Информационные и финансовые потери несовершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Informational and financial losses of imperfect design of electrooptical equipment and space vehicles for remote sensing of Earth surface

Тюлин / Tyulin A.
Андрей Евгеньевич
(tyulin@spacecorp.ru)
доктор экономических наук,
член-корреспондент РАРАН.
АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»
(АО "Российские космические системы"),
генеральный директор.
г. Москва

Свиридов / Sviridov K.
Константин Николаевич
(sviridovkn@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный изобретатель РФ.
АО "Российские космические системы",
главный научный сотрудник.
г. Москва

Ключевые слова: критерий Найквиста – Nyquist criterion; критерии оценки разрешения – resolution assessment criteria; проектирование ОЭА – electrooptical equipment design; коэффициент совершенства – perfection coefficient; критерий GSD и несовершенное проектирование – GSD criterion and imperfect design; информационные потери – informational losses; финансовые потери – financial losses; критерий РКС и совершенное проектирование – RKS criterion and perfect design.

Анализируется использование критериев оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности для проектирования ОЭА КА ДЗЗ. Показано, что зарубежный критерий GSD оценки геометрического разрешения препятствует совершенному проектированию ОЭА, согласованной по критерию Найквиста с коэффициентом совершенства ОЭА K=1. Несовершенство проектирования ОЭА (K>2) всех существующих КА ДЗЗ ведет к информационным и финансовым потерям. Получено, что относительные информационные потери несовершенного проектирования составляют K раз, а относительные финансовые потери несовершенного проектирования составляют K^{β} раз, где β – степень масштабного закона стоимости, (2≤β≤3). Предложено во избежание этих потерь использовать для совершенного проектирования ОЭА отечественный критерий РКС оценки инструментального линейного разрешения.

Application of ultimate instrumental resolution assessment criteria for space vehicles for remote sensing of earth in the field for design of electrooptical equipment for space vehicles for remote sensing of earth is analyzed. It is demonstrated that foreign criterion of geometric resolution assessment GSD prevents from perfect design of electrooptical equipment, as per Nyquist criterion with perfection coefficient for electrooptical equipment of K=1. Electrooptical equipment design imperfection (K>2) for all existing space vehicles for remote sensing of earth results in informational and financial losses. It was observed that relative informational losses due to imperfect design are equal to K times, while relative financial losses due to imperfect design are equal to K^{β} times, where β – value scaling law degree, (2≤β≤3). To prevent from these losses it is proposed to use our own criterion of instrumental linear resolution assessment RKS for perfect design of electrooptical equipment.

Введение

Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) телескопа КА ДЗЗ (Рис. 1) включает: оптический объектив (линзовый – рефрактор или зеркальный – рефлектор) с диаметром апертуры D {м} и фокусным расстоянием F {м}, а также цифровой детектор с пространственным элементом дискретизации (пикселем) d {мкм}. Совершенное проектирование ОЭА подразумевает определение величин D, F и d, обеспечивающих согласование объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста для обеспечения возможности достижения дифракционного предела инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности [1]. Информационный критерий Найквиста [2] устанавливает условие согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по пространственному разрешению и требует, чтобы на дифракционный элемент разре-

1 2020.indd 152 26.02.2020 15:10:55

шения объектива в фокальной плоскости (диск Эри) $R_{\lambda F/D} = \lambda F / D$ приходились, как минимум, два элемента разрешения цифрового детектора $2d$. При этом вводится понятие частоты Найквиста детектора $f_N = f_{1/d}/2$, равной половине частоты дискретизации детектора $f_{1/d} = 1/d$, и утверждается, что при дискретизации аналогового сигнала (здесь – изображения) полезную неискаженную информацию несут только пространственные частоты f, которые ниже частоты Найквиста ($f < f_N$). Поэтому в согласованной по Найквисту (совершенной) ОЭА частота Найквиста детектора f_N должна совпадать с частотой отсечки объектива $f_{D/\lambda F} = D/\lambda F$, то есть

$$f_N = 1/2d = D/\lambda \mathrm{F} = f_{\mathrm{D}/\lambda \mathrm{F}} \quad (1)$$

или, что то же

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

а это и есть согласование по критерию Найквиста [2].

Оценки предела инструментального разрешения

Предельная величина инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности зависит от степени согласования объектива и цифрового детектора по критерию Найквиста и может изменяться от некоторого реального значения предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности до величины дифракционного предела линейного разрешения. От выбора критерия оценки предельного инструментального разрешения зависит как правильность определения реального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности, так и возможность согласования ОЭА по критерию Найквиста в процессе ее проектирования. Для оценки реального предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности существуют два критерия: известный зарубежный критерий оценки инструментального геометрического разрешения GSD [3], определяемый, как

$$R_{GSD} = R_{dH/F} = dH / F \ \{\text{м}\} \ , \quad (3)$$

и новый отечественный критерий оценки инструментального линейного разрешения–РКС [4], определяемый, как

$$R_{PKC} = R_{2dH/F} = 2dH / F \ \{\text{м}\} \ , \quad (4)$$

и связанный с критерием GSD соотношением

$$R_{PKC} = 2R_{GSD} \quad \{\text{м}\} \quad (5)$$

Наряду с этими критериями оценки реального инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности существует дифракционный предел инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности R_D, определяемый как

$$R_D = R_{\lambda H/\mathrm{D}} = \lambda H / D \ \{\text{м}\} \quad (6)$$

Здесь H – высота КА ДЗЗ над зондируемой земной поверхностью, а λ – средняя длина волны солнечного излучения подсвета земной поверхности.

Совершенное проектирования ОЭА КА ДЗЗ

Для оценки степени согласования объектива и цифрового детектора проектируемой ОЭА по

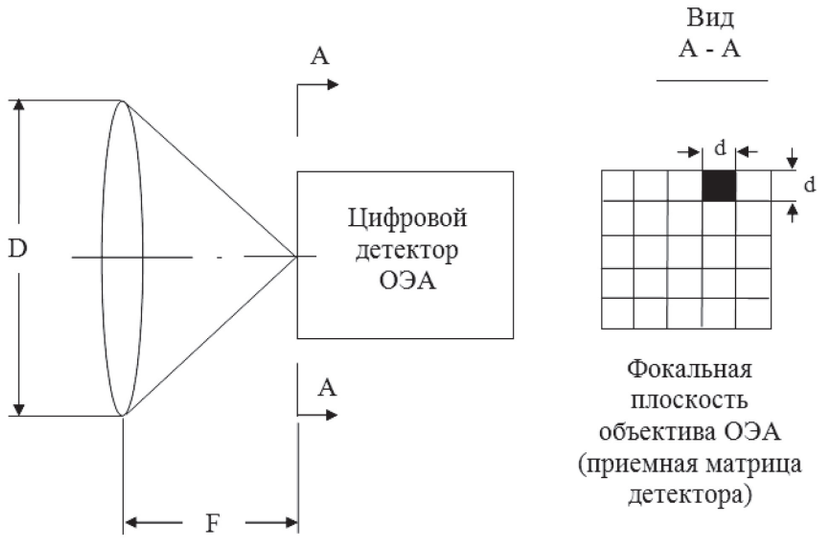

Рис. 1. Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)

1 2020.indd 153 26.02.2020 15:10:55

критерию Найквиста нами введено [5] понятие коэффициента совершенства ОЭА-К, 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 разрешения КА ДЗЗ на местности–РКС $R_{PKC}=R_{2dH/F}$ к дифракционному пределу линейного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_D=R_{\lambda H/D}$

$$K=(D/\lambda F)/(1/2\mathrm{d})=(2dH/F)/(\lambda H/D)=2dD/\lambda F\ \{\text{раз}\},\quad (7)$$

где $K \geq 1$.

В согласованной по критерию Найквиста (совершенной) ОЭА коэффициент совершенства ОЭА равен единице (K=1), так как при этом выполняется условие согласования (2), и

$$R_{PKC}=R_D\quad \{\text{м}\},\quad (8)$$

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

Рассмотрим коэффициент качества спроектированной ОЭА, обозначаемый K_0, введенный в [5] и определяемый отношением оценки инструментального геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности GSD $R_{GSD}=R_{dH/F}$ к дифракционному пределу инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности $R_D=R_{\lambda H/D}$

$$K_0=(dH/F)/(\lambda H/D)=dD/\lambda F\quad \{\text{раз}\},\quad (9)$$

где $K_0 \geq 1$.

Ситуация, когда K_0=1, представляет границу применимости критерия GSD для оценки инструментального геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности, когда $R_{GSD}=R_D$ и $\lambda F/D=d$, так как ситуация, когда оценка разрешения R_{GSD} становится меньше дифракционного предела разрешения R_D, то есть, когда K_0<1, противоречит физическому смыслу.

Из сравнения (7) и (9) следует, что

$$K=2K_0\quad \{\text{раз}\}.\quad (10)$$

и ограничение, устанавливаемое критерием GSD на величину K_0, а именно, $K_0 \geq 1$, накладывает ограничение на коэффициент совершенства K (7)

$$K \geq 2\quad \{\text{раз}\}.\quad (11)$$

Полученное ограничение (11) на коэффициент совершенства проектируемой ОЭА, обусловленное использованием зарубежного критерия *GSD*, объясняет значения коэффициентов совершенства спроектированной ОЭА, большие двух (K>2), для всех зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения [6], представленных в таблице 1 и спроектированных с использованием критерия *GSD* [7].

На основании этого очевидно, что, используя критерий *GSD* для оценки предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности, нельзя при проектировании ОЭА КА ДЗЗ достичь коэффициента совершенства ОЭА, равного единице (K=1), то есть нельзя согласовать объектив и цифровой детектор по критерию Найквиста (2) и обеспечить возможность достижения дифракционного предела инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности (6). Рассмотрим к каким негативным последствиям ведет несовершенное проектирование ОЭА КА ДЗЗ на базе критерия *GSD*.

Информационные потери предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности

Известно, что наиболее информативным и востребованным потребителями продуктом ДЗЗ является оптическое изображение зондируемого участка земной поверхности. Проведенные исследования [2] свидетельствуют о том, что наиболее универсальным критерием, характеризующим как информативность изображения объекта, так и эффективность системы его наблюдения, является разрешающая способность. Предельная величина инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности зависит от степени согласования ОЭА по критерию Найквиста.

Ранее [1] мы рассмотрели два возможных пути согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста: это уменьшение размера элемента дискретизации (пикселя) цифрового детектора ОЭА в M^X раз от d до $d_C=d/M^X$, или пропорционального увеличения в M^X раз фокусного расстояния объектива ОЭА от F до $F_C=F\cdot M^X$, где $M^X=K$, а d_C и F_C, соответственно, согласующий размер элемента дискретизации цифрового детектора ОЭА и согласующее фокусное расстояние объектива ОЭА. При этом отмечалось, что уменьшение d до d_C возможно как заменой цифрового детектора, так и переходом в режим счета фотонов в изображении (СФИ), а увеличение F до F_C возможно введением между объективом и цифровым детектором ОЭА фотоувеличительной оптики в виде стандартных микро объективов или линз Барлоу. Фотоувеличительная оптика и фотоотсчетное детектирование давно и успешно используются в астрономии и астрофизике [8].

Возможен и третий путь согласования объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста – это уменьшение приемной апертуры объектива диаметра D в M^X раз заменой объектива или его диафрагмированием от диаметра D до диаметра $D_Э=D/M^X$. Этот путь является неприемлемым для КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения, так как он ухудшает потенциально достижимое дифракционное разрешение КА ДЗЗ на местности в $M^X=K$ раз от $R_D=\lambda H/D$ до $R_{D_Э}=\lambda H/D_Э$. Однако такое «диафрагмирование» приемной апертуры объектива диаметра D эквивалентной (эффективной) апертурой диаметра $D_Э=D/K$ происходит автоматически

1 2020.indd 154 26.02.2020 15:10:56

Таблица 1

K–Коэффициент совершенства ОЭА, спроектированной на базе критерия *GSD*, и информационные потери разрешения КА ДЗЗ

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Параметр (λ = 0,55 мкм)			
		Диаметр объектива D [м]	Фокус объектива F [м]	Пиксель детектора d [мкм]	Коэффициент совершенства $K = 2dD/\lambda F$ [раз]
1	IKONOS-2	0,7	10	12	3,0
2	QuikBird-2	0,6	8,8	12	2,95
3	OrbView-3	0,45	3,0	6	3,29
4	EROS-B	0,5	5,0	7	2,56
5	Cartosat-2	0,7	5,6	7	3,2
6	WorldView-1	0,6	8,8	8	2,32
7	GeoEye-1	1,1	13,3	8	2,4
8	WorldView-2	1,1	13,3	8	2,4
9	Pleiades-1	0,65	12,9	13	2,39
10	WorldView-3	1,1	13,3	6,7	2,01

на физическом уровне из-за рассогласования ОЭА по критерию Найквиста, то есть несовершенства ее проектирования ($K \neq 1$). При этом относительные потери предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности можно оценить как отношение эффективного инструментального разрешения $R_{D_э}$ к дифракционному пределу инструментального разрешения R_D

$$R_{D_э}/R_D = K\{\text{раз}\} \qquad (12)$$

Отсюда видно, что относительные информационные потери предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности определяются коэффициентом совершенства, а скорее несовершенства, спроектированной ОЭА К (7). Чем больше величина K отличается от K=1 в

1 2020.indd 155 26.02.2020 15:10:56

совершенной ОЭА, тем больше информационные потери (12). Эти потери для зарубежных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения, созданных на базе критерия *GSD*, представлены в последнем столбце Таблицы 1.

Помимо отмеченных информационных потерь из-за несовершенного проектирования ОЭА КА ДЗЗ, имеют место и финансовые потери, обусловленные неоправданными затратами на создание объектива ОЭА телескопа большого диаметра D при реально определяющем инструментальное разрешение КА ДЗЗ на местности эффективном диаметре $D_э$, меньшем D в K раз. Оценим эти финансовые потери.

Масштабные законы стоимости

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 [9] (масштабный закон) зависимости стоимости создания C от диаметра апертуры D и позволяет по ней оценить как перспективу капиталовложений, необходимых для создания традиционных оптических систем требуемого диаметра, так и финансовые потери от его 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 [10], чтобы избежать финансовых потерь из-за несовершенного проектирования. Рассмотрение масштабных законов стоимости проведем для наземных оптических систем высокого разрешения, обладающих достаточной статистикой стоимости их создания для построения функциональной зависимости $C=f(D)$, а полученные на ее основе результаты перенесем на оптические системы космического базирования.

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

$$C=\alpha D^{\beta} \quad \{\$\ USA\} \qquad (13)$$

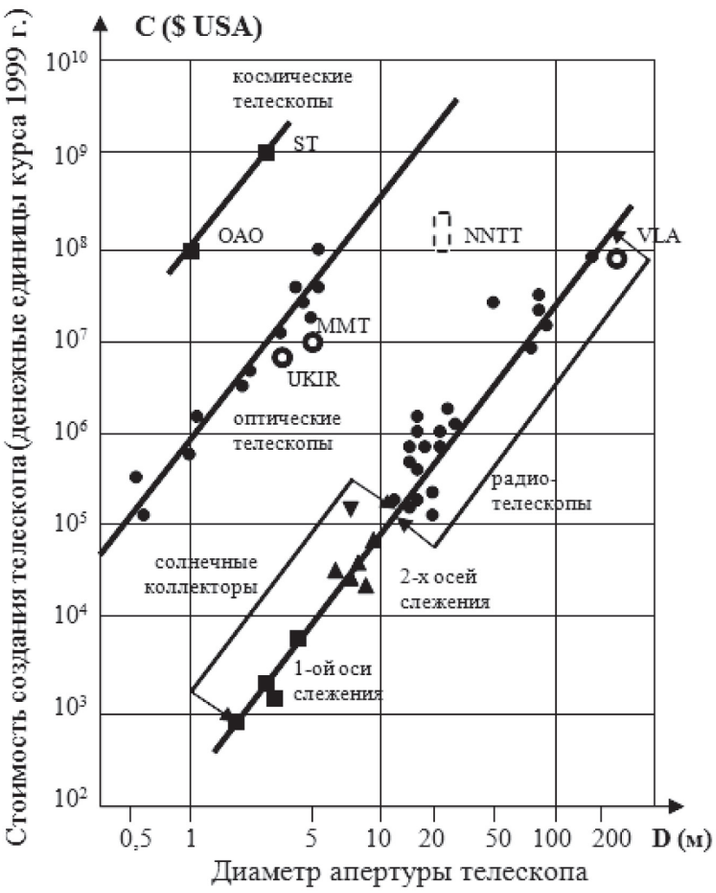

Рис. 2. Масштабные законы (линии тенденций) стоимости создания традиционных телескопов в зависимости от диаметра их приемной апертуры

1 2020.indd 156 26.02.2020 15:10:56

Обобщением стоимости большого числа традиционных астрономических телескопов было получено [9] наиболее распространенное эмпирическое выражение для масштабного закона стоимости (13) в виде

$$C=0{,}42\cdot D^{2{,}63} \quad \{\$\ USA\}, \qquad (14)$$

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. 2. Здесь же показаны аналогичные зависимости для стоимости создания космических теле-

Таблица 2. Относительные финансовые потери – K^{β} создания телескопа КА ДЗЗ при несовершенном проектировании ($K\neq1$) ОЭА на базе критерия GSD.

№ п/п	Наименование КА ДЗЗ	Параметры (λ=0,55мкм)				
		Диаметр объектива D [м]	Несовершенство проектирования –K [раз]	Эффектив. диаметр $D_Э$ [м]	Отн. финансовые потери – K^{β} [раз] при β=2	и β=3
1	IKONOS-2	0,7	3,0	0,23	9	27
2	QuikBird-2	0,6	2,95	0,20	8,7	25,7
3	OrbView-3	0,45	3,29	0,14	10,8	35,6
4	EROS-B	0,5	2,56	0,195	6,6	16,8
5	Cartosat-2	0,7	3,2	0,22	10,2	32,8
6	WorldView-1	0,6	2,32	0,26	5,4	12,5
7	GeoEye-1	1,1	2,4	0,46	5,8	13,8
8	WorldView-2	1,1	2,4	0,46	5,8	13,8
9	Pleiades-1	0,65	2,39	0,27	5,7	13,7
10	WorldView-3	1,1	2,01	0,55	4,0	8,1

1 2020.indd 157 26.02.2020 15:10:57

скопов 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 (13). Так для телескопов традиционного построения в работе [10] предполагается β=3, в работе [11] указывается на величину β=2,8, в работе [12] говорится о величине β=2,37, а в ряде работ [13, 14] говорится о возможности уменьшения величины β до β=2 при нетрадиционном построении оптического телескопа. Таким образом, в зависимости от технологичности конструкции телескопа показатель степени масштабного закона стоимости изменяется в диапазоне

$$2 \le \beta \le 3 . \qquad (15)$$

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 финансовые потери от несовершенного проектирования ОЭА КА ДЗЗ. Оценим эти финансовые потери на базе масштабного закона стоимости (13).

Финансовые потери создания КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения

На создание КА ДЗЗ с оптическим телескопом диаметра D {м} затрачены денежные средства $C_D=\alpha D^{\beta}$ {$ USA}. Однако по факту, вследствие несовершенного проектирования ОЭА ($K\neq1$), получаем телескоп с эффективным диаметром $D_э=D/K$, стоимость создания которого определяется, как $C_{Dэ} = \alpha D_э^{\beta}$.

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

$$C_D / C_{Dэ}=K^{\beta} \quad \text{\{раз\}}. \qquad (16)$$

Отсюда видно, что в согласованной по Найквисту (совершенной) ОЭА при K=1 относительные финансовые потери равны единице (K^{β}=1), что свидетельствует об их отсутствии.

Оценим относительные финансовые потери создания зарубежных КА ДЗЗ, представленных таблице 1, из-за несовершенного проектирования их ОЭА. Результаты этих оценок, полученных на основании проведенных выше исследований, представлены в таблице 2.

На основании данных таблицы 1 и таблицы 2 видно, что несовершенство проектирования ОЭА КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения ($K\neq1$) ведет к существенным информационным и финансовым потерям создания КА ДЗЗ. При этом относительные информационные потери предельного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности определяются величиной коэффициента совершенства ОЭА K {раз}, а относительные финансовые потери создания КА ДЗЗ оказываются равными K^{β} {раз}. Очевидно, что относительные финансовые потери создания КА ДЗЗ из-за несовершенного проектирования ОЭА оказываются большими относительных информационных потерь предельного инструментального разрешения. Все это свидетельствует о необходимости совершенного проектирования ОЭА на базе отечественного критерия РКС и недопустимости использования зарубежного критерия GSD при проектировании ОЭА КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения. Использование при проектировании ОЭА критерия РКС позволит согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста (2) с коэффициентом совершенства ОЭА, равным единице (K=1), что позволит обеспечить возможность достижения дифракционного предела линейного разрешения КА ДЗЗ на местности (8) при условии компенсации атмосферных искажений [15, 16, 17] (рис. 3) и избежать рассмотренных выше информационных и финансовых потерь.

Здесь важно отметить, что космический телескоп (ST) им. Хаббла [19], 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.

По-видимому, его разработчики при проектировании ОЭА строго придерживались критерия Найквиста.

Заключение

Итак, в результате проведенных исследований и на основании результатов, представленных в цитируемой литературе авторов, можно сделать следующие выводы.

1. Известный зарубежный критерий оценки предельного инструментального геометрического разрешения КА ДЗЗ на местности – критерий GSD является некорректным для оценки линейного разрешения КА ДЗЗ на местности, определенного для оценки пространственного разрешения российским ГОСТ [18], а главное, его использование при проектировании ОЭА препятствует согласованию объектива и цифрового детектора ОЭА по критерию Найквиста, устанавливая ограничение на коэффициент совершенства проектируемой ОЭА K предельной величиной, равной двум ($K\geq2$), что делает

1 2020.indd 158 26.02.2020 15:10:57

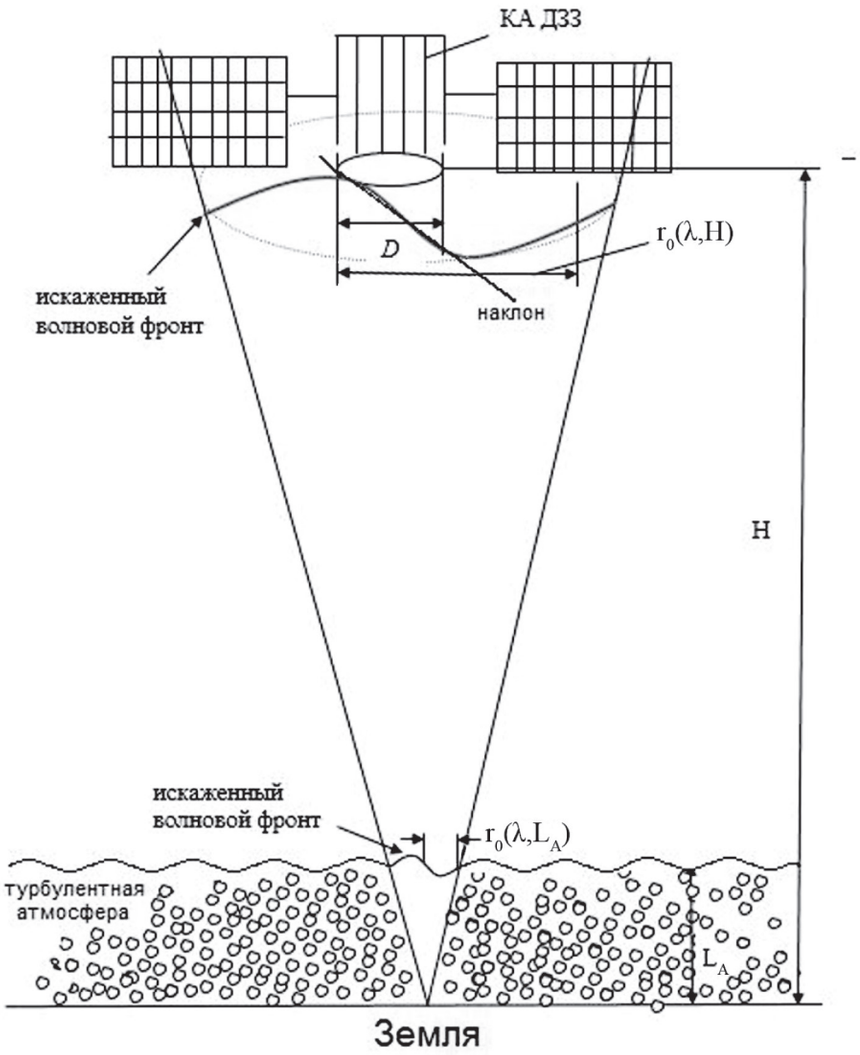

Рис. 3. Геометрия дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

невозможным достижение дифракционного предела инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности. Сегодня все КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения, спроектированные на базе критерия *GSD*, имеют коэффициент совершенства ОЭА, больший двух ($K>2$), что свидетельствует об их несовершенстве.

2. Отсутствие согласования ОЭА по критерию Найквиста ограничивает предельное инструментальное линейное разрешение КА ДЗЗ на местности величиной $R_{Dэ}=\lambda H/D_э$, где $D_э$ – эффективный диаметр апертуры объектива диаметра D, $D_э=D/K$.

3. Физическое диафрагмирование апертуры объектива диаметра D эффективной апертурой диаметра $D_э$ ухудшает предельное инструментальное линейное разрешение КА ДЗЗ на местности в K раз, приводя к информационным потерям дистанционного зондирования. При этом уменьшение диаметра апертуры объектива ОЭА в K раз приводит к финансовым потерям создания ОЭА КА ДЗЗ в K^β раз, где $2 \le \beta \le 3$. Это свидетельствует о том, что необоснованное использование при проектировании ОЭА критерия *GSD* снижает информационные возможности КА ДЗЗ и ведет к существенным финансовым потерям их создания. Очевидно, что нецелесообразно вкладывать денежные средства в создание КА ДЗЗ с объективом диаметра D, если инструментальное разрешение обеспечивает эффективный диаметр $D_э$, меньший D.

4. При проектировании ОЭА КА ДЗЗ целесообразно использовать отечественный критерий РКС оценки предельного инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности, который свободен от недостатков и ограничений критерия *GSD*. Его использование позволит согласовать проектируемую ОЭА по критерию Найквиста (2) с коэффициентом совершен-

1 2020.indd 159 26.02.2020 15:10:57

ства проектируемой ОЭА, равным единице (K=1), и обеспечит возможность достижения дифракционного предела инструментального линейного разрешения КА ДЗЗ на местности (8).

Литература

1. Пат. № 2669262 Российской Федерации, МПК G03B37/00. Способ оценки и максимизации предельного инструментального разрешения космического аппарата дистанционного зондирования Земли на местности / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов; правообладатель и заявитель АО «Российские космические системы»; № 2017144878; заявл. 20.12.2017; опубл. 09.10.2018, Бюл. № 28. – 14 с.

2. Уэзерелл, У. Оценка качества изображения. Проектирование оптических систем / У. Уэзерелл; под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – М.: Мир, 1983. – С. 178–332.

3. Ground Sampling Distance (GSD) – Support [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.yandex.ru/support.pix4d.com/he/en-us/articles/202559809, свободный. – Загл. с экрана.

4. 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.

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

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

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

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

9. Мейнел, А. Б. Оптические телескопы будущего : [пер. с англ.] / А.Б. Мейнел ; под ред. Ф. Пачини, В. Рихтера, Р. Вильсона. – М.: Мир, 1981. – 432 с.

10. Science and Technology of directed energy weapons / N. Bloembergen [et al.] // Report of the American Physical Society. – 1987. – Ch. 5.

11. Johnson, H. L. Optimum size of infrared photometric telescopes / H.L. Johnson, W.L. Richards // The Astrophysical Journal. – 1970. – Vol. 160. – P. L111.

12. 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.

13. Disney, M. J. Incoherent arrays / M.J. Disney // Conference on Optical Telescopes of the Future. – 1978. – P. 145–161.

14. Meinel, A. B. Cost-scaling laws applicable to very large optical telescopes / A.B. Meinel // Optical Engineering. – 1979. – Vol. 18, No. 6. – P. 645.

15. Свиридов, К.Н. Дистанционное зондирование Земли с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта / К.Н. Свиридов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. –Т. 2, № 3. – С. 12–22.

16. Свиридов, К. Н. Адаптивная фильтрация изображений, искаженных турбулентной атмосферой / К.Н. Свиридов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 40–49.

17. Свиридов, К. Н. Технологии преддетекторной и последетекторной адаптивной коррекции атмосферных искажений в системах ДЗЗ / К.Н. Свиридов // Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции. – 2016. – С. 500–521.

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

19. Токовинин, А. А. Орбитальные оптические телескопы / А.А. Токовинин // Космонавтика и Астрономия. – 1986. – Т. 15, № 11. – С. 1–39.

1 2020.indd 160 26.02.2020 15:10:57