

УДК 536.48:629.785

## О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли

**В. Г. Колобродов**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний іститут», Київ

*Надійшла до редакції 18.03.97*

Представлена методика розрахунку кутового розділення ІЧ-систем дистанційного зондування Землі, в основі якої лежить «щілинний» метод експериментального вимірювання кутового розділення. Методика враховує параметри об'єктива, скануючої системи та приймача випромінювання. Розглянуто приклад розрахунку кутового розділення.

Для дистанционного зондирования Земли широко используются оптико-электронные системы, работающие в ИК-диапазоне спектра (Committee, 1995). К таким ИК-системам относятся тепловизоры, радиометры и спектрорадиометры. Пространственное разрешение является наиболее важной характеристикой обзорных систем, так как позволяет определить их обнаружительные и опознавательные возможности. Настоящая статья посвящена разработке методики расчета углового разрешения обзорной ИК-аппаратуры с учетом параметров отдельных ее компонентов.

Существует несколько подходов к определению углового разрешения, т. е. способности прибора отдельно различать два близлежащих точечных источника излучения одинаковой яркости. Предельное (минимальное) разрешение определяется угловыми размерами  $\alpha_D$  чувствительной площадки приемника излучения (ПИ) (рис. 1)

$$\delta\omega_{\min} = 2 \frac{V_D}{a'} = 2 \frac{V_D}{f_o'(1 - \beta)} = 2\alpha_D, \quad (1)$$

где  $V_D$  — линейный размер чувствительной площадки ПИ;  $a'$  — расстояние между задней главной

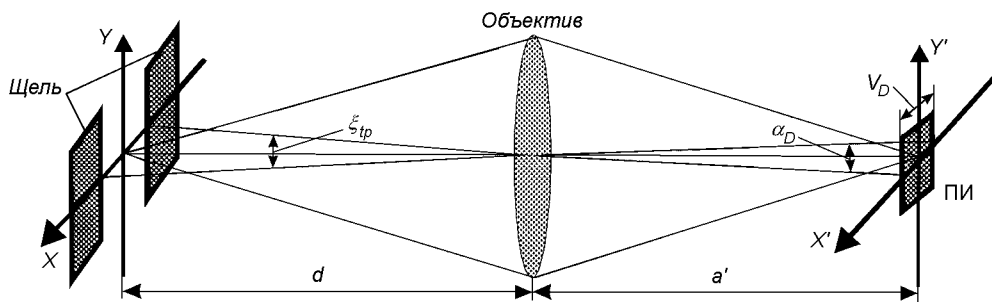


Рис. 1. «Щелевой» метод измерения углового разрешения обзорной ИК-системы

плоскостью оптической системы (ОС) и плоскостью ПИ;  $f_0'$  — фокусное расстояние ОС;  $\beta$  — линейное увеличение ОС.

Если ИК-система характеризуется модуляционной передаточной функцией (МПФ)  $M_s(\nu_x)$ , то аналогично критерию Шаде, применяемому в телевидении, можно определить угловое разрешение как (Колобродов, Шустер, 1994)

$$\delta\omega = 2 \left[ \int_{-\infty}^{\infty} |M_s(\nu_x)|^2 d\nu_x \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $\nu_x$  — угловая пространственная частота.

Однако это выражение не учитывает энергетическое (температурное) разрешение и шумы системы. Более универсальной характеристикой является минимальная разрешаемая разность температур MRTD, (Minimum Resolvable Temperature Difference) — это минимальная разница эффективных температур между штрихами тест-объекта с заданной пространственной частотой и фоном, которая позволяет визуально разделять на экране видеосмотрового устройства (ВСУ) штрихи объекта. Тест-объект представляет собою четырехштриховую миру, в которой полосы и промежутки имеют одинаковую ширину  $\xi_{ip}$ , а их высота равна  $7\xi_{ip}$ . По виду функции  $MRTD(\nu_x)$ , типичный график которой представлен на рис. 2, можно определить разрешаемую пространственную частоту  $\nu_{xr}$  при заданном температурном контрасте  $\Delta T = MRTD(\nu_{xr})$ . При этом угловое разрешение определяется как  $\delta\omega = 1/\nu_{xr}$ . Проблемы применения  $MRTD(\nu_x)$  связаны с экспериментальными трудностями измерения этой функции и неопределенностью частоты  $\nu_{xr}$ .

При аттестации ИК-систем часто используют «щелевой» метод измерения углового разрешения (Колобродов, Шустер, 1994). Сущность этого метода состоит в следующем. Тест-объект в виде прямоугольной щели располагается в фокальной плоскости коллиматора. Имитатор АЧТ и поверхность щели имеют одинаковую спектральную энергетическую светимость и позволяют регулировать и обеспечивать постоянство разности температур. Обычно температура имитатора и щели измеряются термомпарами, находящимися в контакте с поверхностями. Разность температур между краями щели и черным телом выбирается такой, чтобы ИК-система давала ненасыщенное изображение для этих двух температур. Необходимо также убедиться, что система работает на линейном участке передаточной характеристики.

При широкой щели видеосигнал строки имеет плоский участок и, если система является линей-

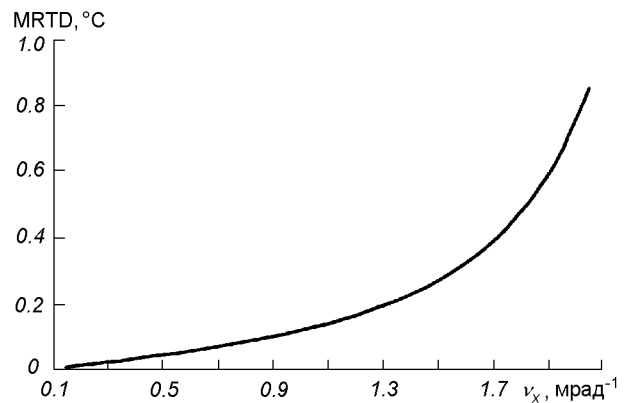


Рис. 2. Минимальная разрешаемая разность температур тепловизора

ной, уровень этого участка можно поднять, повышая температуру черного тела. Затем щель постепенно сужают до тех пор, пока сигнал не утратит горизонтального участка. Угловая ширина щели  $\xi_{ip1.0}$  соответствует при этом разрешению системы при 100 %-й модуляции. Когда при дальнейшем сужении щели сигнал становится равным половине первоначального, угловая ширина щели  $\xi_{ip0.5}$  будет соответствовать разрешению при 50 %-й модуляции. На практике не так важно, какой процент модуляции будет выбран в качестве определяющего углового разрешения. Важно лишь, чтобы сравнение нескольких систем проводилось при одинаковых условиях.

Разработчикам ИК-систем важно оценить влияние параметров ОС и ПИ на угловое разрешение, которое измеряется «щелевым» методом.

Пусть температурный контраст в пределах щели является достаточно высоким, что позволяет не учитывать шумовые свойства системы. Для небольших полей зрения будем считать рассматриваемую ИК-систему инвариантной и линейной, которая описывается МПФ  $M_s(\nu_x)$ . МПФ системы вдоль направления сканирования  $x$  можно представить в виде произведения МПФ объектива  $M_o(\nu_x)$ , ПИ  $M_D(\nu_x)$ , электронного тракта  $M_{el}(\nu_x)$  и ВСУ  $M_s(\nu_x)$  (Мирошников, 1983):

$$M_s(\nu_x) = M_o(\nu_x) M_D(\nu_x) M_{el}(\nu_x) M_s(\nu_x). \quad (3)$$

При использовании высококачественных ВСУ и электронного тракта с достаточно широкой полосой пропускания, которые не искажают видеосигнал, можно полагать, что  $M_{el}(\nu_x) \approx 1$  и  $M_s(\nu_x) \approx 1$ . Поэтому будем рассматривать полезный видеосигнал на выходе ПИ, который при линейной равно-

мерной развертке изображения равен (Мирошников, 1983)

$$u(t) = A \int_{-\infty}^{\infty} h_s(\xi - vt) l_e(\xi) d\xi. \quad (4)$$

Здесь  $A$  — постоянный множитель, учитывающий энергетические потери при распространении излучения от тест-объекта до ПИ и чувствительность ПИ;  $h_s$  — функция рассеяния линии (ФРЛ) ИК-системы;  $v$  — скорость сканирования;  $l_e$  — яркость тест-объекта относительно фона.

Запишем соотношение (4) в области пространственных частот

$$U(f) = A' H_s(v_x) L_e(v_x), \quad (5)$$

где  $U$  — спектр видеосигнала;  $H_s$  — передаточная функция ИК-системы, МПФ которой определяется выражением (4);  $L_e$  — пространственный спектр тест-объекта.

При линейном сканировании связь между временной и пространственной частотами  $f$  и  $v_x$  определяется соотношением (Колобродов, Шустер, 1994).

$$f = \frac{1000}{t_0} \frac{V_D}{a'} v_x = \frac{\alpha_D}{t_0} v_x, \quad (6)$$

где  $\alpha_D$ , мрад — угловой размер чувствительной площадки ПИ;  $t_0$ , с — время разложения одного элемента термографического изображения.

Определим аналитический вид функции  $H_s(v_x)$ , полагая, что фазовые искажения в ИК-системе отсутствуют, т. е.

$$H_s(v_x) = M_o(v_x) M_D(v_x). \quad (7)$$

Для аппроксимации МПФ объектива выберем наиболее часто используемую гауссовую функцию (Мирошников, 1983)

$$M_o(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2), \quad (8)$$

где  $r_o$  — радиус кружка рассеяния на уровне 0.606 от максимального значения ФРЛ.

В большинстве космических ИК-систем используются фотонные ПИ с прямоугольной чувствительной площадкой размером  $V_D \times W_D$ . Для таких ПИ их МПФ аппроксимируется функцией (Колобродов, 1994).

$$\begin{aligned} M_D(v_x) &= M_{Ds}(v_x) M_{Dt}(f) = \\ &= \frac{\sin(\pi V_D v_x')}{\pi V_D v_x'} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi t_D f)^2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $v_x'$  — пространственная частота в плоскости ПИ;  $t_D$  — постоянная времени ПИ;  $f$  — временная частота.

Пространственные частоты  $v_x'$  и  $v_x$  связаны между собой соотношением

$$v_x' = v_x \frac{1000}{f_o'}, \quad (10)$$

где  $f_o'$ , мм — фокусное расстояние объектива.

Тогда МПФ ИК-системы (7) с учетом (6), (8) — (10) запишется в виде

$$\begin{aligned} M_s(v_x) &= \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2) \times \\ &\times \frac{\sin(\pi V_D v_x')}{\pi V_D v_x'} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{t_D}{t_0} \alpha_D v_x\right)^2}}. \end{aligned} \quad (11)$$

С целью упрощения математических преобразований аппроксимируем функцию (9) гауссовыми функциями вида

$$\begin{aligned} M_{Ds}^{ap}(v_x) &= \exp(-2\pi^2 r_{Ds}^2 v_x^2), \\ M_{Dt}^{ap}(v_x) &= \exp(-2\pi^2 r_{Dt}^2 v_x^2), \end{aligned} \quad (12)$$

исходя из равенства интегралов

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} |M_{Ds}(v_x)|^2 dv_x &= \int_0^{\infty} |M_{Ds}^{ap}(v_x)|^2 dv_x; \\ \int_0^{\infty} |M_{Dt}(v_x)|^2 dv_x &= \int_0^{\infty} |M_{Dt}^{ap}(v_x)|^2 dv_x. \end{aligned} \quad (13)$$

Решение этих уравнений дает следующий результат:

$$\begin{aligned} r_{Ds} &= 0.28 \alpha_D, \text{ мрад;} \\ r_{Dt} &= 0.564 \frac{t_D}{t_0} \alpha_D, \text{ мрад.} \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом (12) и (14) функция (11) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} M_T(v_x) &= \exp\left\{-2\pi^2 \left[r_o^2 + 0.0784 \alpha_D^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + 0.3181 \left(\frac{t_D}{t_0}\right)^2 \alpha_D^2\right] v_x^2\right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Теоретические исследования и экспериментальные измерения показывают, что МПФ обзорных ИК-систем можно аппроксимировать гауссовой функцией (Мирошников, 1983)

$$M_s(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_x^2), \quad (16)$$

где  $r_s$ , мрад — радиус кружка рассеяния ФРЛ. Из сравнения (15) и (16) находим, что

$$r_s = \sqrt{r_o^2 + [0.0784 + 0.3181(t_D/t_0)^2] \alpha_D^2}. \quad (17)$$

Пространственный спектр яркости тест-объекта определим с помощью преобразования Фурье

$$L_e(\nu_x) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} l_e(\xi) \exp(-j 2\pi \nu_x \xi) d\xi, \quad (18)$$

где  $\xi$  — угловая координата в пространстве объектов (рис. 1). Пусть щелевой тест-объект имеет угловые размеры  $\xi_{ip}$ . Тогда

$$l_e(x) = \begin{cases} l_{eo}, & -0.5x_{ip} \leq x \leq 0.5x_{ip}; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (19)$$

Подставив (19) в (18), после вычислений с учетом (12) и (14) будем иметь

$$\begin{aligned} L_e(\nu_x) &= \xi_{ip} l_{eo} \frac{\sin(\pi \xi_{ip} \nu_x)}{\pi \xi_{ip} \nu_x} \approx \\ &\approx \xi_{ip} l_{eo} \exp[-2\pi^2 (0.28)^2 \xi_{ip}^2 \nu_x^2]. \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда спектр видеосигнала (5) с учетом (16) и (20) составляет

$$U(f) = A' \xi_{ip} l_{eo} \exp[-2\pi^2 (r_s^2 + 0.0784 \xi_{ip}^2) \nu_x^2]. \quad (21)$$

Видеосигнал во временной области найдем обратным преобразованием Фурье спектра (21)

$$\begin{aligned} u(t) &= A' \xi_{ip} l_{eo} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2\pi^2 (r_s^2 + 0.0784 \xi_{ip}^2) \nu_x^2] \times \\ &\times \exp(j 2\pi \xi \nu_x) d\nu_x, \end{aligned} \quad (22)$$

где временная  $t$  и угловая  $\xi$  координаты связаны между собой соотношением

$$t = \frac{t_0}{\alpha_D} \xi, \quad (23)$$

которое вытекает из (6).

Для вычисления интеграла (22) воспользуемся табличным интегралом (Двайт, 1973)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-px^2 - qx) dx = \sqrt{\pi/p} \exp\left(\frac{q^2}{4p}\right), \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} p &= 2\pi^2 (r_s^2 + 0.0784 \xi_{ip}^2); \\ q &= -j 2\pi \xi; \\ x &= \nu_x. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} u(t) &= A' \frac{\xi_{ip} l_{eo}}{\sqrt{2\pi^2 (r_s^2 + 0.0784 \xi_{ip}^2)}} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{\alpha_D^2 t^2}{2t_0^2 (r_s^2 + 0.0784 \xi_{ip}^2)}\right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Будем рассматривать максимальное значение сигнала при  $t = 0$ . Амплитуда сигнала (25) будет максимальной, когда ширина щели намного больше разрешения ИК-системы, т. е. когда  $\xi_{ip} \gg r_s$ . При этом  $u_m = 1.42 A' l_{eo}$ . В соответствии со «щелевым» методом измерения углового разрешения будем уменьшать ширину щели  $\xi_{ip}$  до тех пор, пока амплитуда сигнала (25) не уменьшится в  $k$  раз, что соответствует угловому разрешению при  $1/k$ -процентной модуляции.

$$\frac{u_m}{u(\xi_{ip} = \delta\omega_{1/k})} = 3.56 \sqrt{\left(\frac{r_s}{\delta\omega_{1/k}}\right)^2 + 0.0784} = k.$$

Откуда

$$\delta\omega_{1/k} = 3.56 \frac{r_s}{\sqrt{k^2 - 1}}, \quad (26)$$

где  $k > 1$ .

С учетом (17) получим общую формулу для расчета углового разрешения обзорной ИК-системы:

$$\begin{aligned} \delta\omega_{1/k} &= 3.56 \times \\ &\times \sqrt{\frac{1}{k^2 - 1} \left\{ r_o^2 + \left[ 0.0784 + 0.3181 \left(\frac{t_D}{t_0}\right)^2 \right] \alpha_D^2 \right\}}. \end{aligned} \quad (27)$$

В качестве примера рассмотрим авиационный ИК-видеоспектрометр TIS (США), который устанавливается на самолете С-130. Согласно рекламной информации он имеет объектив с радиусом кружка рассеяния  $r_o = 1$  мрад, сканирующую систему и ПИ, для которых выполняется условие  $t_D/t_0 \ll 1$ , и угловой размер чувствительной площадки ПИ  $\alpha_D = 3.6$  мрад. После вычислений по формуле (27) имеем: при 50 %-й модуляции ( $k = 2$ )  $\delta\omega_{0.5} = 2.9$  мрад; при 10 %-й модуляции ( $k = 10$ )  $\delta\omega_{0.1} = 0.5$  мрад.

Представляет интерес определить глубину модуляции, соответствующую угловому разрешению по критерию Шаде (2). Для этого подставим (8) в (2):

$$\delta\omega_{Sh} = 2 \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-4\pi^2 r_s^2 \nu_x^2) d\nu_x \right]^{-1}.$$

Для вычисления интеграла в последнем выражении воспользуемся табличным интегралом (24), где  $p = 4\pi^2 r_s^2$ ,  $q = 0$ ,  $x = \nu_x$ . Тогда

$$\delta\omega_{Sh} = 4\sqrt{\pi} r_s. \quad (28)$$

Из сравнения (28) и (26) находим, что угловое разрешение, рассчитанное по критерию Шаде, соответствует угловому разрешению, измеренному

«щелевым» методом при 90 %-й модуляции ( $k = 1.1$ ).

Таким образом, представленная методика позволяет спроектировать обзорную ИК-систему, которая удовлетворяла бы заданным требованиям по разрешению, а также сравнить расчетные данные по угловому разрешению со стендовыми измерениями.

Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы: Пер. с англ. — М.: Наука, 1973.—228 с.

Колобродов В. Г., Шустер Н. Инфракрасная термография (физические основы, методы проектирования и контроля, применение). — Киев: М-во образования Украины, 1994.—426 с.

Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.—696 с.

Committee on Earth Observation Satellites: Coordination for the next decade (1995 CEOS yearbook). — Smith, England, 1995.— 136 p.

---

#### ABOUT SPATIAL RESOLUTION OF INFRARED SYSTEMS FOR EARTH OBSERVATIONS

V. G. Kolobrodov

The paper presents a method for calculating the spatial resolution of infrared systems used for Earth observations. The method is based on the «slit» method for the experimental measurement of spatial resolution. The formulas for calculating the angular resolution take into account the parameters of the objective, scanning system and detector. An example is given of the spatial resolution calculations.