

5. Куренков, В.И. Основы проектирования ракет-носителей. Выбор основных характеристик и формирование конструктивного облика / В.И. Куренков. – Самара: СГАУ, 2015. – 448 с.

6. Пересыпкин, К.В. Компьютерный инженерный анализ / К.В. Пересыпкин, В.П. Пересыпкин, Е.А. Иванова. – Самара: СГАУ, 2012. – 94 с.

7. Дрейпер, Н.Р. Прикладной регрессионный анализ / Н.Р. Дрейпер, Г. Смит. – Москва: Диалектика, 2016. – 912 с.

8. Сургутанова, Ю.Н. Расчёты брусев на прочность и устойчивость / Ю.Н. Сургутанова [и др.]. – Самара: Самарский университет, 2017. – 112 с.

629.78(075)

*Куренков В.И.*

## **КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАЯВЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ**

Одним из важных вопросов, возникающих в процессе проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли, является вопрос об обеспечении заданных показателей детальности (проекция пикселя – GSD, линейного разрешения на местности – ЛРМ и др.). Существуют методики оценки детальности наблюдения [1–5 и др.], однако результаты расчёта для российских и зарубежных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) несколько отличаются, так как в них используются различные методические подходы и исходные данные.

**Цель настоящей статьи** – сравнить расчётные и заявленные показатели детальности отечественных и зарубежных космических

аппаратов дистанционного зондирования Земли и провести анализ влияния исходных данных на оцениваемые параметры.

Достижение поставленной цели может помочь проектантам с точки зрения критической оценки заявленные характеристик зарубежных средств оптико-электронного наблюдения поверхности Земли по критериям детальности.

### **Пиксельное и линейное и разрешения**

Прежде всего, отметим различие в подходах к оценке пространственного разрешения в России и зарубежных странах.

Под линейным разрешением на местности (ЛРМ) при космической съёмке в России понимается минимально разрешаемая ширина полос штриховых мир, снимаемых космическим аппаратом в зачётных условиях, как правило, не достаточно благоприятных. Зачётные условия задаются заказчиком.

Под разрешением на местности при космической съёмке за рубежом, как правило, понимается проекция пикселя на поверхность Земли (*GSD*). Этот показатель недостижим при зачётных, не достаточно благоприятных условиях, и характеризует потенциальные возможности системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При правильном сочетании характеристик оптической системы, фотоприёмных устройств, обеспечивающих бортовых систем КА, и при благоприятных условиях съёмки можно получить значение ЛРМ, близкое к *GSD*.

Пиксельное линейное разрешение по критерию предельного разрешения определяется формулой [2 – 6]

$$L_{\text{Л}} = (l_{\text{эл}} H) / f, \quad (1)$$

где  $l_{\text{эл}}$  – линейный размер фотоприёмного элемента;

$H$  – высота полёта космического аппарата;

$f$  – фокусное расстояние оптической системы.

В работах [3 – 5] показано, что значения пиксельного разрешения ( $L_{\Pi}$ ) меньше значений ЛРМ ( $L_{\text{ЛРМ}}$ ) в 1,3...1,5 раза (а в отдельных случаях – до двух раз). Например, пиксельное разрешение на местности КА «Ресурс-П» при съёмке с высоты 475 км в надир составляет  $L_{\Pi} = 0,71$  м, а ЛРМ в зачётных условиях (высота Солнца над горизонтом  $h_{\odot} = 30^{\circ}$ , коэффициенты контрастности шпал мира  $k_i = 0,3$ , отражения шпал и фона группы мир  $\rho_{\min} = 0,07$ , прозрачности атмосферы  $\tau_{\text{атм}} = 0,7$  для метеорологической дальности 23 км) составляет  $L_{\text{ЛРМ}} = 1$  м. В благоприятных условиях и при высоте Солнца над горизонтом  $h_{\odot} > 40^{\circ}$  ЛРМ приближается к пиксельному.

Отметим, что пиксельное разрешение на местности ( $L_{\Pi}$ ) применяется, видимо, для повышения привлекательности и продвижения информации ДЗЗ на Мировом рынке, поскольку оно численно даёт лучшие показатели по сравнению с ЛРМ.

### **Факторы, влияющие на линейное разрешение на местности**

На линейное разрешение на местности кроме внешних условий (высоты Солнца над горизонтом, прозрачности атмосферы и др.) влияет много внутренних факторов космического аппарата, основными из которых являются: тип оптической системы, наличие или отсутствие экранирования её элементов, качество изготовления оптических систем, заданный спектральный диапазон, предельная пространственная частота, пропускаемая оптической системой, рабочая нормированная частота, на которую приходится основной объём снимаемых кадров и др. Инструментом, для оценки влияния внутренних факторов КА на качество изображения оценивается с помощью частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) оптической аппаратуры [1, 4].

## **Влияние частотно-контрастных характеристик оптической аппаратуры на линейное разрешение на местности**

С увеличением диаметра апертуры оптической системы улучшаются показатели разрешения в изображении миры, что проявляется в увеличении предельной пространственной частоты, пропускаемой объективом. Однако на предельной частоте контраст изображения равен пороговому контрасту и никакого изображения не создаётся. С другой стороны, на нулевой частоте контраст изображения равен единице, однако изображение не будет детальным. В обоих случаях изображение будет однородным по освещённости (насыщенности серого).

На практике ориентируются на средние (рабочие) частоты, которые принято выражать через нормированную пространственную частоту  $k_0$ , представляющую собой отношение рабочей частоты к предельной. По сути, нормированная пространственная частота  $k_0$  учитывает снижение качества снимков реальной оптики по сравнению с идеальной и зависит от типа оптической системы. Для линзовых систем, как правило, принимают значение  $k_0 = 0,5$  [1, 4, 5], а для зеркальных систем с центральным экранированием значение  $k_0$  принимают в зависимости от коэффициента экранирования

$$q = D_{\text{вз}} / D_{\text{гз}} ,$$

где  $D_{\text{гз}}$  и  $D_{\text{вз}}$  – диаметры главного и вторичного зеркал соответственно.

Для коэффициента экранирования  $q = 0,3 \dots 0,4$  принимают значение  $k_0 = 0,3 \pm 0,3$  [1]. Основной эффект центрального экранирования объясняется увеличением кружка (диска) Эри и переходом энергии из него в систему колец, что приводит к снижению ЧКХ на малых и средних пространственных частотах и к небольшому увеличению ЧКХ на высоких частотах [1, 4, 5].

Формула для расчёта линейного разрешения на местности при съёмке в надир имеет вид [1]

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2 k_0 D_{\text{ГЗ}}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_p$  – рабочая длина волны (средняя из анализируемого диапазона).

Формула (2), конечно, не учитывает всех процессов, которые сопровождают получение изображения Земли из космоса, но при стандартных зачётных условиях даёт очень хорошее приближение к истинному результату.

Отметим, если принять значение нормированной пространственной частоты  $k_0 = 1$ , то из выражения (2) приходим к понятию дифракционного линейного разрешения на местности, которое является абстрактной характеристикой для идеальных (безабберационных) оптических систем и не может быть достигнуто при существующих технологиях их производства [1, 4, 5]

$$L_{\text{Д}} = \frac{\lambda_p H}{2 D_{\text{ГЗ}}}. \quad (3)$$

Сравнив это выражение с формулой (2) при значении  $k_0 = 1$ , приходим к выводу, что для линзовых систем линейное разрешение на местности в два раза хуже дифракционного.

**Пример.** 1. Рассчитаем по формуле (2) линейное разрешение на местности КА ДЗЗ в идеальных условиях съёмки при следующих параметрах линзовой оптической системы: диаметр объектива  $D = 0,5$  м, фокусное расстояние  $f = 4$  м, длина рабочей волны  $\lambda_p = 0,60 \cdot 10^{-6}$  м (т.е. с параметрами объектива, как у космического аппарата «Ресурс-П» (РФ) [6], и длиной волны, соответствующей

правой границе панхроматического диапазона). Нормированная рабочая пространственная частота линзовой оптики равна  $k_0 = 0,5$ .

Подставляя исходные данные в формулу (2), получаем предельно возможное линейное разрешение на местности, которое практически соответствует пиксельному разрешению

$$L_{\text{ЛРМ}} = L_{\text{П}} \frac{\lambda_p H}{2 k_0 D} = \frac{0,60 \cdot 10^{-6} 475 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,57 \text{ м}.$$

В зачётных условиях ЛРМ составит

$$L_{\text{ЛРМ}} = k_{\text{э}} L_{\text{П}} = 1,5 \cdot 0,57 = 0,855 \text{ м}.$$

Отметим, что если длину волны принять равной правой границе панхроматического спектра, то есть,  $\lambda = 0,76 \cdot 10^{-6}$  м, то предельное линейное разрешение на местности (при идеальных условиях применения) составит 0,75 м, а в зачётных – 0,94...1,08 м в зависимости от зачётных условий съёмки.

Для сравнения рассчитаем дифракционное разрешение КА ДЗЗ ( $k_0 = 1$ ) при тех же параметрах оптической системы и при длине рабочей волны  $\lambda_p = 0,60 \cdot 10^{-6}$  м. Оно составит 0,285 м, что недостижимо на практике из-за наличия аберраций.

Результаты данного примера показывают, что заявленные и расчётные значения линейного разрешения на местности для российского КА ДЗЗ типа «Ресурс-П» практически совпадают, что свидетельствует об адекватности используемой методики для расчёта ЛРМ.

Перейдём к анализу заявленных значений некоторых зарубежных КА ДЗЗ.

**Пример 2.** Рассчитаем предельное линейное разрешение и его вариации космического аппарата ДЗЗ типа «Pleiades» (Франция)

при следующих исходных данных: диаметр главного зеркала  $D_{ГЗ} = 0,65$  м, фокусное расстояние  $f = 12,9$  м, размер пикселя 13 мкм, длина волны  $\lambda = 0,65 \cdot 10^{-6}$  м (средняя для диапазона 0,48-0,83 мкм), высота полёта КА  $H = 689 \times 706$  км (примем в расчёте 700 км) [7].

Подставляя исходные данные в формулу (2) при нормированной пространственной частоте  $k_0 = 0,30 \pm 0,03$ , получаем

$$L_{-} = \frac{\lambda H}{2kD} = \frac{0,65 \cdot 10^3 \cdot 700 \cdot 10^3}{2(0,30 + 0,03)0,65} = 1,06 \text{ м.}$$

Заявленное линейное разрешение КА «Pleiades» составляет 0,70 м, что соответствует проекции пикселя на поверхность Земли (GSD) [7].

Если принять нормированную рабочую частоту равной  $k_0 = 0,5$ , то можно получить значение линейного разрешения на местности

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2k_0 D} = \frac{0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,65} = 0,70 \text{ м.}$$

Если рабочую длину волны принять минимальной, то есть,  $\lambda_p = 0,48 \cdot 10^{-6}$  м, то линейное разрешение на местности составит

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2k_0 D} = \frac{0,48 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 10^3}{2 \cdot (0,3 + 0,03) \cdot 0,65} = 0,78 \text{ м.}$$

На последних экземплярах КА «Pleiades» заявленное ЛРМ составляет 0,5 м, но это после дополнительной съёмки объекта наблюдения со сдвигом на полпикселя в изображении и обработки изображения на борту КА (рис. 1).

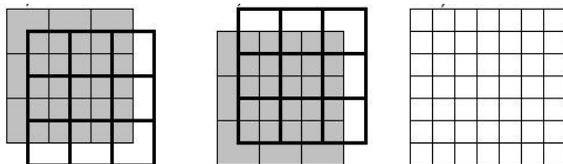


Рис. 1. Схемы повышения разрешения снимка [5]

Из примера 2 видно, что заявленные показатели линейного разрешения на местности КА ДЗЗ типа «Pleiades» завышены по сравнению с расчётными.

**Пример 3.** Рассчитаем линейное разрешение на местности и его возможные вариации при следующих исходных данных: диаметр оптической системы:  $D_{ГЗ} = 1,10$  м, фокусное расстояние  $f = 16,0$  м, длина волны  $\lambda_p = 0,62 \cdot 10^{-6}$  м (средняя для диапазона 0,45-0,8 мкм), высота полёта КА  $H = 603 \times 620,4$  км (примем в расчёте 612 км), что соответствует параметрам КА ДЗЗ типа «WorldView – 4» (США) [8].

Подставляя исходные данные в формулу (2) при нормированной пространственной частоте  $k_0 = 0,30 \pm 0,03$ , получаем значение ЛРМ

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2k_0 D} = \frac{0,62 \cdot 10^{-6} 612 \cdot 10^3}{2(0,30 + 0,03) 1,10} = 0,584 \text{ м.}$$

Заявленное линейное разрешение на местности КА ДЗЗ «WorldView-4» составляет 0,31-0,34 м (проекция пикселя (GSD) составляет 0,5 м) [8].

Если принять нормированную рабочую частоту  $k_0 = 0,5$  (как у линзовых оптических систем), то можно получить

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2k_0 D} = \frac{0,62 \cdot 10^{-6} 612 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,5 \cdot 1,10} = 0,34 \text{ м.}$$

Если рабочую длину волны приравнять к минимальной, то есть  $\lambda_p = 0,45 \cdot 10^{-6}$  м, то приходим к следующему результату:

$$L_{\text{ЛРМ}} = \frac{\lambda_p H}{2k_0 D} = \frac{0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 612 \cdot 10^3}{2 \cdot (0,3 + 0,03) \cdot 1,10} = 0,38 \text{ м}.$$

Из примера 3 видно, что заявленные показатели линейного разрешения на местности КА ДЗЗ типа «WorldView-4» завышены по сравнению с расчётными. Несовпадение расчётных и заявленных показателей ЛРМ можно объяснить и тем, что, возможно, также используется технология съёмки объекта наблюдения со сдвигом на полпикселя в изображении и обработки изображения на борту КА.

### **Выводы**

1. Для зарубежных КА ДЗЗ в качестве одного из показателей детальности наблюдения часто используется пиксельное разрешение, поскольку оно численно даёт лучшие показатели по сравнению с линейным разрешением на местности. Это, по-видимому, делается для повышения привлекательности и продвижения информации ДЗЗ на Мировом рынке.

2. Заявленные значения линейного разрешения на местности российских КА ДЗЗ соответствуют расчётным, а для некоторых зарубежных КА расчётные значения ЛРМ не достигают заявленных значений.

3. Данное исследование может помочь проектантам при анализе заявленных значений линейного разрешения на местности зарубежных средств оптико-электронного наблюдения поверхности Земли.

### ***Библиографический список***

1. Маламед, Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: учебное пособие / Е.Р. Маламед. – Санкт-Петербург: СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.

2. Бакланов, А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие / А.И. Бакланов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.

3. 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. Т. 4. Вып. 2. С. 20–28) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. Вып. 1. – С. 48–51.

4. Куренков, В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика: учебное пособие / В.И. Куренков. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 461 с.

5. Куренков, В.И. Методика оценки параметров оптико-электронных телескопических комплексов космического назначения по заданному пространственному разрешению / В.И. Куренков, В.М. Фёдоров В.М. Е.А. Пупков, В.В. Каменский. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VII Козловские чтения), (31 авг. 2021 г., г. Самара). – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2021. С. 45–54.

6 Космические аппараты типа Ресурс-П. Российские космические системы. <http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/resurs-p/>

7. Pleiades-HR (High-Resolution Optical Imaging Constellation of CNES) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/pleiades>

8. КА ДЗЗ WorldView-4. eoPortal Directory [Электронный ресурс] / <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-4>