

12. datasheet1.pdf [Электронный ресурс]. – URL: <https://robu.in/wp-content/uploads/2017/05/datasheet1.pdf> (дата обращения: 16.04.2021).

13. Elitech мм 100 Инструкция по эксплуатации онлайн [1/1] [Электронный ресурс]. – URL: https://mcgrp.ru/files/viewer/218324/1#navigate_bar (дата обращения: 16.04.2021).

УДК 629.78 (075)

Пупков Е.А.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ РАСФОКУСИРОВКИ

Проектирование космических аппаратов (КА) оптико-электронного наблюдения поверхности Земли на начальном этапе включает в себя выбор параметров оптико-электронного телескопического комплекса (ОЭТК), зависящих от множества других проектных параметров КА. Этот процесс является итерационным, включающим в себя этапы определения проектных параметров космического аппарата, их корректировку, выбор конкретных систем и т.д. Одними из основных показателей являются линейное разрешение на местности (ЛРМ), ширина полосы захвата, ширина полосы обзора. При проведении проектных расчётов по определению линейного разрешения на местности можно использовать различные методические подходы, одним из которых является подход, основанный на анализе частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) оптических систем [1-5]. Суть этого подхода заключается в определении предельно пропускаемой частоты оптической системой, соответствующей точке пересечения кривой наложенного контраста изображения результирующей функции ЧКХ, и порогового контраста. Линейное разрешение на местности, в свою очередь, связано с предельно пропускаемой частотой оптической системы (ОС) (через высоту полёта КА, фокусное расстояние, диаметр ОС, размеры пикселя и др. [1, 5]).

В технической литературе представлены различные подходы к оценке ЧКХ отдельных звеньев и космического телескопического комплекса в целом [1–5 и др.]. В них рассматриваются различные формы зависимостей и ограничений для

одних и тех же звеньев ОС, вследствие чего возникает вопрос о правомерности их использования.

Целью представленного исследования является сравнительный анализ моделей для расчёта частотно-контрастных характеристик объектива с учётом расфокусировки и выбор наиболее подходящей модели.

В работах [1, 4, 5] функции ЧКХ объектива с учётом расфокусировки представлены соответственно в виде следующих выражений:

$$T_1(\nu) = \frac{\sin\left(\pi \cdot \delta \cdot \nu \cdot \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot (f/D)} - \nu \cdot \lambda\right)\right)}{\pi \cdot \delta \cdot \nu \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot (f/D)}}, \quad (1)$$

$$T_2(\nu) = \left| \frac{J_1(2\pi\nu\delta)}{\pi\nu\delta} \right|, \quad (2)$$

$$T_3(\nu) = 4 \left(\frac{J_1(\pi\nu\delta)}{\pi\nu\delta} \right)^2, \quad (3)$$

$$T_4(\nu) = \exp(-2\delta^2\nu^2), \quad (4)$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода;

δ – линейное смещение фоточувствительной плоскости от плоскости наилучшей фокусировки;

f и D – фокусное расстояние и диаметр оптической системы соответственно.

На рис. 1 представлены графики функций $T_1(\nu)$, $T_2(\nu)$, $T_3(\nu)$ и $T_4(\nu)$, построенные с использованием пакета программ MathCAD, для следующих исходных данных: $l_{эл} = 9 \cdot 10^{-6}$ м; $f = 12,73$ м; $D = 1,1$ м; $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$ м, $\delta = 3 \cdot 10^{-6}$ м.

При построении графиков функций ЧКХ в соответствии с [1, 5] величина линейного смещения определяется из выражения:

$$\delta = l_{эл} / 3, \quad (5)$$

где $l_{эл}$ – линейный размер фотоприёмного элемента оптико-электронного комплекса КА (выбирается в зависимости от спектральных зон наблюдения).

В работе [4] линейное смещение выбирается из условия:

$$\delta \leq \frac{1}{2} \lambda \frac{f}{D}. \quad (6)$$

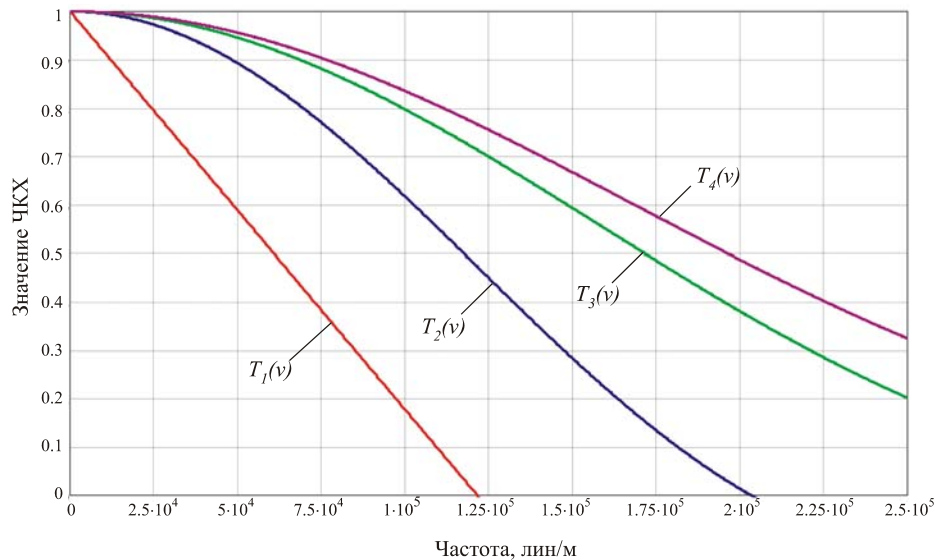


Рис. 1. Графики функций ЧКХ объектива с учётом расфокусировки

Выражение (6) означает, что максимальное линейное смещение не может быть больше предельного дифракционного разрешения по критерию Релея.

В работе [6] были получены соотношения между значениями фокусного расстояния, диаметра оптической системы, линейным размером фотоприёмного элемента КА ДЗЗ и длиной волны, а именно:

$$\frac{f}{D} = (0,8086 \pm 0,08) \frac{l_{эл}}{\lambda}. \quad (7)$$

Выражая из этой зависимости $l_{эл}$, получим значение величины линейного смещения в следующем виде:

$$\delta = \frac{1}{3 \cdot (0,8086 \pm 0,08)} \lambda \frac{f}{D} = k_{рф} \cdot \lambda \frac{f}{D}, \quad (8)$$

где

$$k_{рф} = \frac{1}{3 \cdot (0,8086 \pm 0,08)} = 0,3751..0,4575.$$

Сравнивая правые части выражений (6) и (8), видим, что полученный коэффициент $k_{рф} = 0,3751..0,4575$ меньше $1/2$, а значит, выражение (5) удовлетворяет условию (6) и может быть использовано при анализе ЧКХ оптических систем с учётом расфокусировки.

Проведем анализ представленных ранее функций ЧКХ объектива с учётом расфокусировки (1)-(4). На рис. 1 видно, что графики функций $T_2(v)$ и $T_3(v)$ нахо-

дятся между графиками функций $T_1(\nu)$ и $T_4(\nu)$. Конечно, для конкретных оптических систем функция ЧКХ объектива с учётом расфокусировки не может быть однозначно определена. Данное обстоятельство приводит к заключению о необходимости использования некой усредненной характеристики, наиболее близкой к которой является $T_2(\nu)$.

Выводы

1. Проведён анализ существующих моделей оптических систем с учётом расфокусировки. Показано, что используемые при расчётах зависимости частотно-контрастных характеристик дают существенно отличающиеся друг от друга результаты.

2. При проведении расчётов предлагается использовать выражение (2) для описания частотно-контрастной характеристики оптической системы с расфокусировкой. Данная зависимость наиболее близка к усреднённой функции относительно остальных.

3. Величина линейного смещения (5) удовлетворяет условию не превышения предельного дифракционного разрешения по критерию Релея и может быть использована в качестве параметра в частотно-контрастной характеристике оптической системы с расфокусировкой.

Библиографический список

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

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

3. 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.

4. Методы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов космических аппаратов / К.А. Занин; под ред. В.В. Ефанов, К.М. Пичхадзе // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Том 1. – Москва: Издательство МАИ-Принт, 2013. – С. 261–335.

5. 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.

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

УДК 528.837:629.78. УДК 621.003.

Кучеров А.С., Чиклин П.В.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Актуальной является проблема анализа надежности сложных технических систем, к которым, в частности, относятся бортовые системы космических аппаратов.

Тщательному анализу причин отказов и определению мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствует построение дерева отказов [1].

Дерево отказов лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов; при анализе причины его возникновения отказ рассматривается как результат последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей, и таким образом дерево отказов представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей – от первопричины к следствию [2, 3].

На рис. 1 показано дерево отказов одной из бортовых систем малого космического аппарата (МКА) «Аист-2Т» – системы обеспечения теплового режима (СОТР).