

УДК 528.553.98

Обоснование методики внешнего контроля космической оптической аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности

А. Д. Федоровский, В. И. Кононов, К. Ю. Суханов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 28.01.97

Розглядається методика наземного контролю функції передачі модуляції та роздільної здатності оптичної аппаратури дистанційного зондування земної поверхні, функціонуючої на борту космічного апарата. Приведено розрахунок параметрів аппаратури супутника «Січ-1» (МСУ-С).

Контроль основных параметров оптической аппаратуры дистанционного зондирования, функционирующей на борту космических спутников, например, «Січ-1» (аппаратура МСУ-С) в процессе их орбитальных полетов, является одной из важных задач, решаемых наземными службами. Традиционные методики наземной проверки амплитудно-частотной характеристики и разрешающей способности такой аппаратуры основаны на непосредственном сканировании специальных тест-объектов и калибровочных миш, расположенных на земной поверхности. Это связано с созданием достаточно сложных и дорогостоящих наземных сооружений.

Предлагается для оперативного контроля функции передачи модуляции (ФПМ) и реальной разрешающей способности аппаратуры дистанционного зондирования (с учетом факторов полета спутника) использовать переходную функцию аппаратуры. Последняя определяется в наземных условиях по космическим снимкам, полученным с помощью контролируемой аппаратуры и переданным по каналам связи.

Известно, что ФПМ представляет собой модуль оптической передаточной функции (ОПФ) и является пространственной амплитудно-частотной ха-

рактеристикой (АЧХ) аппаратуры, определяющей зависимость изменения амплитуды синусоидального оптического сигнала на выходе всей системы от пространственной частоты. Эта функция однозначно связана с распределением освещенности в изображении границы резкого раздела между соседними участками земной поверхности (светлым и темным, теплым и холодным). Если в плоскости объектов имеется такая граница («краевой след»), то регистрирующая оптическая аппаратура в зависимости от размера ее мгновенного поля зрения сгладит эту границу в большей или меньшей степени. В оптике функцию, описывающую распределение освещенности в изображении «краевого следа», называют пограничной кривой.

Существует способ непосредственного пересчета пограничной кривой в ОПФ. Эти характеристики связаны следующим уравнением

$$H(x) = 0.5 + \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(2\pi i\nu)}{\nu} \exp(2\pi i\nu x) d\nu,$$

где $H(x)$ — пограничная кривая аппаратуры; $T(2\pi i\nu)$ — ОПФ аппаратуры, ν — пространственная частота.

Однако решение этого уравнения связано со значительными математическими трудностями. Поэтому в данной работе применен другой подход, который использует взаимосвязи между пограничной кривой, функцией рассеяния линии и ФПМ.

Известно, что нормированные значения освещенности в каждой точке изображения полуплоскости связаны со значениями функции рассеяния линии следующим выражением (Гудмен, 1970)

$$H(x) = \int_{-\infty}^x A(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $A(\xi)$ — функция рассеяния линии; ξ — текущее значение аргумента в системе координат, где ось ξ совпадает с осью координат X .

Между ОПФ и функцией рассеяния линии существует однозначная связь — эти функции получают друг из друга прямым и обратным Фурье-преобразованием. Известно, что функция рассеяния линии является одномерным преобразованием функции рассеяния точки. Для многих практических случаев функции рассеяния точки имеют круговую симметрию, а соответствующие им ОПФ изотропны в области пространственных частот. Тогда для получения ОПФ можно воспользоваться одномерным вариантом Фурье-преобразования

$$T(iv) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cdot \exp(-2\pi ivx) dx, \quad (2)$$

где $\nu - \nu_x$ — пространственная частота по оси X .

Так как для случая симметричной ОПФ фазовая составляющая равна нулю, то ОПФ в этом случае равна ФПМ:

$$T(iv) = |T(iv)| = T(\nu).$$

Пределы интегрирования в выражении (2) реально имеют конечные значения и связаны с протяженностью нормированной пограничной кривой. Последнее определяет точность получения ФПМ в области низких пространственных частот.

Функцию $A(x)$ для случая аэрокосмических оптических систем часто аппроксимируют законом Гаусса

$$A(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2\sigma^2), \quad (3)$$

где σ — постоянная закона Гаусса, имеющая для нашего случая размерность линейной величины.

Тогда с учетом (3) выражения (1) и (2) примут следующий вид

$$H(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2/2\sigma^2) dx, \quad (4)$$

$$T(iv) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2/2\sigma^2) \exp(-i2\pi vx) dx. \quad (5)$$

Известное (Кононов, Федоровский и др., 1981) решение уравнения (5) имеет вид

$$T(\nu) = \exp(-2\pi^2\sigma^2\nu^2). \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), для аппроксимации ФПМ законом Гаусса необходимо знать величину σ , которую можно определить двумя способами. Первый способ основан на том, что при значении $\sigma = 1$ уравнение (4) переходит в выражение нормальной функции распределения (функции Лапласа).

Задаваясь значениями $x_1 = -1$ и $x_2 = 1$, по таблицам функции Лапласа получаем значения $H(x_1) = 0.16$ и $H(x_2) = 0.84$. Таким образом, для определения значения параметра σ на нормированной пограничной кривой необходимо отметить точки на уровне 0.16 и 0.84 и спроецировать их на ось X . Отрезок $x_2 - x_1$ по величине будет равен 2σ (Гаприндашвили и др., 1972).

Второй способ определения параметра σ реализуется в два приема. Вначале аналитически путем дифференцирования выражения (4), находится связь между максимальным градиентом пограничной кривой φ_{Hmax} и параметром σ :

$$\varphi_{\text{Hmax}} = [dH(x)/dx]_{\text{max}} = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}),$$

откуда $\sigma = 1/(\varphi_{\text{Hmax}}\sqrt{2\pi}) \sim 0.4/\varphi_{\text{Hmax}}$.

Затем методом численного дифференцирования реальных пограничных кривых определяется φ_{Hmax} .

Реальная пограничная кривая определяется экспериментально по космическим снимкам, полученным в процессе сканирования земной поверхности и переданным по каналам связи. При этом установлено, что ширина зоны раздела между полями с различными световыми или температурными контрастами не должна превышать 0.1—0.2 от диаметра проекции мгновенного поля зрения на плоскость земной поверхности, а направление линии измерения пограничной кривой по отношению к линии раздела световых полей должно находиться в пределах $90 \pm 5^\circ$.

При экспериментальном определении пограничной кривой необходимо обеспечить линейность амплитудной характеристики аппаратуры дистанционного зондирования в диапазоне значений амплитуд реальных сигналов и отработать процедуры нормировки сигнала по амплитуде и ограничения пограничной кривой по протяженности. Полученная таким образом нормированная пограничная кривая используется для определения параметра σ , необходимого для расчета ФПМ аппаратуры, на-

пример, типа МСУ по формуле (6).

Теперь остановимся на процедуре определения разрешающей способности аппаратуры дистанционного зондирования с использованием данной методики. Несмотря на то, что в последнее время этот критерий подвергается существенной критике (Березин, Кононов, 1981) на практике его продолжают применять. Это объясняется достаточной наглядностью и многолетней традицией его использования.

В нашем случае разрешающая способность аппаратуры находится как точка пересечения кривой ФПМ с кривой пороговой модуляции приемника излучений. В первом приближении разрешающую способность можно определить по уровню ФПМ равному величине результирующих шумов приемника оптической системы — $K_{\text{пор}}$, нормированные значения которых могут изменяться в пределах 0.15—0.3 от максимального значения ФПМ. При этом используется соотношение

$$k \exp(-2\pi^2\sigma^2 R_k^2) = K_{\text{пор}}, \quad (7)$$

где k — контраст синусоидальной миры.

Выражение (7) получено при подстановке $\nu = R_k$ в формулу (6). Из (7) находим

$$R_k = \sqrt{-[\ln(K_{\text{пор}}/k)] / (2\pi^2\sigma^2)}.$$

Линейный элемент разрешения на местности b_k определяется по формуле

$$b_k = 1/2R_k. \quad (8)$$

Поскольку разрешающая способность характеризуется высоко-частотной областью ФПМ, определяемой, в основном, областью максимального градиента пограничной кривой, то целесообразно для вычисления разрешающей способности определять параметр σ по уровням близким к ее центральной части, т. е. при $x_1 = -0.5$ и $x_2 = 0.5$, что соответствует уровням пограничной кривой 0.3; 0.7 и $x_2 - x_1 = \sigma$. При таком определении параметра σ лучше аппроксимируется высокочастотная область ФПМ, чем при определении этого параметра по уровням 0.16 и 0.84. При вычислении результирующих значений ФПМ для уменьшения средней квадратичной ошибки целесообразно использовать среднее значение параметра σ .

Экспериментальная проверка данной методики осуществлялась на примере пересчета пограничной кривой, полученной при сканировании аппаратурой МСУ-С, установленной на борту спутника «Січ-1», береговой линии Черного моря. Была рассчитана ФПМ и определено значение линейного разрешения аппаратуры МСУ-С на местности.

Экспериментально полученные пограничные

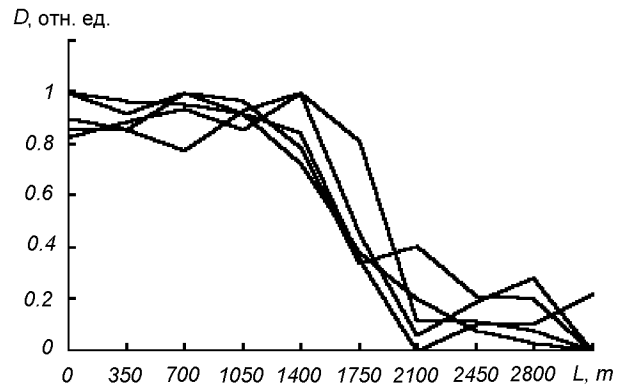


Рис. 1. Пограничные кривые, измеренные на космических снимках (аппаратура МСУ-С спутника «Січ-1»)

кривые (рис. 1) были пронормированы в соответствии с условием нормировки

$$H(x) = [L(x) - m_0] / (m_1 - m_0),$$

где $L(x)$ — текущее значение сигнала, m_0 и m_1 — математические ожидания сигнала, соответствующие его минимальному и максимальному уровням соответственно.

Математические ожидания m_0 и m_1 определяются усреднением реализации сигнала на участках до и после резкого перепада, размеры которых приблизительно соответствуют пяти протяженностям зон размытия. Следует отметить, что нормировку и определение величин m_0 и m_1 , необходимо производить только для случая визуального сглаживания. В случае использования процедуры сглаживания методом наименьших квадратов коэффициент аппроксимации получается в результате вычисления. Применение процедуры визуального сглаживания или сглаживания по методу наименьших квадратов определяется характером структуры фоновых поверхностей в зоне резкого перепада. При значительной неравномерности этого фона визуальное сглаживание более эффективно.

Расчет значений ФПМ, разрешающей способности $R_{1,0}$ и линейного разрешения на местности $b_{1,0}$ проводился по формулам (6), (7) и (8) с помощью экспериментально полученной пограничной кривой. При этом из набора пограничных кривых (рис. 1) после процедуры сглаживания выбирается кривая, имеющая наибольшую крутизну по сравнению с другими кривыми.

Расчитанная с помощью выше изложенной методики ФПМ аппаратуры МСУ-С спутника «Січ-1» приведена на рис. 2. Результаты расчета $R_{1,0}$ и $b_{1,0}$ для двух значений $K_{\text{пор}}$ (0.2 и 0.25) приведены в

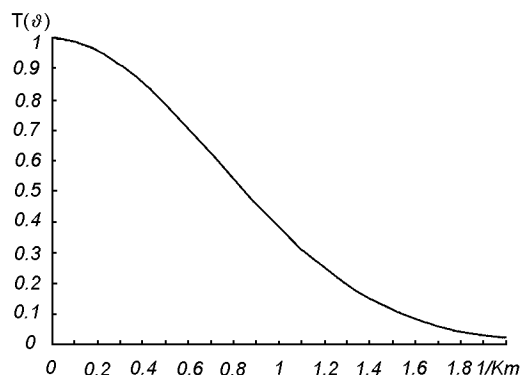


Рис. 2. Функция передачи модуляции аппаратуры МСУ-С спутника «Сич-1»

Значения параметров аппаратуры МСУ-С, полученные в результате измерений с помощью изложенной методики

$K_{\text{пор}}$	σ	$R_{1,0}$, 1/км	$b_{1,0}$, м
0.20	199	1.43	349
0.25	199	1.33	376

таблице, из которой видно, что для $K_{\text{пор}} = 0.2$ полученное значение $b_{1,0} = 349$ близко к номинальному значению $b_{\text{ном}} = 340$ м.

Рассмотренная методика может быть рекомендована для контрольных оценок реальных параметров оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности, функционирующей на борту космических объектов, снимки с которых используются для решения различных научных и прикладных задач.

Березин Н. П., Кононов В. И. Разрешающая способность: история, состояние и развитие // Оптико-мех. промышленность.—1991.—№ 11.—С. 33—38.

Гаприндашвили Х. И., Кононов В. И., Чибалашвили Ю. Л., Рябинин А. Д. Метод определения частотно-контрастных характеристик волоконно-оптических деталей по пограничным кривым // Оптика и спектроскопия.—1972.—33, Вып. 3.—С. 561—563.

Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. — М.: Мир, 1970.—270с.
Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — Киев: Техніка, 1981.—134 с.

BASIS FOR THE TECHNIQUE OF THE EXTERNAL CONTROL OF THE OPTICAL EQUIPMENT FOR THE REMOTE SOUNDING OF THE EARTH SURFACE

A. D. Fedorovskii, V. I. Kononov, and K. Yu. Sukhanov

We discuss a technique for the ground control of the modulation transfer and the resolution of the optical equipment for the remote sounding of the Earth surface from board a space vehicle. As an example, we calculate some parameters of the equipment of the "Sich-1" satellite (MSU-S).