаметра их приемной апертуры

таловложений, необходимых для создания традиционных оптических систем требуемого диаметра, так и финансовые потери от их неэффективного использования. Подобные оценки являются чрезвычайно актуальными в условиях ограниченного финансирования, так как заставляют задуматься об удешевлении разработки и позволяют оптимизировать построение системы под выделенные ресурсы [20], чтобы избежать финансовых потерь из-за несовершенного проектирования. Рассмотрение масштабных законов стоимости проведем на примере наземных астрономических систем высокого разрешения, обладающих достаточной статистикой зависимости стоимости их создания от диаметра апертуры, чтобы построить функциональную зависимость $C=f(D)$, а полученные по ней результаты обобщим на оптические системы космического базирования.

На основании многолетнего опыта создания традиционных астрономических инструментов получены различные масштабные законы стоимости общего вида

$$C_D = \alpha D^\beta \text{ \{ \$ USA \}} \quad (24) \quad 2 \leq \beta \leq 3 \quad (26)$$

Обобщением стоимости большого числа традиционных астрономических телескопов было получено [19] наиболее распространенное эмпирическое выражение для масштабного закона стоимости (24) в виде

$$C_D = 0,42 \cdot D^{2,63} \text{ \{ \$ USA \}}, \quad (25)$$

где стоимость создания телескопа C выражена в долларах США $\{ \$ USA \}$, а диаметр апертуры телескопа D выражен в метрах $\{ м \}$.

Эта зависимость для наземных оптических телескопов представлена на рис. 3. Здесь же показаны аналогичные зависимости для стоимости создания космических телескопов и радиотелескопов, из которых следует, что космические телескопы на два порядка дороже наземных оптических телескопов, а те, в свою очередь, на три порядка дороже радиотелескопов. Это дает некоторое представление о соотношении требуемых масштабов финансирования в различных отраслях промышленности.

Следует отметить, что в ряде работ были получены другие показатели степени β масштабного закона (24). Так, для телескопов традиционного построения в работе [20] предполагается $\beta=3$, в работе [21] указывается на величину $\beta=2,8$, а в работе [22] говорится о возможности уменьшения величины β до $\beta=2$ при нетрадиционном построении оптического телескопа. Таким образом, в зависимости от технологичности конструкции телескопа показатель степени масштабного закона стоимости изменяется в диапазоне

Этот диапазон является условным и, можно сказать, наиболее вероятным, так как, в принципе, показатель степени β может быть как меньше 2, так и больше 3 в зависимости от того, что при создании телескопа являлось наиболее дорогим: башня, труба, монтировка, оптика (зеркало), электроника или вычислительные средства.

Несмотря на некоторую приближенность масштабного закона стоимости, он позволяет оценить относительные финансовые потери из-за несовершенного проектирования ОЭА КА ДЗЗ [23].

Таблица 2

Относительные информационные $\{K\}$ и финансовые $\{K^\beta\}$ потери МКА ДЗЗ из-за несовершенного проектирования их ОЭА ($K \neq 1$)

№ п/п	Наименование МКА ДЗЗ	Предельное геометрическое разрешение – критерий GSD $R_{GSD}=dH/F$ (м)	Дифракционное пространственное разрешение $R_{\lambda H/D} = \lambda H/D$ (м)	Эффективный диаметр объектива $Dэ=D/K$ (м)	Линейное пространственное разрешение – критерий РКС $R_{PKC}=2dH/F$ (м)	Информационные потери несовершенного проектирования $K=R_{PKC}/R_{\lambda H/D}$ (раз)	Финансовые потери несовершенного проектирования $\Delta C_{\Pi} = K^\beta$ (раз)	
							$\beta = 2$	$\beta = 3$
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1.	IKONOS-2	0,82	0,58	0,25	1,64	2,8	7,84	22
2.	Caztosat-2	0,63	0,43	0,24	1,26	2,9	8,41	24,4
3.	KompSat-3	0,7	0,51	0,3	1,37	2,7	7,29	19,7
4.	SuperView-1	0,5	0,53	0,3	1,06	2,0	4,0	8,0
5.	EROS-B	0,7	0,6	0,22	1,38	2,3	5,29	12,2
6.	Pleiades-1	0,7	0,64	0,3	1,39	2,2	4,84	10,7
7.	Аист-2Д	1,47	0,82	0,1	2,94	3,6	12,96	46,7

Оценим финансовые потери МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на основании масштабного закона стоимости (24).

Предположим, что на создание МКА ДЗЗ с оптическим телескопом диаметра D {м} затрачены денежные средства $C_D = \alpha D^\beta$ {\$ USA}. Однако фактически вследствие несовершенного проектирования ОЭА ($K \neq 1$) получаем телескоп с эффективным диаметром $D_\Sigma = D/K$, стоимость создания которого определяется как $C_{D_\Sigma} = \alpha D_\Sigma^\beta$.

При этом относительные финансовые потери ΔC_Π создания телескопа МКА ДЗЗ диаметра D , обусловленные несовершенством проектирования его ОЭА, можно определить как

$$\Delta C_\Pi = C_D / C_{D_\Sigma} = K^\beta \text{ {раз}} \quad (27)$$

Относительные финансовые потери несовершенного проектирования ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» ($K=3,6$ раз) при традиционном построении телескопа ($\beta=3$) составляют $\Delta C_\Pi=47$ раз, а при нетрадиционном построении телескопа ($\beta=2$) составляют $\Delta C_\Pi=13$ раз.

Результаты аналогичных вычислений по формулам (6)–(27) для других МКА ДЗЗ, представленных в таблице 1, даны в таблице 2 и подтверждают все выводы, сделанные выше для МКА ДЗЗ «Аист-2Д».

На основании данных таблицы 2 видно, что несовершенство проектирования ($K \neq 1$) ОЭА МКА ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения на базе критерия GSD ведет к существенным информационным и финансовым потерям. При этом относительные информационные потери инструментального разрешения МКА ДЗЗ на местности определяются величиной коэффициента несовершенства проектирования ОЭА – K {раз}, а относительные финансовые потери создания МКА ДЗЗ определяются величиной K^β {раз}. То есть потери несовершенного проектирования ОЭА на базе критерия GSD присущи всем существующим сегодня МКА ДЗЗ и КА ДЗЗ [23].

Отмеченные выше потери несовершенного проектирования ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» свидетельствуют о том, что для достижения его дифракционного линейного пространственного разрешения на местности (15) $R_{\lambda H/D} = 0,82$ м необходимо согласование его ОЭА по критерию Найквиста (3), то есть необходимо совершенное проектирование его ОЭА с коэффициентом несовершенства, равным единице ($K=1$).

Здесь важно заметить, что Космический Телескоп им. Хаббла (ST) [24], предназначенный для астрономических наблюдений Космоса, в отличие от всех космических телескопов дистанционного зондирования Земли имеет совершенно спроектированную ОЭА ($K=1$), согласованную по критерию Найквиста и обеспечивающую достижение дифракционного предела инструментального разрешения его оптической системы 0,1 угл.сек. при разрешении одного элемента (пикселя) его ПЗС матрицы 0,043 угл.сек.

Очевидно, что разработчики ST (астрономы) при проектировании его ОЭА знали о необходимости согласования ОЭА по критерию Найквиста и соблюдали это правило, как и российские астрономы [17].

Совершенное проектирование ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д»

Рассмотрим последовательность операций совершенного проектирования ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на базе российского критерия РКС [16, 25], основанного на оценке инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности проекцией периода дискретизации (периода частоты Найквиста) цифрового детектора $2d$ на зондируемую земную поверхность $R_{PKC} = R_{JPM} = R_{2dH/F}$. Критерий РКС получен на основании того, что период дискретизации (два пикселя) детектора, как и его проекция на зондируемую земную поверхность, для цифровых изображений ДЗЗ эквивалентен периоду (двум линиям – штриху и промежутку) штриховой миры, используемой при определении линейного разрешения на местности для аналоговых изображений ДЗЗ в соответствии с действующим российским стандартом оценки пространственного разрешения [11]. Этот критерий дает достоверные результаты оценки инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности и обеспечивает совершенное проектирование его ОЭА в соответствии с нижеследующей последовательностью операций:

1) Задают паспортные данные для МКА ДЗЗ «Аист-2Д», такие как $R_{JPM} = 0,82$ м, $H = 490$ км, $\lambda = 0,6$ мкм (заметим, что здесь задают линейное пространственное разрешение R_{JPM} вместо предельного геометрического разрешения R_{JPM} , заданного ранее [14] при несовершенном проектировании ОЭА);

2) Выбирают цифровой детектор, например, как и в случае несовершенного проектирования [14], с размером пространственного элемента разрешения (пикселем), равным $d = 6$ мкм;

3) Определяют исходные данные для проектирования ОЭА МКА ДЗЗ как R_{JPM} , 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 МКА ДЗЗ на местности

$$R_{2dH/F} = R_{JPM} = 0,82 \text{ м}; \quad (28)$$

6) Определяют дифракционное разрешение объектива ОЭА МКА ДЗЗ на местности как $R_{\lambda H/D}$;

7) Приравнивают его к требуемому линейному разрешению МКА ДЗЗ на местности

$$R_{\lambda H/D} = R_{JPM} = 0,82 \text{ м}; \quad (29)$$

8) Исходя из требуемого дифракционного разрешения объектива ОЭА на местности (29), определяют требуемый диаметр апертуры объектива D как

$$D = \lambda H / R_{\text{ЛРМ}} \{ \text{м} \} \quad (30)$$

и после подстановки в (30) исходных данных: $\lambda=0,6$ мкм, $H=490$ км и $R_{\text{ЛРМ}}=0,82$ м, получают

$$D = 0,36 \text{ м}; \quad (31)$$

9) Исходя из равенства (28), определяют требуемое фокусное расстояние объектива ОЭА как

$$F = 2dH / R_{\text{ЛРМ}} \{ \text{м} \} \quad (32)$$

и после подстановки в (32) исходных данных $d=6$ мкм, $H=490$ км, $R_{\text{ЛРМ}}=0,82$ м, получают

$$F = 7,2 \text{ м}; \quad (33)$$

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

$$K = R_{2dH/F} / R_{\lambda H/D} = 2dD / \lambda F; \quad (34)$$

11) Подставляя данные спроектированной ОЭА МКА ДЗЗ ($d=6$ мкм, $D=0,36$ м, $F=7,2$ м, $\lambda=0,6$ мкм) в формулу (34), получают коэффициент несовершенства проектируемой ОЭА, равным единице ($K=1$), то есть

$$K = 2dD / \lambda F = 1 \quad (35)$$

откуда

$$2d = \lambda F / D, \quad (36)$$

а

$$R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D} \quad (37)$$

Полученное выражение (36) есть ни что иное, как условие согласования ОЭА МКА ДЗЗ по критерию Найквиста, когда на дифракционный элемент разрешения объектива (радиус диска Эри) $\lambda F / D$ в изображении приходится два элемента разрешения (пикселя) $2d$ цифрового детектора.

Итак, получено, что проектируемая здесь ОЭА является совершенной ($K=1$) (35), согласована по критерию Найквиста (36) и обеспечивает достижение дифракционного предела инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности (37), при этом для нее получено:

$$D=0,36 \text{ м}, F=7,2 \text{ м}, d=6 \text{ мкм}, \\ R_{\text{ЛРМ}} = R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D} = 0,82 \text{ м} \quad (38)$$

Последовательность операций (1–11) совершенного проектирования ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» представлена на рис. 4.

В рассмотренном здесь совершенном проектировании на базе критерия РКС получили требуемый диаметр апертуры объектива $D=0,36$ м и фокусное расстояние проектируемой ОЭА $F=F_c=7,2$ м при $K=1$.

Рассмотренная последовательность операций совершенного проектирования, предложенная в [26] и исследованная в [27], обеспечивает совершенное проектирование ОЭА вновь создаваемых МКА ДЗЗ.

В случае совершенствования несовершенной ОЭА уже созданных МКА ДЗЗ при их модернизации предложена другая технология совершенного проектирования [28], в соответствии с которой [29] получаем $F_c = F \cdot K$, где F_c – согласующее фокусное расстояние ($F_c=7,2$ м), F – фокусное расстояние объектива в несогласованной по Найквисту (несовершенной) ОЭА ($F=2$), а $K = M^x = 3,6$ есть требуемое для согласования ОЭА по критерию Найквиста увеличение фокусного расстояния объектива, отмечавшееся выше [17].

Заключение

Итак, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Зарубежный критерий оценки предельного геометрического разрешения МКА ДЗЗ на местности – критерий GSD , определяемый проекцией пикселя цифрового детектора на зондируемую земную поверхность ($R_{GSD} = R_{\text{ГРМ}} = R_{dH/F}$), является некорректным для оценки линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности, требуемого для оценки разрешения российским ГОСТ [11]. Российский стандарт устанавливает, что линейное пространственное разрешение в изображении определяется периодом штриховой миры, то есть суммой светлой и темной линий $R_{\text{ЛРМ}} = 2p$, где p – размер светлой или темной линии – минимального определяемого элемента штриховой миры для аналоговых изображений. В случаях формирования цифрового изображения размер минимального элемента в изображении p равен размеру пикселя d цифрового детектора, а линейное пространственное разрешение на местности определяется проекцией линейного пространственного разрешения в цифровом изображении $R_{\text{ЛРМ}} = 2d$ на Землю, то есть $R_{\text{ЛРМ}} = 2dH / F = R_{2dH/F}$. А это и есть критерий РКС [16] априорной оценки инструментального линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности проекцией двух пикселей (периода частоты Найквиста) цифрового детектора на Землю.

За рубежом введение в практику ДЗЗ критерия GSD было связано с зарубежными стандартами разрешения (ISO), в соответствии с которыми за величину линейного разрешения в изображении, как и на местности, принимается одна линия (светлая или темная) штриховой миры, а не ее период, что

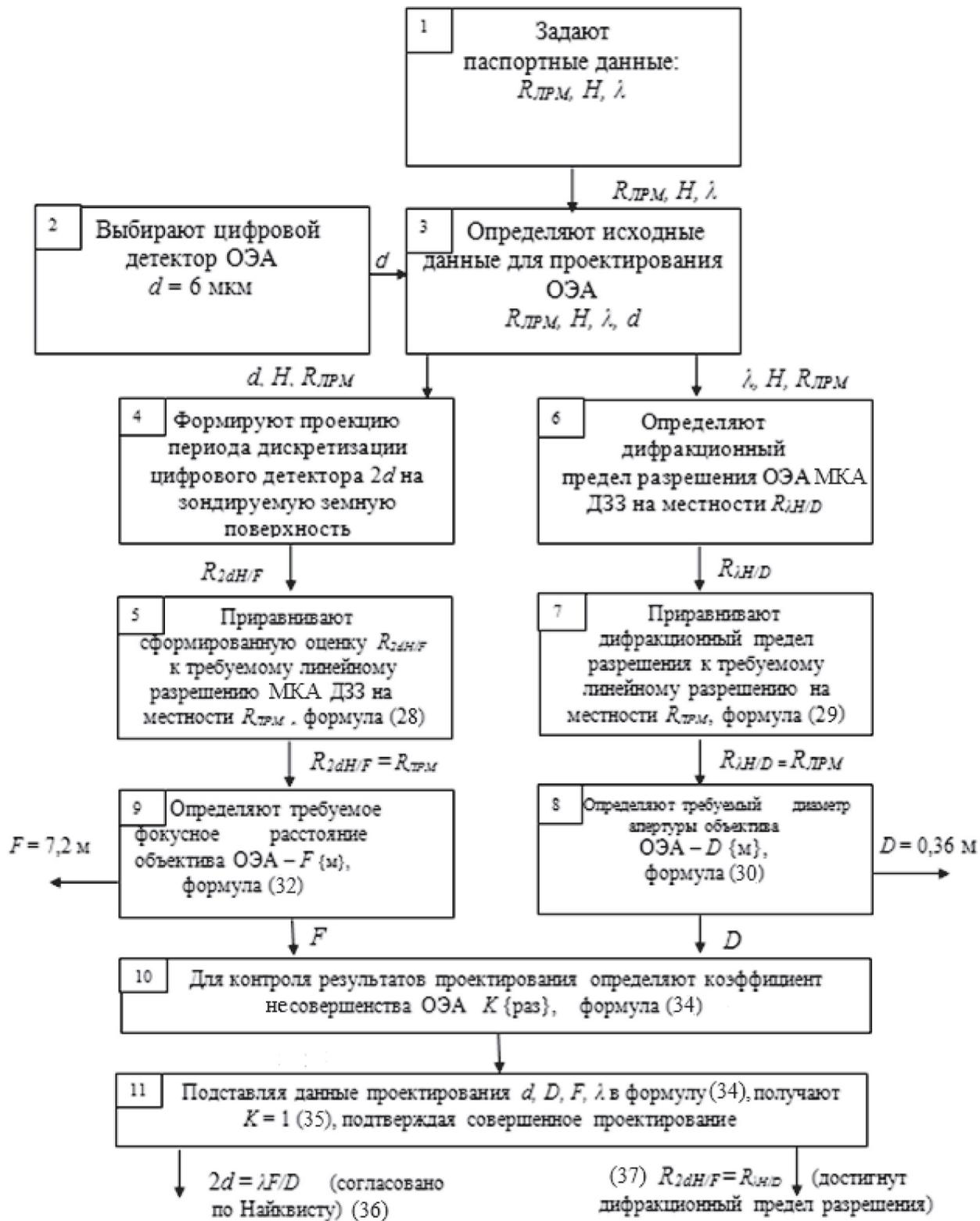


Рис. 4. Блок-схема реализации технологии совершенного проектирования ОЗА на базе критерия РКС оценки линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности

физически неверно. Критерий GSD определяет минимальный размер наблюдаемого объекта, а фактически характеризует «резкость» изображения и не является характеристикой пространственного разрешения, как способности МКА ДЗЗ разделять (пространственно разрешать) два близко расположенных объекта на зондируемой земной поверхности. Поэтому критерий GSD нельзя использовать для оценки линейного пространственного разрешения и проектирования ОЭА МКА ДЗЗ.

2. Использование критерия GSD при проектировании ОЭА МКА ДЗЗ препятствует согласованию объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста, устанавливая ограничение на коэффициент несовершенства K проектируемой ОЭА предельной величиной, равной двум ($K=2$), что делает невозможным достижение дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности. В результате сегодня все КА ДЗЗ и МКА ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения, спроектированные с использованием критерия GSD , имеют коэффициент несовершенства ОЭА, больший двух ($K>2$), что свидетельствует о несовершенстве их проектирования. В согласованной по критерию Найквиста (совершенной) ОЭА коэффициент несовершенства, определяемый, как $K = 2dD/\lambda F$, равен единице ($K=1$).

3. несовершенное проектирование ОЭА ($K \neq 1$) ограничивает инструментальное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ на местности величиной $R_{\lambda H/D_3} = \lambda H/D_3$, где D_3 – эффективный диаметр апертуры объектива диаметра D , равный $D_3 = D/K$. Для МКА ДЗЗ «Аист-2Д» при $D=0,36$ м и $K=3,6$ раз эффективный диаметр объектива ОЭА равен $D_3=0,1$ м, а инструментальное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности, определяемое этим диаметром, оказывается равным $R_{\lambda H/D_3} = 2,94$ м, то есть в K раз хуже дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности, равного $R_{\lambda H/D} = 0,82$ м.

4. Физическое «диафрагмирование» апертуры объектива диаметра D эффективной апертурой диаметра D_3 , обусловленное несовершенным проектированием ОЭА без согласования по критерию Найквиста, не только ухудшает инструментальное линейное разрешение МКА ДЗЗ на местности в K раз, приводя к информационным потерям дистанционного зондирования, но ведет и к финансовым потерям создания МКА ДЗЗ в K^β раз, где β – показатель степени масштабного закона стоимости ($2 \leq \beta \leq 3$). Для МКА ДЗЗ «Аист-2Д» при $K=3,6$ максимальные финансовые потери создания телескопа традиционного построения ($\beta=3$) составляют $\Delta C_{II} = 47$ раз по отношению к затратам на создание МКА ДЗЗ совершенного ($K=1$) проектирования. Таким образом, несовершенное проектирование ОЭА на базе критерия GSD так же, как и соображения обеспечения широкого поля зрения МКА ДЗЗ в ущерб его разрешению, снижают информационные

возможности МКА ДЗЗ и ведут к существенным финансовым потерям его создания, а совершенное проектирование ОЭА, напротив, позволяет сэкономить денежные средства для создания не одного широкоформатного (короткофокусного) МКА ДЗЗ, а группировки из многих узкопольных (длиннофокусных) МКА ДЗЗ высокого разрешения, обеспечивающих суммарно и более широкое поле зрения.

5. Критерий GSD можно использовать только для оценки предельного геометрического разрешения МКА ДЗЗ на местности ($R_{GSD} = R_{dH/F}$), имея в виду, что реальное инструментальное линейное пространственное разрешение МКА ДЗЗ на местности, определяемое критерием РКС ($R_{PKC} = R_{2dH/F}$), в 2 раза хуже предельного геометрического разрешения и связано с ним простым соотношением $R_{PKC} = 2R_{GSD}$.

6. Для обеспечения возможности достижения дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ «Аист-2Д» на местности при его возможной модернизации необходимо согласовать по критерию Найквиста дифракционное разрешение объектива с пространственным разрешением (пикселем) цифрового детектора несовершенной ОЭА МКА ДЗЗ «Аист-2Д» путем увеличения фокусного расстояния ее объектива в $K=3,6$ раз от $F=2$ м до $F_c = F \cdot K = 7,2$ м (при неизменных D и d) [28, 29].

7. Результат п. 6. подтверждается и технологией совершенного проектирования ОЭА на базе критерия РКС [26, 27], которая позволяет согласовать вновь проектируемую ОЭА МКА ДЗЗ по критерию Найквиста ($\lambda F/D=2d$) с коэффициентом несовершенства (здесь – совершенства) проектируемой ОЭА, равным единице ($K=1$), и обеспечивает возможность достижения дифракционного линейного пространственного разрешения МКА ДЗЗ на местности ($R_{2dH/F} = R_{\lambda H/D}$).

Таким образом можно утверждать, что российский критерий РКС является примером эффективного импортозамещения в ДЗЗ зарубежного критерия GSD , а потому он должен быть включен в российский ГОСТ и применяться в России для оценки линейного пространственного разрешения и проектирования КА ДЗЗ.

Литература

1. Архипов С. А., Исследование требований к перспективной оптико-электронной аппаратуре для малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / С.А. Архипов // Информация и Космос. – 2018. – № 1. – С.155–162.
2. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения. Проектирование оптических систем / У. Уэзерелл; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – Москва: Мир, 1983. – 431 с.
3. 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.

4. Лавров, В. В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения / В.В. Лавров // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. – 2010. – № 2. – С. 19–24.
5. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику / Дж. Гудмен. – Москва : Мир, 1970. – 386 с.
6. Котельников, В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / В.А. Котельников // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Ground sample distance [Электронный ресурс] : Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_sample_distance (дата обращения: 02.08.2023).
11. ГОСТ 15114–78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. – Москва : Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
12. Хмелевской, С. И. Тенденции в развитии цифровых аэросъемочных систем. Критерии сравнения и оценки / С.И. Хмелевской // Геопрофи. – 2011. – № 1. – С. 11–16.
13. Характеристика качества изображения на сайте НТЦ Красногорский завод им. С.А. Зверева // Zenitcamera : сайт. – URL: <http://www.zenitcamera.com/qa/qa-resolution.html>, (дата обращения: 02.08.2023).
14. Опытнo-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов [и др.]. – Самара : Самарский НЦ РАН, 2017. – 324 с.
15. Свиридов, К. Н., Атмосферная оптика высокого углового разрешения / К.Н. Свиридов. – Москва : Знание, 2007. – Т. I. – 200 с. – Т. II. – 367 с. – Т. III. – 256 с.
16. Свиридов, К. Н. О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ 1, 2, 3) / К.Н. Свиридов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, Вып. 2. – С. 20–28.
- 16.* Замечания АО «РКЦ «Прогресс» к статье «О предельном инструментальном разрешении космического аппарата «Ресурс-П» (№ № 1, 2, 3)» автора К.Н. Свиридова (журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2017 г., Том 4, Выпуск 2, С. 20–28) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5, Вып. 1. – С. 48–51.
17. Спекл-интерферометр 6-м телескопа САО РАН на основе ЕМССД: характеристики и первые результаты / А.Ф. Максимов, Ю.Ю. Балега, В.В. Дьяченко [и др.] // Астрофизический бюллетень. – 2009. – Т. 64, № 3. – С. 308–321.
18. Кучейко, А. А. Перспективы развития зарубежных спутников ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения / А.А. Кучейко // Земля из космоса, спецвыпуск. – 2018. – С. 62–69.
19. Мейнел, А. Б. Обзор технических возможностей для создания телескопов будущего / А.Б. Мейнел // Оптические телескопы будущего : [пер. с англ.] / под ред. Ф. Пачини, В. Рихтера, Р. Вильсона. – Москва : Мир, 1981. – С. 20–34.
20. Science and Technology of directed energy weapons / N. Bloembergen [et al.] // Report of the American Physical Society. – 1987. – Ch. 5.
21. Johnson, H. L. Optimum size of infrared photometric telescopes / H.L. Johnson, W.L. Richards // The Astrophysical Journal. – 1970. – Vol. 160. – P. L111.
22. Abet, H. A. The cost-effectiveness in terms of publications and citations of various optical telescopes at the KPNO / H.A. Abet // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1980. – Vol. 92. – P. 249.
23. Тюлин, А. Е. Информационные и финансовые потери несовершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов // Информация и Космос. – 2020. – № 1. – С. 152–160.
24. Токовинин, А. А. Орбитальные оптические телескопы / А.А. Токовинин // Космонавтика и Астрономия. – 1986. – Т. 15, № 11. – С. 1–39.
25. Свиридов, К. Н. Новая оценка инструментального линейного разрешения на местности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для совершенного проектирования их оптико-электронной аппаратуры / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, С.А. Пулинец // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 59–67.
26. Патент № 2730886. Способ достижения дифракционного предела разрешения изображений дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов ; № 2019131343 : заявл. 04.10.2019 : опубл. 26.08.2020 / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин, Ю.М. Гектин ; патентообладатель АО «Российские космические системы». – 35 с.
27. 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.
28. Патент № 2669262. Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности ; № 2017144878 : заявл. 20.12.2017 : опубл. 09.10.2018 / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов ; правообладатель и заявитель АО «Российские космические системы». – 23 с.
29. Свиридов, К. Н. Новая технология оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на местности / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Информация и Космос. – 2019. – № 2. – С. 118–124.