

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ РАЗРЕШАЕМОЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОВИЗИОННОГО КАНАЛА

© 2007 г. М. М. Трестман, канд. техн. наук; Н. М. Камашева

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Предлагается алгоритм оценки погрешности измерения минимальной разрешаемой разности радиационных температур тепловизионного канала, обусловленной конечностью пространственного разрешения коллиматора, формирующего изображение миры. Рассмотрен пример.

Коды OCIS: 120.0120, 120.3940.

Поступила в редакцию 14.11.2006.

Сложившееся представление о соотношении пространственных разрешений коллиматора, формирующего изображение миры, и аттестуемого тепловизионного канала (ТВК) формулируется следующим образом: “Изображение коллимированных тест-объектов практически не искажается, если это соотношение не менее чем 1:5” [1]. Для ТВК с нормированными требованиями к минимальной разрешаемой разности температур (МРРТ) такой “качественный” критерий неприемлем.

Пространственное разрешение коллиматора (δ_k), влияющее на точность измерения МРРТ, определяется геометрической составляющей оптической передаточной функции коллиматора в поле зрения аттестуемого ТВК [1]. Оно может быть определено по измеренной функции рассеяния линии (ФРЛ) коллиматора, в частности, по ее образу Фурье – по модулю передаточной функции (МПФ). Так, из МПФ коллиматора “исключают” МПФ дифракционной составляющей аберрации, а δ_k вычисляют по МПФ геометрической составляющей аберрации как эквивалентное разрешение по Шаде [2]:

$$\delta_k = \left[2 \int_0^\infty \text{МПФ}_k^2(\omega) d\omega \right]^{-1}, \quad (1)$$

где ω – пространственная частота, $\text{МПФ}_k(\omega)$ – МПФ геометрической составляющей аберрации коллиматора.

Пространственное эквивалентное разрешение аттестуемого ТВК (δ_t) может быть определено по измеренной ФРЛ ТВК и ее образу Фурье с помощью уравнения (1) для МПФ тепловизионного канала – $\text{МПФ}_t(\omega)$. Пространственное разрешение системы ТВК–коллиматор (δ_Σ) может быть определено по модели сложения двух эквивалентных разрешений [3] как

$$\delta_\Sigma^2 = \delta_t^2 + \delta_k^2, \quad (2)$$

а в качестве варианта, аппроксимируя каждую из $\text{МПФ}_{t,k}(\omega)$ функциями вида $\text{sinc}(\delta_t \omega)$, $\text{sinc}(\delta_k \omega)$, где по определению $\text{sinc}(\gamma) = \sin(\pi\gamma)/(\pi\gamma)$, как [4]

$$\delta_\Sigma^2 = 3\delta_t^2 (3\delta_t - \delta_k). \quad (3)$$

Относительная погрешность измерения МРРТ(ω) определяется как

$$\Delta \text{МРРТ}(\omega) = \frac{\text{МРРТ}_\Sigma(\omega) - \text{МРРТ}_t(\omega)}{\text{МРРТ}_t(\omega)}, \quad (4)$$

где $\text{МРРТ}_\Sigma(\omega)$ – измеренное (либо рассчитанное) значение МРРТ(ω) для известных (заданных) δ_t , δ_k ; $\text{МРРТ}_t(\omega)$ – измеренное (либо рассчитанное) значение МРРТ(ω) для $\delta_k \rightarrow 0$.

Зависимость $\Delta \text{МРРТ}(\omega)$ от отношения $\kappa = \delta_t/\delta_k$ установлена моделированием значений $\text{МРРТ}_{t,\Sigma}(\omega)$ ТВК второго поколения с фотоприемным устройством формата 4×288 фирмы “Sofradir” (Франция). Разность температур, эквивалентная шуму (РТЭШ), ТВК принята равной 100 мК, номинальный размер элементарного поля зрения по строке $\alpha = 0,123$ мрад. В модель МПФ оптической системы ТВК введен компонент, адекватный МПФ $_k(\omega)$, аппроксимированному гауссоидой со среднеквадратическим отклонением σ_k . Его значение и эквивалентное разрешение δ_k связаны соотношением $\delta_k = \sigma_k/0,282$ [2]. Значения σ_k варьировались так, чтобы $\delta_t/\delta_k = \kappa$.

Значения $\text{МПФ}_{t,\Sigma}(\omega)$, $\text{МРРТ}_{t,\Sigma}(\omega)$ вычислены по модели функционирования ТВК NVTherm-2002. Эта модель аккумулирует опыт использования предшествующих моделей функционирования ТВК (NVL-1975, FLIR-92) для прогноза характеристик ТВК [3]. Моделируемые значения МРРТ(ω) согласуются с экспериментально полученными значениями.

В таблице приведены значения $\Delta \text{МРРТ}(\omega)$ для частоты Найквиста ($\alpha\omega = 0,5$) и для частоты $\alpha\omega = 0,7$ при различных значениях параметра κ . Значения $\delta_{t,\Sigma}$ вычислены по уравнению (1). Параметр δ_t/α – характерные значения соотношения между эквивалентным разрешением ТВК и элементарным полем зрения.

Анализ зависимости $\Delta \text{МРРТ}(\omega)$ от значений δ_t и κ позволяет установить, что она может быть описана уравнением

Значения относительной (выраженной в процентах) погрешности измерения МРРТ(ω), вычисленные для двух относительных частот миры ($\alpha\omega = 0,5$ и $0,7$) для различных значений δ_r/α и $\kappa = \delta_r/\delta_k$

$\kappa = \delta_r/\delta_k$	$\delta_r, [\delta_r/\alpha]$							
	0,264, [2,14]		0,320, [2,60]		0,370, [3,00]		0,400, [3,23]	
	$\alpha\omega = 0,5$	$\alpha\omega = 0,7$	$\alpha\omega = 0,5$	$\alpha\omega = 0,7$	$\alpha\omega = 0,5$	$\alpha\omega = 0,7$	$\alpha\omega = 0,5$	$\alpha\omega = 0,7$
2	57,0 (69)*	—	93,4 (129)	—	—	—	—	—
3	22,2 (24,5)	48,2 (56,8)	34,0 (39,2)	77,7 (102)	48,4 (57)	—	57,7 (70,3)	—
4	11,9 (12,8)	20,5 (27,4)	18,8 (19,7)	40,2 (44,4)	24,8 (27,5)	54,1 (65,4)	29,2 (32,9)	65,1 (81,4)
5	7,5 (8)	15,2 (16,4)	11,1 (12)	23,0 (25,6)	15,3 (16,5)	31,9 (36,2)	18,0 (19,5)	37,8 (43,6)
7	3,7 (3,9)	7,4 (8,0)	5,6 (5,9)	11,4 (12,0)	7,5 (8,0)	15,2 (16,5)	8,7 (9,3)	17,8 (19,5)
10	1,8 (1,9)	3,6 (3,8)	2,6 (2,8)	5,3 (5,6)	3,6 (3,8)	7,2 (7,6)	4,2 (4,4)	8,4 (9)

* В скобках приведены значения $\Delta\text{МРРТ}(\alpha\omega)$ для $\text{МПФ}_\kappa(\omega) = \text{sinc}(\delta_k\omega)$. Пропуски – значения погрешностей более 100%.

$$\Delta\text{МРРТ}(\alpha\omega) = \text{МПФ}_\kappa^{-1}(\alpha\omega) - 1. \quad (5)$$

Так, для гауссоидального $\text{МПФ}_\kappa(\omega)$ относительная погрешность измерения МРРТ(ω) может быть вычислена как

$$\Delta\text{МРРТ}(\alpha\omega) = \exp[0,159\pi^2(\alpha\omega)^2\delta_r^2/(\kappa\alpha)^2] - 1. \quad (6)$$

Для $\text{МПФ}_\kappa(\omega)$, аппроксимированного функцией $\text{sinc}(\delta_k\omega)$, относительная погрешность измерения МРРТ(ω) может быть вычислена как

$$\Delta\text{МРРТ}(\alpha\omega) = \frac{\pi(\alpha\omega)\delta_r/(\kappa\alpha)}{\sin[\pi(\alpha\omega)\delta_r/(\kappa\alpha)]} - 1. \quad (7)$$

Как следует из таблицы и уравнения (5), сложившемуся представлению о соотношении пространственных разрешений коллиматора и аттестуемого ТВК 1:5 (параметр $\kappa = 5$) соответствует погрешность измерения МРРТ на частоте Найквиста от 11 до 18% (для δ_r/α от 2,6 до 3,23), а на частоте, близкой к частоте предельно разрешаемой миры ($\alpha\omega = 0,7$), – от 23 до 38%. Увеличение соотношения пространственных разрешений до 1:10 (параметр $\kappa = 10$) уменьшает погрешность измерения МРРТ ориентировочно в 4 раза.

Пример оценки погрешности измерения МРРТ(ω) ТВК третьего поколения с использованием лабораторного коллиматора серии LC фирмы Electro Optical Industries, Inc. (Санта Барбара, США)

Некоторые характеристики аттестуемого ТВК “Night Conqueror-640” фирмы CMC Electronics (США) [5]:

– тип приемника излучения – матричный на основе InSb

рабочий спектральный диапазон, мкм – 3,5–5,0,
формат, пиксел – 640×512 ,
шаг, мкм – 28;

– объектив

относительное отверстие – 1:4,
поле зрения, град – $2,2 \times 1,6$;

– РТЭШ, мК – 16,

– элементарное поле зрения, мрад – 0,059,

– МРРТ на частоте Найквиста, мК – 40.

Зависимость МРРТ(ω) может быть представлена в виде [6]:

$$\text{МРРТ}(\omega) = \text{РТЭШ} m \exp(\mu b \omega), \quad (8)$$

где b – эффективный размер разложения изображения, равный $\sqrt[4]{2}\alpha = 0,07$ мрад; $m = 0,125$, $\mu = 6$ – параметры аппроксимации МРРТ(ω) экспоненциальной зависимостью; МРРТ($b\omega = 0,7$) составляет 133 мК. Интервал пространственных частот ограничен частотой $1/b = 14$ мрад⁻¹. Эквивалентное разрешение ТВК $\delta_r = 3b = 0,21$ мрад.

Лабораторный внеосевой отражательный коллиматор LC-14 со световым диаметром 355,6 мм, относительным отверстием 1:5 оснащен четырехштриховыми мирами, в том числе с периодами 0,085, 0,100, 0,125, 0,1667 мрад (частоты от 6 до 11,8 мрад⁻¹). Этот набор мир охватывает диапазон относительных частот МРРТ ТВК от 0,42 до 0,83. Стабильность поддержания разности радиационных температур между мирой и фоном $\pm 0,01$ °С. Геометрическое разрешение коллиматора на оси 0,05 мрад, в поле зрения до 2 мрад – 0,10 мрад, в поле зрения до 5 мрад – 0,5 мрад [7]. Гауссову рас-

пределению энергии в кружке рассеяния диаметром d соответствует следующее соотношение: 85% энергии, заключенной в кружке диаметром d , адекватно $\sigma = 0,255d$, где σ – параметр гауссова распределения [2]. Пространственное разрешение коллиматора на его оси $\delta_k = \sigma/0,282 = 0,045$ мрад. Соотношение разрешений коллиматора и ТВК 1:4,66 (параметр $k = 4,66$). Значения МРРТ, измеренные с использованием коллиматора LC-14, будут превышать истинные значения МРРТ

- на частоте Найквиста ($\omega = 7,14$ мрад⁻¹) на 17,6%,
- на частоте 10 мрад⁻¹ на 37,5%,
- на частоте 11,8 мрад⁻¹ на 56%.

Измерение МРРТ вне центра поля зрения коллиматора LC-14 увеличит погрешность измерения МРРТ, поскольку соотношение разрешений коллиматора и ТВК будет меньше, чем в центре поля зрения коллиматора, в два и более раз. Аналогичная проблема возникает при аттестации ТВК “Matis-LR” фирмы “Sagem” (Франция): номинальный размер элементарного поля зрения $\alpha = 0,06$ мрад.

Заключение

Погрешность измерения минимальной разрешаемой разности температур – $\Delta\text{МРРТ}$, обусловленная конечностью пространственного разрешения коллиматора, может быть квалифицирована как не-

исключенная систематическая погрешность и рассчитана по предложенному алгоритму. Ее можно использовать для коррекции измеренных значений МРРТ путем вычитания $\Delta\text{МРРТ}$ из измеренного значения МРРТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chrzanowski K., Lee H.C., Wrona W. A condition of spatial resolution of IR collimators for testing of thermal imaging systems // Opt. Eng. 2000. V. 39. № 5. P. 1413–1417.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
3. Holst G.C. Electro-Optical imaging system performance. Third edition. JCD publishing Winter Park, Florida USA, 2003. 442 p.
4. Прудников А.П. и др. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981. 800 с.
5. Night Conqueror 640 System Parameters and Physical Characteristics. CMC Electronics, CINCINNATI, USA.
6. Трестман М.М. Дальность действия тепловизионного канала. Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений // Российское агентство по системам управления, сборник статей. Москва, 2001. В. 1. С. 129–131.
7. Laboratory collimators. Electro Optical Industries' LC Series, Santa Barbara, California, USA.