

УДК [629.78:621.383]:574

## К выбору параметров оптико-электронной системы космического инфракрасного сканера

В. Г. Колобродов<sup>1</sup>, Н. Шустер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Київський політехнічний інститут», Київ

<sup>2</sup>Технічний університет м. Льменау, ФРН

Надійшла до редакції 20.01.98

Досліджено взаємозв'язок між просторовою роздільною здатністю ІЧ-сканера та параметрами об'єкта, скануючої системи та приймача випромінювання з метою узгодження цих параметрів для отримання бажаної роздільної здатності. Розглянуто приклад розрахунку оптико-електронної системи ІЧ-сканера.

Важное место в космических системах дистанционного зондирования Земли занимают ИК-сканеры, предназначенные для наблюдения и контроля за тепловыми полями земной поверхности путем преобразования их в видимый аналог. Космические ИК-сканеры работают, как правило, в окне прозрачности атмосферы 8—14 мкм, в котором происходит наиболее интенсивное излучение энергии от объектов, находящихся при атмосферной температуре.

ИК-сканер состоит из следующих основных частей: оптической системы, приемника излучения (ПИ), электронного тракта обработки видеосигналов [3, 4]. В свою очередь оптическая система состоит из ИК-объектива и сканирующей системы. Объектив предназначен для формирования изображения в плоскости ПИ с требуемым качеством и освещенностью. Сканирующая система превращает двумерное распределение освещенности изображения в одномерный, изменяющийся во времени лучистый поток, который воспринимает ПИ. Она строится в зависимости от типа ПИ (одноэлементный, линейка или матрица) и задач, которые решает ИК-сканер [2]. ПИ, являясь основным элементом ИК-сканера, превращает переменный лучистый поток в электрический видеосигнал. Элект-

ронный тракт служит для усиления достаточно слабого выходного сигнала ПИ, аналоговой и цифровой его обработки, отделения полезного сигнала от шума и представления его в форме, удобной для передачи со спутника на Землю.

Обобщенными характеристиками ИК-сканера являются модуляционная передаточная функция, функция передачи сигнала, эквивалентная шуму разность температур, минимальная разрешаемая разность температур (MRTD), минимальная обнаруживаемая разность температур [2, 3]. Большинство из этих характеристик зависят от эквивалентной полосы пропускания ИК-сканера, которая в области угловых пространственных частот определяется формулой [3]

$$\Delta\nu = \int_0^{\infty} |M_T(\nu_x)|^2 d\nu_x, \quad (1)$$

где  $M_T(\nu_x)$  — модуляционная передаточная функция (МПФ) ИК-сканера;  $\nu_x$  — угловая пространственная частота, связанная с пространством объекта. При этом угловое разрешение ИК-сканера [2]

$$\delta\omega = \frac{1}{2\Delta\nu}. \quad (2)$$

Понятие МПФ справедливо только в том случае,

если ИК-сканер представляет собой линейную инвариантную систему без учета шумовых свойств системы. В большинстве случаев считают, что для этого достаточно, чтобы отношение сигнал/шум (SNR) было больше 10 [3]. Поэтому формула (2) определяет разрешения при больших значениях SNR. ИК-сканер при малых температурных контрастах в пределах ограниченного поля зрения можно считать линейной инвариантной системой [3, 4]. В свою очередь SNR определяет энергетическое (температурное) разрешение. Связь между пространственным и температурным разрешениями определяет функция MRTD( $\nu_x$ ).

При проектировании ИК-сканеров возникает сложная проблема согласования параметров его отдельных элементов с целью получения необходимого разрешения при наименьших затратах. В настоящей статье исследуется влияние параметров объектива, сканирующей системы и ПИ на пространственное разрешение сканера с целью согласования этих параметров для получения требуемого пространственного разрешения.

МПФ характеризует поведение ИК-сканера в области пространственных частот и определяется остаточным контрастом изображения тепловой миры с периодической структурой и контрастом самой миры, равным единице. МПФ сканера определяется произведением МПФ его отдельных элементов: объектива, ПИ и электронного тракта. Для одномерного случая при сканировании вдоль оси  $x$

$$M_T(\nu_x) = M_O(\nu_x)M_{Ds}(\nu_x)M_{Dt}(f)M_E(f), \quad (3)$$

где  $M_O$  — МПФ объектива,  $M_{Ds}$  и  $M_{Dt}$  — пространственная и временная МПФ ПИ соответственно,  $M_E$  — МПФ электронного тракта.

Для аппроксимации МПФ объектива выберем наиболее используемую гауссову функцию [2, 4]

$$M_O(\nu_x) = \exp(-2\pi^2 r_0^2 \nu_x^2), \quad (4)$$

где  $r_0$  — радиус кружка рассеяния на уровне 0.606 от максимального значения функции рассеяния точки.

В большинстве ИК-сканеров используются фотонные ПИ с прямоугольной чувствительной площадкой размером  $V_D \times W_D$ . Для таких ПИ одномерная МПФ аппроксимируется функцией [2]:

$$M_{Ds}(\nu_x)M_{Dt}(f) = \frac{\sin(\pi V_D \nu'_x)}{\pi V_D \nu'_x} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi t_D f)^2}}, \quad (5)$$

где  $\nu'_x$  — пространственная частота в плоскости ПИ;  $t_D$  — постоянная времени ПИ;  $f$  — временная частота. Пространственные частоты  $\nu'_x$  и  $\nu_x$  связаны между собой соотношением

$$\nu'_x = \nu_x \frac{1000}{f_0}, \quad (6)$$

где  $f_0$  — фокусное расстояние объектива.

При линейном сканировании связь между временной  $f$  и пространственной  $\nu_x$  частотами определяется соотношением [2]

$$f = \frac{1000}{t_0} \frac{V_D}{f_0} \nu_x = \frac{\alpha_D}{t_0} \nu_x, \quad (7)$$

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

При проектировании электронного тракта его полосу пропускания согласовывают со спектром видеосигнала, который определяется временем разложения одного элемента  $t_0$ . МПФ такого тракта определяется функцией [3]

$$M_E(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2t_0 f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\alpha_D \nu_x)^2}}. \quad (8)$$

Тогда МПФ (3) ИК-сканера с учетом (4), (5) и (8) запишется в виде

$$M_T(\nu_x) = \exp(-2\pi^2 r_0^2 \nu_x^2) \frac{\sin(\pi \alpha_D \nu_x)}{\pi \alpha_D \nu_x} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{t_D}{t_0} \alpha_D \nu_x\right)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\alpha_D \nu_x)^2}}. \quad (9)$$

Для упрощения аппроксимируем функции (5) и (8) гауссовыми функциями вида

$$\begin{aligned} M_{Ds}^{ap}(\nu_x) &= \exp(-2\pi^2 r_{Ds}^2 \nu_x^2), \\ M_{Dt}^{ap}(\nu_x) &= \exp(-2\pi^2 r_{Dt}^2 \nu_x^2), \\ M_E^{ap}(\nu_x) &= \exp(-2\pi^2 r_E^2 \nu_x^2), \end{aligned} \quad (10)$$

исходя из равенства интегралов, аналогичных (1), т. е.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty |M_{Ds}(\nu_x)|^2 d\nu_x &= \int_0^\infty |M_{Ds}^{ap}(\nu_x)|^2 d\nu_x, \\ \int_0^\infty |M_{Dt}(\nu_x)|^2 d\nu_x &= \int_0^\infty |M_{Dt}^{ap}(\nu_x)|^2 d\nu_x, \\ \int_0^\infty |M_E(\nu_x)|^2 d\nu_x &= \int_0^\infty |M_E^{ap}(\nu_x)|^2 d\nu_x. \end{aligned} \quad (11)$$

Такая аппроксимация аналогична определению эффективной шумовой полосы оптико-электронного прибора или критерию Шаде, принятому в телевидении для определения пространственного разрешения [2, 3].

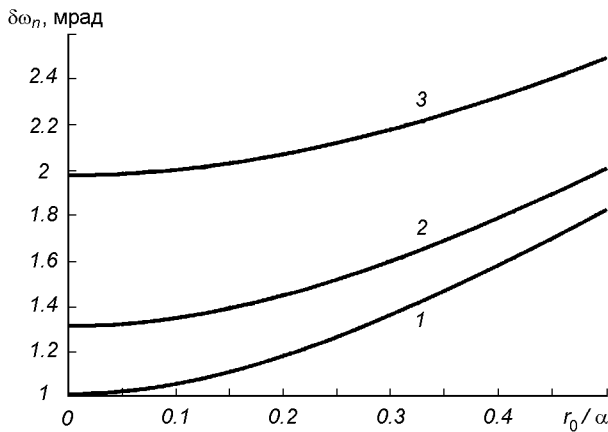


Рис. 1. Нормированная однопараметрическая эквивалентная полоса пропускания ИК-сканера: 1 —  $t_D/t_0 = 0.1$ ; 2 —  $t_D/t_0 = 0.5$ ; 3 —  $t_D/t_0 = 1.0$

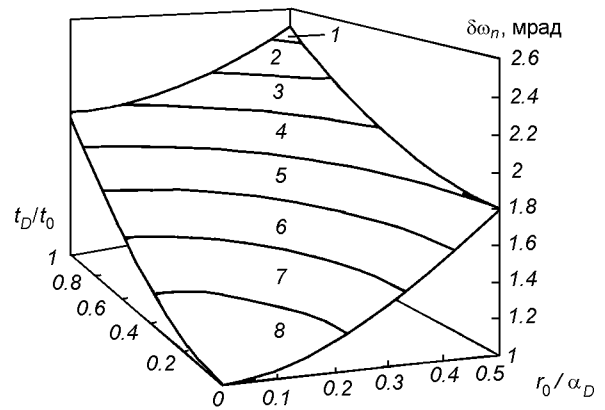


Рис. 2. Нормированная двухпараметрическая эквивалентная полоса пропускания ИК-сканера: 1 — 2.4—2.6; 2 — 2.2—2.4; 3 — 2—2.2; 4 — 1.8—2; 5 — 1.6—1.8; 6 — 1.4—1.6; 7 — 1.2—1.4; 8 — 1—1.2

Эти уравнения имеют следующее решение:

$$r_{Ds} = 0.28\alpha_D, r_{Dt} = 0.564 \frac{t_D}{t_0} \alpha_D, r_E = 0.18\alpha_D. \quad (12)$$

С учетом (10) и (12) функция (9) преобразуется к виду

$$M_T(v_x) = \exp\left\{-2\pi^2\left[r_0^2 + 0.1108\alpha_D^2 + 0.3181\left(\frac{t_D}{t_0}\right)^2\alpha_D^2\right]v_x^2\right\}. \quad (13)$$

Теоретические исследования и экспериментальные измерения показывают, что МПФ ИК-сканера можно аппроксимировать гауссовой функцией [3]

$$M_T(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_T^2 v_x^2), \quad (14)$$

где  $r_T$  — радиус кружка функции рассеяния точки. Из сравнения (13) и (14) находим, что

$$r_T = \sqrt{r_0^2 + \left[0.1108 + 0.3181\left(\frac{t_D}{t_0}\right)^2\right]\alpha_D^2}. \quad (15)$$

Определим теперь эквивалентную полосу пропускания сканера согласно (1):

$$\Delta\nu = \int_0^\infty \exp(-4\pi^2 r_T^2 v_x^2) dv_x = \frac{1}{4\sqrt{\pi} r_T} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}\left[r_0^2 + [0.1108 + 0.3181(t_D/t_0)^2]\alpha_D^2\right]}. \quad (16)$$

Тогда угловое разрешение (2) определяется функцией

$$\delta\omega = 2\sqrt{\pi}\left[r_0^2 + [0.1108 + 0.3181(t_D/t_0)^2]\alpha_D^2\right]. \quad (17)$$

Проанализируем полученное выражение. Для этого определим вначале угловое разрешение, когда в сканере используются «идеальные» объектив с  $r_0 \rightarrow 0$  и ПИ с  $t_D \rightarrow 0$ . Тогда

$$\delta\omega_{\min} = 2\sqrt{\pi}0.1108\alpha_D^2 = 1.18\alpha_D.$$

Если при этом не учитывать также влияние сканирующей системы и конечную полосу пропускания электронного тракта, то минимальное разрешение или мгновенное поле зрения равно  $\delta\omega_0 = \alpha_D$  [2]. Этот очевидный результат можно получить из (17), если считать  $M_E(v_x) = 1$  в (3).

Нормированное угловое разрешение определяется выражением

$$\delta\omega_n = \frac{\delta\omega}{\delta\omega_{\min}} = \sqrt{9\left(\frac{r_0}{\alpha_D}\right)^2 + 2.9\left(\frac{t_D}{t_0}\right)^2 + 1}. \quad (18)$$

На рис. 1 представлена однопараметрическая полоса пропускания, а на рис. 2 — двухпараметрическая. Из анализа функции (18) следует, что

1. Если объектив и ПИ одинаково влияют на его МПФ, или одинаково ухудшают разрешающую способность сканера, то, как следует из (12),

$$r_0 = r_{Ds} = 0.28\alpha_D; \quad (19)$$

$$r_0 = r_{Dt} = 0.564 \frac{t_D}{t_0} \alpha_D = 0.28\alpha_D.$$

Отсюда  $r_0/\alpha_D = 0.28$ ;  $t_D/t_0 = 0.5$ ; тогда угловое разрешение  $\delta\omega_n^* = 1.56$ , т. е. угловое разрешение более чем в 1.5 раза хуже «идеального».

2. Разрешение  $\delta\omega_n^*$  можно получить, если использовать «идеальный» ПИ ( $t_D = 0$ ) и объектив худшего качества с радиусом кружка рассеяния  $r_0 = 0.4\alpha_D$ , или «идеальный» объектив ( $r_0 = 0$ ) и более инерционный ПИ с постоянной времени  $t_D = 0.7t_0$ .

3. Увеличение радиуса кружка рассеяния объектива  $r_0$  и постоянной времени ПИ  $t_D$  приводит к ухудшению разрешения сканера. Требуемое разрешение  $\delta\omega_n$  можно достичь за счет соответствующего выбора нормированных параметров  $r_0/\alpha_D$  и  $t_D/t_0$ , как показано на рис. 2.

4. Для практических целей рекомендуются следующие соотношения между параметрами:  $r_0 \leq 0.3\alpha_D$  и  $t_0 \geq 2t_D$ . При этом необходимо учитывать сложность, вес, габариты и стоимость объектива, сканирующей системы и ПИ.

5. Инерционность ПИ можно не учитывать, если  $t_0 > 5t_D$ .

В качестве примера рассмотрим методику расчета основных параметров объектива, сканирующей системы и ПИ ИК-сканера, установленного на спутнике с высотой полета  $h_f = 800$  км, который должен обеспечить пространственное разрешение  $\delta V = 100$  м на поверхности Земли с полосой обзора  $V = 200$  км. Аналогом такого сканера являются зарубежные приборы ASTER ( $\delta V = 90$  м,  $V = 106$  км), LANDSAT 7 ( $\delta V = 60$  м,  $V = 160$  км), TM ( $\delta V = 120$  м,  $V = 185$  км).

Для обеспечения такой полосы обзора в качестве ПИ выберем КРТ-линейку фирмы SAT, которая имеет: количество элементов  $N_D = 32$ ; размер чувствительной площадки  $V_D \times W_D = 50 \times 50$  мкм<sup>2</sup>, постоянная времени  $t_D = 1$  мкс. Формировать полосу обзора будем параллельным методом сканирования [2], как показано на рис. 3.

Порядок расчета следующий.

1. Определяем в первом приближении фокусное расстояние объектива по формуле [1]:

$$f_{01} = h_f \frac{V_D}{\delta V} = 8 \cdot 10^8 \frac{5 \cdot 10^{-2}}{10^5} = 400 \text{ мм.} \quad (20)$$

При этом угловой размер чувствительной площадки ПИ

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f_{01}} = 0.125 \text{ мрад.} \quad (21)$$

2. Время формирования одного элемента разложения термографического изображения  $t_0$  определяем в такой последовательности:

— время формирования одной строки изображения  $t_1$  находим из условия, что оно должно равняться времени смещения изображения поверхности Земли на расстояние, равное длине линейки, т. е.  $l_D = v'_f t_1$ , где  $v'_f$  — скорость перемещения изображе-

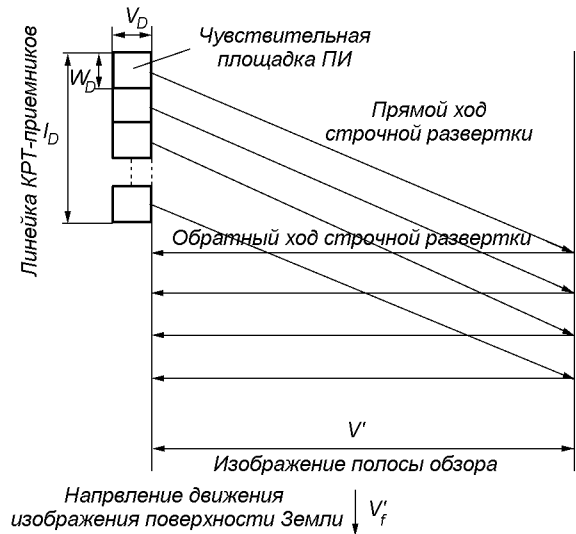


Рис. 3. Метод параллельного сканирования линейкой КРТ-приемников излучения

ния в плоскости ПИ. Тогда

$$t_1 = \frac{l_D}{v'_f} = \frac{N_D W_D h_f}{v_f f_{01}},$$

где  $v_f = 7.9$  км/с — первая космическая скорость у поверхности Земли;

— число активных элементов разложения в строке

$$N_{\text{за}} = \frac{V'}{V_D} = \frac{V f_{01}}{V_D h_f},$$

где  $V'$  — размер полосы обзора в плоскости ПИ (рис. 3);

— время формирования одного элемента

$$t_0 = \frac{t_1 \eta_s}{N_{\text{за}}} = \frac{N_D V_D W_D h_f^2 \eta_s}{v_f f_{01}^2 V}, \quad (22)$$

где  $\eta_s = 0.8$  — эффективность сканирования. После подстановки исходных данных имеем  $t_0 = 162$  мкс. При этом частота сканирования

$$f_s = \frac{1}{t_1} = \frac{v_f f_{01}}{N_D W_D h_f} = 2.47 \text{ Гц.} \quad (23)$$

3. Определяем радиус кружка рассеяния объектива  $r_0$ , исходя из условия (19), когда объектив и ПИ одинаково ухудшают разрешающую способность сканера. При этом  $r_0 = 0.28\alpha_D = 0.035$  мрад, что соответствует разрешающей способности объектива [2]

$$v_{\text{res}} = \frac{1000}{2\pi r_0 f_{01}} \approx 12 \text{ мм}^{-1}. \quad (24)$$

4. Согласно формуле (18) угловое разрешение  $\delta\omega = 0.19$  мрад. При этом линейное разрешение на поверхности Земли в первом приближении равняется  $\delta V_1 = h_r \delta\omega = 152$  м.

5. Уточняем во втором приближении фокусное расстояние объектива, которое обеспечивало бы заданное пространственное разрешение  $\delta V = 100$  м:

$$f_{02} = f_{01} \frac{\delta V_1}{\delta V} = 608 \text{ мм.} \quad (25)$$

6. Повторяем расчеты по пунктам 1—4:

$$\alpha_D = \frac{0.05}{608} = 0.082 \text{ мрад;}$$

$$t_0 = 162 \left( \frac{1}{1.52} \right)^2 = 70 \text{ мс;}$$

$$f_s = 3.85 \text{ Гц; } r_0 = 0.023 \text{ мрад;}$$

$$\nu_{\text{res}} = 11.4 \text{ мм}^{-1};$$

$$\delta\omega = 0.125 \text{ мрад;}$$

$$\delta V_2 = 100 \text{ м.}$$

Из полученных результатов следует, что объектив с фокусным расстоянием  $f_0 = 608$  мм и разрешением  $\nu_{\text{res}} = 11.4 \text{ мм}^{-1}$  ( $r_0 = 0.023$  мрад) обеспечивает разрешение  $\delta V_2 = 100$  м на поверхности Земли.

Таким образом, предложенная методика позволяет рационально подойти к выбору параметров объектива, сканирующей системы и ПИ, что может значительно уменьшить стоимость ИК-сканера при сохранении основных его обобщенных характеристик.

1. Колобродов В. Г. Проектирование оптической системы ПЗС-камеры космического базирования // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 3/4.—С. 82—87.
2. Колобродов В. Г., Шустер Н. Инфракрасная термография (физические основы, методы проектирования и контроля, применение). — Киев: ВИПОЛ, 1994.—426 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.—414 с.
4. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.—696 с.

---

#### CHOOSING THE PARAMETERS OF OPTICAL ELECTRONICS SYSTEM FOR AN INFRARED SCANNER

V. G. Kolobrodov and N. Schuster

We investigate the relationship between the spatial resolution of an IR scanner and the parameters of the objective, scanning system and detector. The aim of the investigation is to bring the parameters into agreement for obtaining necessary resolution. We give also an example of the calculation of optical electronics system for an IR scanner.