

Проектирование и конструирование космических систем

УДК 629.78 (075)

Куренков В.И., Кучеров А. С., Пупков Е.А.

ПРОЕКТНАЯ ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При проектировании космических аппаратов (КА) оптико-электронного наблюдения поверхности Земли ориентируются на оптико-электронные телескопические комплексы (ОЭТК), которые создаются в ракетно-космической отрасли. Однако существующие в отрасли ОЭТК могут не подойти для разрабатываемых КА по некоторым характеристикам, в частности, по разрешающей способности на местности. Поэтому возникает необходимость предварительной проработки вариантов КА с потребными характеристиками ОЭТК, которые могли бы быть созданы на предприятиях отрасли. В этой связи актуальной задачей является разработка приближённой инженерной методики оценки разрешающей способности на местности оптической системы наблюдения КА по заданным целевым характеристикам.

В технической литературе представлено достаточно много методик проектирования оптических систем (ОС), в том числе и космических телескопических комплексов, например [1,2]. Однако большинство из таких методик сложны, описывают отдельные явления такого многогранного явления, как формирование изображения, требуют высочайшей квалификации исполнителей.

В настоящей статье предлагается инженерная методика, с помощью которой можно оценить потребную разрешающую способность оптических систем на этапе проектирования с приемлемой для проектных проработок точностью.

Для экспериментальной оценки разрешающей способности используются космические снимки специального наземного тестового объекта – «миры» [3]. Разрешающая способность – это количество различимых штрихов (светлых и тёмных) на снимке миры. Пользуются и другим показателем детальности – линейным разрешением на местности (ЛРМ). ЛРМ – это минимально различимая ширина черной (или белой) полос миры. Отметим, что указанные показатели зависят от характеристик качества оптической системы, условий съёмки и управления угловым движением КА. Поэтому начнём

рассматривать съёмку при идеальных условиях и управлении. Поправку на реальные (зачётные) условия обсудим в конце статьи.

Достаточное условие обеспечения заданной разрешающей способности

Для оценки этого условия используется подход, основанный на анализе частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) оптической системы [2]. ЧКХ $T(\nu)$ характеризует снижение уровня качества изображения при его формировании в зависимости от пространственной частоты ν , пропускаемой ОС, и вычисляется как отношение контраста изображения $k_{из}(\nu)$ к контрасту объекта съёмки $k_{об}(\nu)$:

$$T(\nu) = \frac{k_{из}(\nu)}{k_{об}(\nu)} \quad (2)$$

Если на качество изображения влияет нескольких факторов (n) – отдельных звеньев оптического тракта формирования изображения, то влияние каждого их них можно представить с помощью соответствующей ЧКХ $T_i(\nu)$, а результирующую ЧКХ можно определить перемножением соответствующих ЧКХ [1]:

$$T_{рез}(\nu) = \prod_{i=1}^n T_i(\nu) \quad (3)$$

Если задан контраст на входе оптической системы и известна результирующая ЧКХ, то контраст изображения на выходе ОС можно определить по формуле

$$k_{из}(\nu) = k_{об} T_{рез}(\nu). \quad (4)$$

Достаточным условием обеспечения заданной разрешающей способности (или ЛРМ) при некоторых зачётных условиях съёмки является условие превышения наложенного (результирующего) контраста изображения $k_{из}^n(\nu)$, получаемого в фокальной плоскости ОС, над пороговым контрастом $k_{из}^n(\nu)$, определяемым чувствительностью фотоприёмной аппаратуры:

$$k_{из}^n(\nu) \geq k_{из}^n(\nu). \quad (5)$$

Наибольший интерес представляет изучение передаточных свойств оптической системы для малоконтрастных участков земной поверхности, поэтому значение порогового контраста выбирается из диапазона $k_{из}^n(\nu) = (0,15...0,20)$ [1].

ЧКХ отдельных звеньев оптического тракта формирования изображения

ЧКХ для идеальной ОС можно рассчитать по выражению [2]:

$$T0(\nu) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\lambda f \nu}{D} \right) - \frac{\lambda f \nu}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f \nu}{D} \right)^2} \right], \quad (6)$$

где λ – длина волны; f – фокусное расстояние; ν – частота; D – диаметр объектива.

ЧКХ при наличии aberrаций. Влияние aberrаций, учитывающих наиболее значимые погрешности изготовления оптики, можно учесть функцией [4]

$$T1(\nu) = 1 - A \cdot \sigma_s^2 \left[1 - 4 \left(\frac{\nu}{\nu_m} - 0,5 \right)^2 \right], \quad (7)$$

где $\nu_m = D/(\lambda_s f)$ – предельная пространственная частота; λ_s – средняя длина волны рассматриваемого спектрального диапазона; A – постоянная в диапазоне 30...32; σ_s – среднее квадратическое отклонение (СКО) aberrаций.

СКО aberrаций зависит от качества ОС. Для ОС высокого качества СКО составляет: 0,05...0,08; хорошего качества: 0,1...0,125; плохого качества $> 0,2$.

Влияние aberrаций, учитывающих волнистость и остаточную шероховатость оптических поверхностей, описывается функцией [4]

$$T2(\nu) = \exp \left(-4 \pi^2 \cdot \sigma_{ST}^2 \left(\nu / \nu_m \right)^2 \right), \quad (8)$$

где σ_{ST} – среднее квадратическое отклонение случайных ошибок волнового фронта.

ЧКХ дискретных приёмников по сути характеризует потери качества изображения по сравнению с идеальными приёмниками и рассчитывается по формуле [4]:

$$T3(\nu) = \frac{1}{1 + k_N \left(\frac{\nu}{0,5 \cdot \nu_N} \right)^2}, \quad (9)$$

где ν_N – частота Найквиста; k_N – коэффициент снижения ЧКХ на частоте 0,5 от частоты Найквиста.

ЧКХ с учётом расфокусировки (δ) может быть рассчитана по формуле [2]:

$$T4(\nu) = \frac{\sin \left[\pi \cdot \delta \cdot \nu \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2 f / D} - \nu \cdot \lambda \right) \right]}{\frac{\pi \sqrt{\pi} \cdot \delta \cdot \nu}{2 f / D}}. \quad (10).$$

ЧКХ с учётом сдвига изображения (h) определяется зависимостью [5, 6]:

$$T5(\nu) = \left[\frac{\sin(\pi \cdot h \cdot \nu)}{\pi \cdot h \cdot \nu} \right]. \quad (11)$$

ЧКХ с учётом вибрации уровня G можно найти по зависимости [5]:

$$T6(\nu) = \exp\left[-2(\pi f G \nu)^2\right]. \quad (12)$$

Для получения **ЧКХ при совместном влиянии факторов** потери качества изображения (аббераций, дискретности фотоприёмника, расфокусировки, сдвига изображения и вибрации) необходимо, согласно (3), перемножить функции (6) – (12):

$$T7(\nu) = T0(\nu)T1(\nu)T2(\nu)T3(\nu)T4(\nu)T5(\nu)T6(\nu). \quad (13)$$

Определение разрешающей способности ОЭТК с помощью ЧКХ

В процессе проектирования КА, когда изделие еще не создано, и эксперимент по определению разрешающей способности (или ЛРМ) не может быть осуществлен, для априорной оценки разрешающей способности используется следующий подход.

На основе функций ЧКХ всех звеньев сквозного тракта формирования изображения вычисляется значение наложенного (результатирующего) контраста изображения на фотоприёмном устройстве для каждой пространственной частоты.

Разрешающая способность ОС определяется пространственной частотой, при которой значение наложенного контраста совпадает с пороговым контрастом; в данном исследовании он принят равным $k_{из}^n(\nu) = 0,15$.

Результаты расчёта разрешающей способности

На рис. 1. представлены рассчитанные по приведённым зависимостям графики наложенного контраста $T7(\nu)$ и графики составляющих ЧКХ, входящих в формулу (13), для оптической системы с параметрами, как у КА ДЗЗ «Ресурс-П», а именно: $f = 4 \text{ м}$, $D = 0,5 \text{ м}$, $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\sigma_s = 0,065$, $h = 2 \text{ мкм}$, $G = 1 \cdot 10^{-7}$.

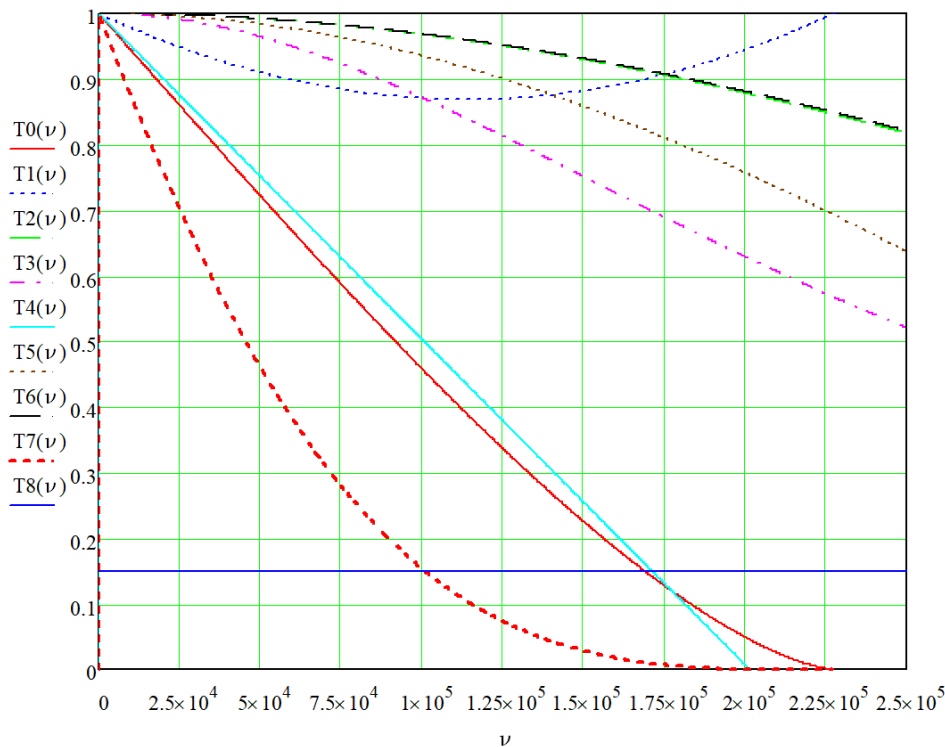


Рис. 1. Графики ЧКХ оптической системы при совместном влиянии факторов снижения качества изображения

На этом рисунке также представлен график $T8(\nu) = 0,15$ (горизонтальная линия), соответствующий пороговому контрасту 0,15. Можно определить, что пересечение линий происходит при частоте, примерно равной $\nu = 101 \text{ лин} / \text{мм}$.

Действительно, решая уравнение $T9(\nu) = T7(\nu) - 0,15$ в системе Mathcad, получаем:
 $root(T9(\nu), \nu) = 1,009 \cdot 10^5 \text{ лин} / \text{м} \approx 101 \text{ лин} / \text{мм}$.

Исходя из этого, частоту Найквиста [1] следует брать равной $\nu_N = 2 \cdot \nu = 2 \cdot 101 = 202 \text{ лин} / \text{мм}$, а линейный размер фотоприёмного элемента принять следующим:

$$l_{эл} = 1/202 = 4,953 \approx 5 \text{ мкм}.$$

Анализ результатов

При пересчёте на высоту 475 км получаем проекцию пикселя

$$L_M^{пикс} = l_{эл} \frac{H}{f} = 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{475 \cdot 10^3}{4,00} \approx 0,60 \text{ м}. \quad (14)$$

Однако размер элемента в фотоприёмном устройстве КА «Ресурс-П» составляет 6 мкм, и пересчёт по формуле (14) приводит к проекции пикселя 0,71 м, что соответствует наилучшему ЛРМ КА ДЗЗ «Ресурс-П».

Почему же имеются расхождение теоретических расчётов с реальными данными? Дело в том, что в расчётах не учтены термооптические аберрации и искажения информации, вносимые другими звеньями сквозного тракта формирования изображения. Кроме того, в качестве исходных данных были использованы средние значения статистических коэффициентов, которые могут отличаться от реальных.

Отметим, что для зачётных условий ЛРМ, как правило, ниже показателя проекции пикселя на поверхность Земли в 1,3...1,5 раза. Например, для КА ДЗЗ «Ресурс-П» ЛРМ в зачётных условиях составляет 1 м.

Выводы

1. Представлена относительно простая инженерная методика проектной оценки линейного разрешения на местности (при зачётных условиях), которая основана на анализе частотно-контрастных характеристик.

2. Данная методика может быть использована на начальных этапах проектирования КА ДЗЗ по заданной разрешающей способности на местности или линейному разрешению на местности для разработки технических заданий организациям, создающим оптико-электронные телескопы космического назначения.

Библиографический список

1. Маламед, Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. –291 с.

2. Соллогуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА [Текст] / А. В. Соллогуб, Г. П. Аншаков, В. В. Данилов; Под ред. Д. И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.

3. Куренков, В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие [Текст] / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 296 с.

4. Батраков, А. С. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования [Текст] / А. С. Батраков, А. Ю. Анатольев. – Оптический журнал. Том 67, № 7. 2000. С. 92–99.

5. Григорьев, А.Н. Концептуальная и аналитическая модели ведения оптико-электронной съёмки с априорной экспонетрией на борту космического аппарата [Текст] / А.Н. Григорьев, Е.А. Дулин, Д.С. Коршунов [и др.] – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 129-138.

6. Дарнопых, В.В. Синтез информационного тракта при планировании целевого функционирования космических систем наблюдения по критериям качества [Текст] / В.В. Дарнопых, В.В. Ефанов, К.А. Занин [и др.] – Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 4. С. 100-107.