

**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)**

Аннотация. В редакцию журнала «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы» поступило письмо из АО «РКЦ “Прогресс”», г. Самара, о статье «О предельном инструментальном разрешении космического аппарата “Ресурс-П” (№№ 1, 2, 3)» автора К. Н. Свиридова, опубликованной в журнале в 2017 г., том 4, выпуск 2.

В письме выражается несогласие с позицией автора статьи. Неоднозначная оценка научных результатов автора свидетельствует о важности рассматриваемой темы и, несомненно, будет способствовать поиску наиболее совершенных методов повышения инструментального разрешения оптико-электронных средств ДЗЗ.

В рамках научной дискуссии на страницах журнала публикуем текст письма АО «РКЦ “Прогресс”» без каких-либо изменений и с сохранением авторского стиля.

**Comments of JSC SRC Progress to the Article
“Limiting Instrumental Resolution
of the Resurs-P Spacecraft (No. 1, 2, 3)” by K. N. Sviridov
(journal “Rocket-Space Device Engineering
and Information Systems”, 2017, Vol. 4, Is. 2, p. 20–28)**

Abstract. The editorial board of the journal “Rocket-Space Device Engineering and Information Systems” received a letter from JSC SRC Progress, Samara, concerning the article “Limiting Instrumental Resolution of the Resurs-P Spacecraft (No. 1, 2, 3)” by K. N. Sviridov, published in the journal in 2017, Volume 4, Issue 2.

The letter expresses disagreement with the position of the author of the article. The controversial assessment of the author’s scientific work testifies to the importance of the topic under consideration and will undoubtedly contribute to the search for the most advanced methods for increasing the instrumental resolution of the optical and electronic means of remote sensing.

В статье содержится ряд неточностей, которые нельзя оставить без внимания, поскольку они носят принципиальный характер и затрагивают основные целевые характеристики оптико-электронных средств ДЗЗ. Итак, по пунктам заключения.

1. По пунктам 1 и 4 заключения.

В статье утверждается, что предельное разрешение на местности КА «Ресурс-П» завышено в 2 раза и составляет 1,43 м, а не 0,71 м (по п. 1 заключений) и следует перейти на оценку качества информации по проекции 2 пикселей (п. 4 заключения).

Похоже, что это утверждение автор относит и ко всем другим средствам ДЗЗ как отечественным, так и зарубежным, поскольку подход к оценке пространственного разрешения по проекции пикселя общепринят.

Практика представления ЛРМ при наблюдении из космоса как проекции пикселя, а не как периода дискретизации, т. е. не по двойному размеру пикселя, сложилась давно, где-то с 70-х годов прошлого века, т. е. с начала активного развития средств ДЗЗ, и с тех пор широко применяется. Пересматривать ее не имеет смысла. Причин несколько:

- потребителей информации интересует в первую очередь минимально разрешаемый элемент на поверхности Земли;

- показатель универсальный и не зависит от условий съемки в отличие от ЛРМ в условиях эксплуатации, которые варьируются в зависимости от требований потребителей и могут заметно отличаться;

- введение новых показателей приводит к запутыванию оценки качества ОЭА.

Вывод. Представленное предельное разрешение КА «Ресурс-П» (0,71 м) не противоречит общепринятому в мировой практике.

2. По п. 2 заключения по предельному дифракционному разрешению на местности.

В статье неожиданно перепутываются понятия пиксельного и дифракционного разрешений.

Дифракционное разрешение определяет потенциальные возможности оптики и описывается формулами: предельная частота, которую пропускает объектив, определяется известной зависимостью (Шеннон Р., Вайант Дж. Проектирование оптиче-

ских систем. М.: Мир, 1983 г.)

$$f_{\text{дифр}} = \frac{D}{\lambda F},$$

период разрешаемой миры в фокальной плоскости

$$T = \frac{1}{f_{\text{дифр}}}.$$

Для ОЭА ДЗЗ линейное разрешение определяется половиной этого периода, т. е.

$$L_{\phi} = \frac{1}{2f_{\text{дифр}}}$$

в фокальной плоскости, и

$$L_{\text{дифр}} = \frac{\lambda H}{2D}$$

на местности, где λ — длина волны регистрируемого излучения (для КА «Ресурс-П» — $\lambda = 0,58$ – $0,8$ мкм);

H — высота съемки;

F — фокусное расстояние объектива;

D — диаметр объектива.

Для КА «Ресурс-П» (при $\lambda = 0,58$ мкм) $f_{\text{дифр}}$ составляет 216 мм^{-1} а $L_{\text{дифр}} = 0,276 \text{ м}$.

В реальности характеристики оптики всегда хуже дифракционных, поскольку присутствуют неизбежные потери из-за аберраций, технологических погрешностей изготовления, эксплуатационных условий. Это приводит к необходимости балансировать характеристиками ФПУ, подстраивая их под реальные характеристики оптики, чтобы, с одной стороны, получить приемлемые условия работы ФПУ по рабочим пространственным частотам оптики (где обеспечиваются достаточно высокие ФПМ), а с другой — чтобы не перегрузить тракт передачи информацией, не несущей полезного сигнала.

Проекция пикселя (ground sample distance, GSD) характеризует потенциальные возможности системы объектив–приемник.

В правильно спроектированной системе разрешение в благоприятных условиях наблюдения (при минимальных потерях по атмосфере, по смазам изображения, по терморасстраиваемости, при высоком контрасте объекта и др.) должно

приближаться к пиксельному. Это разрешение описывается формулой

$$L_{\text{пикс}} = \frac{\delta H}{F},$$

где δ — размер приемника.

Соотношение

$$\frac{L_{\text{пикс}}}{L_{\text{дифр}}} = K$$

можно назвать коэффициентом совершенства оптической системы. Если подставить в эту формулу значения $L_{\text{пикс}}$ и $L_{\text{дифр}}$, то получим

$$K = \frac{2\delta D}{\lambda F}.$$

Естественно, $K > 1$.

Анализ отечественного и зарубежного опыта создания ОЭА для ДЗЗ показывает, что на современном этапе для наиболее совершенных высокоразрешающих ОЭА обеспечивается (для $\lambda = 0,55$ мкм) этот коэффициент на уровне $K = 2,2-2,4$.

Например:

КА	Параметр			
	D , м	F , м	δ , мкм	K
Pleiades	0,65	12,9	13	2,38
WorldView-2	1,1	13,3	8	2,4
SPOT-6	0,2	4,17	12	2,1
EROS-B	0,5	5	7	2,5

Для КА «Ресурс-ДК1» этот коэффициент (для λ , приведенной к 0,55 мкм) был $K = \frac{2 \cdot 9 \cdot 0,5}{0,55 \cdot 4} = 4$.

Для изделия — его предшественника:

$$K = \frac{2 \cdot 12 \cdot 0,5}{0,558 \cdot 4} = 5,4.$$

Т. е. в этих системах имелся неиспользованный потенциал оптики, который и позволил применить в КА «Ресурс-П» приемники размером 6×6 мкм (вместо 9×9 мкм и 12×16 мкм соответственно) и довести коэффициент $\frac{L_{\text{п}}}{L_{\text{д}}}$ до

$$K = \frac{2 \cdot 6 \cdot 0,5}{0,55 \cdot 4} = 2,72.$$

Здесь можно говорить о возможности использования приемников размером около 5 мкм и доведения коэффициента K до 2,26, что соответствовало бы лучшим зарубежным образцам ОЭА. Далее возможности оптики исчерпываются.

Ни о каком-либо кардинальном изменении приемника до 2,3 мкм или увеличении фокусного расстояния до 10,4 м говорить не приходится, т. к. это будет противоречить здравому смыслу — пиксельное разрешение станет меньше дифракционного. Потребуется переход на высокие сквозные частоты системы, на которых не обеспечиваются требуемые ФПМ.

Вывод. Характеристики ОЭА «Ресурс-П» близки к предельным. Предложение автора по повышению разрешения противоречит физическому смыслу.

3. По п. 3 заключения о согласовании по Найквисту аппаратуры КА ДЗЗ.

В основе «нововведения» автора лежит предложенный им критерий, заключающийся в необходимости передачи детектором удвоенной частоты Найквиста объектива ($f_{\text{дифр}} = f_{D/\lambda F} = f_{\text{макс.}} = f_N$). Данный подход ошибочен, т. к., во-первых, предельная частота определяется при значении ФПМ, равной нулю, контраст изображения мира равен нулю, т. е. изображение отсутствует; во-вторых, игнорируются полностью вопросы чувствительности аппаратуры (и, как следствие, достижимое отношение «сигнал/шум»). Задачей разработчиков ОЭА является такой подбор характеристик оптики-приемника, который обеспечит необходимые ФПМ и соотношение сигнал/шум на сквозной рабочей частоте.

Как показано выше, отношение проекции пикселя к дифракционному разрешению для современных ОЭА находится на уровне 2,2–2,4, что соответствует обратному соотношению частот дискретизации, т. е.

$$f_{\text{пикс}} = \frac{f_{\text{дифр}}}{2,2-2,4}.$$

То есть отношение $f_{\text{дифр}}$ к $f_{\text{пикс}}$ — более двух!

В зачетных условиях съемки при низком угле Солнца и малых контрастах разрешение на местности падает и соответственно снижается сквозная пространственная рабочая частота: для зачетных

условий КА «Ресурс-П» $f_{\text{зач}} = \frac{H}{2 \cdot L \cdot F} \approx 60 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}$, что составляет $\approx 70\%$ от частоты $f_{\text{пикс}}$ приемника.

Если бы автор проанализировал, как на проектной стадии согласуются параметры системы объектив–приемник и существующее на сегодняшний день состояние по достигнутым характеристикам ОЭА, то убедился бы в том, что в передовых системах рабочие сквозные частоты существенно ниже предельных дифракционных. Строить ОЭА под утопические критерии в мире никто пока не собирается.

Вообще говоря, ОЭА КА «Ресурс-П» прошла в свое время стадию прикидочных расчетов, к которым можно отнести обсуждаемые в статье, после этого проведены оценки разрешающей способности с учетом всех влияющих факторов (о которых автор статьи забывает): фоноцелевой обстановки, ФПМ всех звеньев оптико-электронного тракта (аббераций, фотоприемника, смаза и др.), энергетической составляющей, шумовой составляющей. Априорные и апостериорные оценки дали хорошее совпадение. Пример методики реальной оценки разрешающей способности с учетом влияющих факторов можно найти: Батраков А. С., Анатольев А. О. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования. Оптический журнал, т. 67. № 7, 2000 г.

Вывод. Построение ОЭА с приведением частоты дискретизации приемника под дифракционную разрешающую объектива приводит к ошибочным результатам, поскольку на этих частотах не обеспечивается необходимая ФПМ системы.

4. По п. 5 и п. 6 заключения, касающихся учета влияния турбулентности атмосферы при съемке из космоса.

Затронута важная проблема ДЗЗ. Но применительно к характеристикам ОЭА КА «Ресурс-П»,

да и большинства ОЭА ДЗЗ, использующих ВЗН-матрицы, предложение по коррекции атмосферных искажений в процессе съемки сомнительно из-за длительности экспозиции (накопление до 192 строк) и изменения искажений волнового фронта за это время, а также проблем сопряжения этой коррекции с характерной частотой измерений 15–20 кГц. Прогнозируемый результат — достижение дифракционного разрешения — нереален.

Вывод. Предложение неконкретно, ожидаемый эффект необоснован.

Заключение

1. Целевые характеристики КА «Ресурс-П» проверены съемками в ходе ЛИ, в том числе по мишенным комплексам; доказано их соответствие заявленным (а не в 2 раза хуже).

2. Характеристики ОЭА КА «Ресурс-П» близки к оптимальным для системы объектив–приемник и соответствуют мировому уровню.

3. Предложенные в статье «доработки аппаратуры» КА «Ресурс-П» не имеют оснований (абсурдны по своей сути), поскольку базируются на ошибочных принципах оптимизации ОЭА, не учитывающих многие определяющие факторы (ФПМ, с/ш и др.).

4. Предложение перейти на оценку разрешения на местности по проекции 2 пикселей противоречит сложившейся мировой практике ДЗЗ и нецелесообразно.

5. Дальнейшие обещанные автором статьи на тему «анализа реального инструментального разрешения и требуемых согласований по Найквисту» целесообразно до публикации подвергнуть критическому рассмотрению во избежание тиражирования ошибочных концепций.