

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОЙ РАЗРЕШАЕМОЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

Статья посвящена повышению точности определения минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных систем за счет совершенствования модели визуального восприятия термографических изображений оператором. Рассмотрен алгоритм получения уравнения для расчета минимальной разрешаемой разности температур, в основе которого лежит более достоверная аппроксимация модуляционной передаточной функции зрительной системы, предложенная Д.У. Шульцем. Получено новое выражение для коэффициента ширины полосы для аппроксимации Шульца, которое не зависит от углового размера штриха миры Фуко.

Ключевые слова: тепловидение, оценка эффективности, минимальная разрешаемая разность температур.

Введение

В последние годы благодаря совершенствованию и удешевлению элементной базы тепловизионных приборов существенно возрос спрос на их использование в различных отраслях хозяйственной деятельности человека. Многие производители тепловизоров осуществляют блочную сборку устройств. Комплекующие приобретаются у различных поставщиков или частично изготавливаются самостоятельно. Для согласования отдельных блоков тепловизоров, обоснования требований к основным функциональным узлам, сравнения устройств используются различные методы анализа и синтеза [1–6]. В зависимости от назначения устройства в методы закладываются критерии оценки качества и эффективности. Например, для потребителей систем наблюдения важны дальности обнаружения и распознавания объектов и т.п. Однако во многих случаях требуются менее обобщенные характеристики качества, которые позволяют достаточно полно оценивать свойства тепловизионных приборов. Наиболее важными характеристиками тепловизоров являются пространственная и температурная разрешающая способность, взаимосвязь между которыми устанавливает минимальная разрешаемая разность температур

(*Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD*). В некоторых учебниках и монографиях [4–6] были получены уравнения для расчета *MRTD*, в основе которых лежит ряд допущений, предложенных Дж. Ллойдом еще в начале 1970-х гг. [7]. В то же время экспериментальные исследования, проведенные на предприятии «Арсенал» (г. Киев), свидетельствуют о различии полученных результатов теоретических расчетов. Поэтому возникает потребность в дальнейшем усовершенствовании метода расчета *MRTD* с целью получения более достоверных значений этой функции.

Целью статьи является усовершенствование метода расчета *MRTD* тепловизоров за счет использования более совершенной модели восприятия наблюдателем термографического изображения.

Уравнение расчета минимальной разрешаемой разности температур

Минимальная разрешаемая разность температур $MRTD(\nu_x)$ определяется минимальной разностью эффективных температур между штрихами тест-объекта заданной пространственной частоты ν_x и фоном, при которой наблюдатель может визуально различить штрихи изображения объекта на экране дисплея тепловизора. Тест-

объект представляет собой четырехштриховую миру Фуко, в которой полосы и промежутки имеют одинаковую ширину V_{tp} , а их высота равна $7V_{tp}$. Это позволяет рассматривать одномерную модель, полагая, что большие вертикальные размеры тест-объекта не вызывают заметных частотных искажений в горизонтальном направлении. Предполагается, что полосы и промежутки излучают как абсолютно черное тело. Пространственная частота может быть выражена как в линейных, так и в угловых величинах (обычно в миллиметрах⁻¹ или миллирадианах⁻¹).

Получим уравнение для расчета $MRTD$, используя усовершенствованный алгоритм, приведенный в [5, 6]. Одним из дискуссионных допущений Ллойда является механизм восприятия зрительной системой изображения миру Фуко на экране дисплея. Было предложено пространственное интегрирование глаза вдоль координаты сканирования x учитывать согласованной передаточной функцией, которая определяется угловым размером ξ''_{tp} изображения штриха миру на экране дисплея. При этом модуляционная передаточная функция (МПФ) зрительной системы аппроксимируется функцией [7]:

$$M_{E,L}(v_x) = \frac{\sin(\pi \xi''_{tp} v_x)}{\pi \xi''_{tp} v_x} = \text{sinc}(\xi''_{tp} v_x). \quad (1)$$

Исследованию МПФ зрительной системы посвящено большое количество работ, например [8–10]. На рисунке 1 показаны графики реальной МПФ зрительной системы [10] и ее аппроксимации Дж. Ллойдом (уравнение (1)) и Д.У. Шульцем (уравнение (2)) [11]:

$$M_{E,S}(v_x) = 2,7[\exp(-0,1lv_x) - \exp(-0,35v_x)], \quad (2)$$

где пространственная частота v_x имеет размерность град⁻¹.

Анализ приведенных графиков показывает, что, во-первых, аппроксимация Ллойда (1) заметно отличается от реальной МПФ зрительной системы, особенно на низких пространственных частотах; во-вторых, аппроксимация Шульца в значительной степени соответствует реальной МПФ зрительной системы. Поэтому для получения уравнения расчета $MRTD$ будем использовать аппроксимацию Шульца (2).

Одномерный механизм зрительного восприятия изображения миру Фуко будем учитывать через отношение сигнал/шум на выходе

эталонного фильтра, для которого справедлива пропорциональность:

$$SNR_f \approx \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD}, \quad (3)$$

где ΔT – температурный контраст миру Фуко; $M_{tp,E}$ – функция передачи контраста тепловизора; $NETD$ – эквивалентная шуму разность температур.

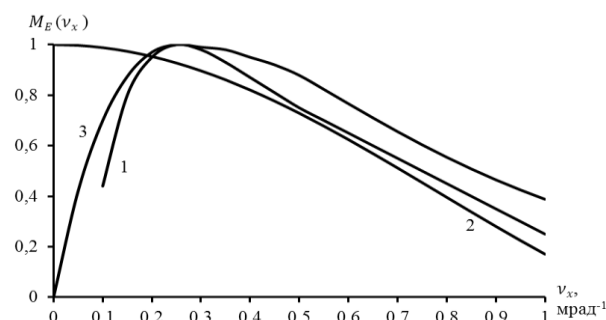


Рисунок 1 – Модуляционная передаточная функция зрительной системы человека: 1 – экспериментально полученная; 2 – аппроксимация (1), при $\xi''_{tp} = 0,85$ мрад; 3 – аппроксимация (2)

Функция передачи контраста тепловизора с учетом зрительного восприятия связана с МПФ $M_s(v_x)$ соотношением [6]:

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s. \quad (4)$$

Пространственное интегрирование в зрительной системе увеличивает воспринимаемое отношение сигнал/шум в $\sqrt{\xi''_{tp,x} \xi''_{tp,y} / \alpha_D \beta_D} = \sqrt{\xi''_{tp,x} \xi''_{tp,y} / \alpha_D \beta_D} = \xi''_{tp} \sqrt{7 / \alpha_D \beta_D}$ раз [5, 6], где $\xi''_{tp,x}, \xi''_{tp,y}$ – угловые размеры изображения штриха миру Фуко на экране дисплея вдоль соответствующих осей.

С учетом этих замечаний, воспринимаемое отношение сигнал/шум на экране имеет вид [5, 6]:

$$SNR_E = \frac{8}{\pi^2} \frac{\Delta T}{NETD} M_s(v_x) \xi''_{tp} \sqrt{\frac{7 f_f t_E}{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}}, \quad (5)$$

где f_f – частота кадров; t_E – постоянная времени зрительной системы; ξ''_{tp} – угловой размер штриха миру; $\alpha_D \beta_D$ – угловые размеры пиксела приемника излучения; $k_{\Delta f}$ – коэффициент ширины полосы, показывающий отличие ре-

альной полосы пропускания тепловизора с учетом зрительного восприятия от эффективной шумовой полосы эталонного фильтра.

Последний коэффициент вычисляют как:

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^{\infty} NPS(f) M_{el}^2(f) M_S^2(f) M_E^2(f) df}{\Delta f}, \quad (6)$$

где $NPS(f)$ – спектр мощности шума приемника излучения; $M_{el}(f)$, $M_S(f)$, $M_E(f)$ – МПФ электронного блока, дисплея и зрительной системы соответственно.

Угловой размер изображения штриха ξ''_{tp} в пространстве изображений в формуле (5) связан с угловым размером штриха ξ_{tp} в пространстве предметов соотношением:

$$\frac{\xi''_{tp}}{\xi_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{el}}{R_{SE}}, \quad (7)$$

где f'_o – фокусное расстояние объектива; β_{el} – электронное увеличение тепловизора; R_{SE} – расстояние между экраном и зрительной системой.

Угловая пространственная частота v_x в МПФ дисплея и зрительной системы v_x'' связаны с временной частотой f соотношениями:

$$v_x = \frac{t_o}{\alpha_D} f \text{ и } v_x'' = \frac{v_x}{\Gamma_s}, \quad (8)$$

где t_o – время формирования одного элемента расписания изображения, с; α_D – угловой размер пикселя, мрад; Γ_s – угловое увеличение тепловизора.

Для практического применения соотношения (5) упростим его согласно рекомендациям Дж. Ллойда [7]: электронный блок и дисплей имеют достаточно широкие эффективные полосы пропускания по сравнению с полосой пропускания зрительной системы, объектива и приемника излучения, т.е. $M_{el}(f) \approx 1$, $M_S(f) \approx 1$; шумовой сигнал в пределах этой полосы является «белым», т.е. $NPS(f) \approx 1$.

Тогда коэффициент ширины полосы (6) с учетом (8) при угловом увеличении $\Gamma_s = 1$ будет иметь вид:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-1,92 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) - \exp\left(-5,67 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) \right]^2 df. \quad (9)$$

Вычисление интеграла (9) дает следующий результат:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \frac{\alpha_D}{t_o} 0,138 \approx \frac{\alpha_D^*}{t_o \Delta f}, \quad (10)$$

где α_D^* – безразмерная величина, численно равная угловому размеру пикселя в миллирадианах.

Коэффициент ширины полосы, полученный Дж. Ллойдом, определяется как:

$$k_{\Delta f, L} = \frac{\alpha_D}{2 \xi_{tp} t_o \Delta f}. \quad (11)$$

На рисунке 2 приведены графики функций (9) и (11) в зависимости от угловых размеров штриха миры. Анализ графиков показывает, что они совпадают между собой, когда угловой размер штриха равен $\xi_{tp} = 0,5$ мрад = 1,72 угл. мин.

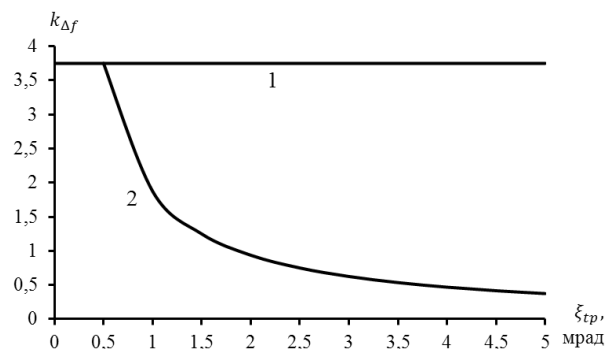


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ширины полосы системы «тепловизор – зрительная система» от углового размера ξ_{tp} штриха миры Фуко, когда $\alpha_D = 1,88$ мрад и $t_o \Delta f = 0,5$: 1 – для аппроксимации Шульца (9); 2 – для аппроксимации Ллойда (11)

Вероятность различения штрихов в изображении миры Фуко зависит от воспринимаемого отношения сигнал/шум $SNR_r = SNR_E$. Например, для вероятности распознавания 90 % необходимо, чтобы $SNR_E = 4,5$. Если подставить это значение в формулу (5), то ΔT будет искомым функцией $MRTD(v_x)$ пространственной частоты v_x :

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{\pi^2}{8} SNR_r \times \times NETD \frac{1}{M_S(v_x) \xi_{tp}} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \alpha_D^3 \beta_D}{7 f f t_E}}. \quad (12)$$

Подставим (9) в (12) с учетом того, что пространственная частота $v_x = 1/2\xi_{sp}$. Тогда $MRTD$ будет определяться уравнением:

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x \alpha_D^*}{M_S(v_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}} \quad (13)$$

В работах [5, 7] было получено подобное уравнение для расчета $MRTD$, в основе которого лежит аппроксимация Дж. Ллойда МПФ зрительной системы (11):

$$MRTD_L(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x}{M_S(v_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}} \quad (14)$$

Анализ уравнений (13) и (14) показывает, что при условии $\alpha_D^* = 0,71$ эти уравнения совпадают между собой.

Пример расчета минимальной разрешаемой разницы температур

В качестве примера рассчитаем $MRTD$ тепловизора на базе передающей камеры *Thermal Eye TSC*, которая имеет следующие характеристики:

- приемник излучения – микроболометрическая матрица размером $p \times q = 160 \times 120$ пикселей;
- размер пиксела $V_D \times W_D = 30 \times 30$ мкм²;
- температурная чувствительность $NETD = 0,1$ К;
- фокусное расстояние объектива $f_o = 16$ мм при относительном отверстии 1:1;
- угловое поле зрения $2\omega_{ox} \times \omega_{oy} = 17 \times 12$;
- частота кадров $f_f = 30$ Гц.

Для расчета функции $MRTD_S(v_x)$ по формуле (13) используем методику, приведенную в учебнике [5]:

1. В исходной формуле (13) известны: $SNR_r = 4,5$ (для вероятности различения штрихов мира 90 % по критериям Джонсона), $NETD = 0,1$ К; $f_f = 30$ Гц; $t_E = 0,2$ с.

2. Угловые размеры пиксела микроболометрической матрицы равны:

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад.}$$

3. При оптимальном согласовании полосы пропускания Δf и времени t_o формирования одного элемента разложения изображения справедливо соотношение: $\Delta f t_o = 0,5$.

4. МПФ тепловизора $M_S(v_x)$ с высококачественным объективом определяется размером пиксела α_D приемника излучения, т.е.:

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад,}$$

$$M_S(v_x) \approx M_D(v_x) = \sin c(v_x \alpha_D) = \frac{\sin(1,87\pi v_x)}{1,87\pi v_x}.$$

После подстановки исходных параметров в уравнение (13) получим функцию для расчета $MRTD$:

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot 4,5 \cdot 0,1 \cdot 1,87 v_x \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right] \times \sqrt{\frac{1,87^2}{0,5 \cdot 30 \cdot 0,2}} = 0,845 v_x \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right].$$

На рисунке 3 приведены графики $MRTD$ тепловизора с передающей камерой *Thermal Eye TSC*, построенные по формулам (13) и (14).

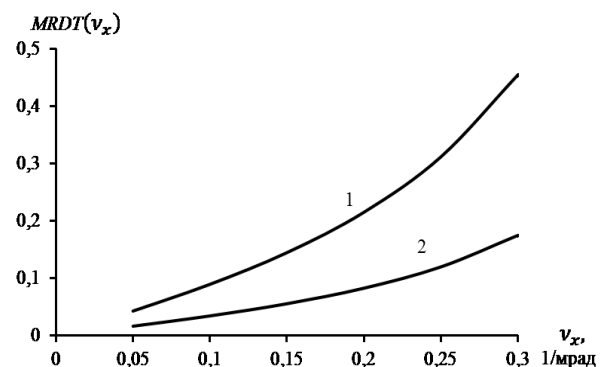


Рисунок 3 – Минимальная разрешаемая разность температур тепловизора с камерой *Thermal Eye TSC* для аппроксимаций зрительной системы Шульцем (1) и Ллойдом (2)

Анализ этих функций показывает, что: – значения функций $MRTD_S(v_x)$ и $MRTD_L(v_x)$ отличаются между собой в 2,6 раза;

– функция $MRTD_S(v_x)$ зависит от параметра α^*_{D} . При $\alpha^*_{D} = 0,71$ функции $MRTD_S(v_x)$ и $MRTD_L(v_x)$ совпадают между собой.

Заключение

Получено усовершенствованное уравнение для расчета минимальной разрешаемой разности температур тепловизора, в основе которого лежит более достоверная аппроксимация модуляционной передаточной функции зрительной системы, предложенная Д.У. Шульцем.

Исследование уравнений для расчета минимальной разрешаемой разности температур, в которых использованы модуляционные передаточные функции зрительной системы, предложенные Дж. Ллойдом и Д.У. Шульцем, показало, что для рассматриваемой модели тепловизионной системы:

– расчетные значения минимальной разрешаемой разности температур по этим уравнениями существенно отличаются между собой;

– коэффициент ширины полосы, показывающий различие между реальной полосой пропускания тепловизора с учетом зрительного восприятия и эффективной шумовой полосой эталонного фильтра, полученный Дж. Ллойдом, зависит от углового размера штриха миры Фуко, а для аппроксимации Шульца – не зависит. В этом заключается принципиальное отличие полученного уравнения для расчета минимальной разрешаемой разности температур от известных уравнений.

Дальнейшие исследования следует направить на усовершенствование уравнения расчета минимальной разрешаемой разности температур с учетом влияния характеристик дисплея и условий наблюдения.

Список использованных источников

1. *Vollmerhausen, R.H.* Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R. H. Vollmerhausen, D. Reago, R. G. Driggers. – Bellingham, SPIE Press, 2010. – 304 p.
2. *Wishart, G.C.* The accuracy of digital infrared imaging for breast cancer detection in women undergoing breast biopsy / G.C. Wishart, M. Campisi, M. Boswell [et al.] // *European Journal of Surgical Oncology*. – 2010. – Vol. 36 (6). – P. 535–540.
3. *Leachtenauer, J.C.* Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction / J. C. Leachtenauer, R. G. Driggers. – Artech House, Incorporated, 2001. – 419 p.
4. *Тарасов, М.М.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа / М.М. Тарасов, Ю.Г. Якушенок. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
5. *Колобродов, В.Г.* Проектирование тепловизионных и телевизионных систем наблюдения : учебник / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит. – Киев : НТУУ «КПИ», 2007. – 364 с.
6. *Мирошников, М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов : учеб. пособие для приборостроит. вузов / М.М. Мирошников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
7. *Ллойд, Дж.* Системы тепловидения / Дж. Ллойд; пер. с англ. – М. : Мир, 1978. – 416 с.
8. *Blackwell, H.R.* Contrast thresholds of the human eyes / H.R. Blackwell // *Journal of the Optical Society of America*. – 1946. – Vol. 36, №11. – P. 624–643.
9. *Campbell, F.W.* Optical Quality of the Human Eye / F.W. Campbell, R.W. Gubisch // *Journal of Physiology*. – 1966. – Vol. 186(3). – P. 558–578.
10. *Barten, P.G.J.* Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality / P.G.J. Barten; Bellingham: SPIE Press, 1999. – 211p.
11. *Карасик, В.Е.* Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 174 с.

ESTIMATION OF THERMAL IMAGER MINIMUM RESOLVABLE TEMPERATURE DIFFERENCE

Ahmed M.L. Al-Mzirawi, Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

Abstract. The paper is devoted to improving the accuracy of determining the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of thermal imagers by means of more sophisticated models of thermal images visual perception. An MRTD calculating algorithm, which is based on a more reliable approximation of the visual system modulation transfer function by Schultz, is considered. New expression for the bandwidth of Schultz's approximation, which does not depend on the angular size of the Foucault pattern bar, was obtained.

Keywords: thermovision, performance evaluation, minimum resolvable temperature difference.

References

1. Vollmerhausen R.H., Reago D., Driggers R.G. *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. Bellingham, SPIE Press, 2010, 304 p.
2. Wishart G.C., Campisi M., Boswell M., et al. The accuracy of digital infrared imaging for breast cancer detection in women undergoing breast biopsy. *European Journal of Surgical Oncology*, 2010, vol. 36 (6), pp. 535–540.
3. Leachtenauer J.C., Driggers R.G. *Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction*. Artech House, Incorporated, 2001, 419 p.
4. Tarasov M.M., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashchego tipa* [Forward looking Infrared systems]. Moscow, Logos Publ., 2004, 444 p. (in Russian).
5. Kolobrodov V.G., Liholit N.I. *Proektirovaniye teplovizionnykh i televisionnykh system nablyudeniya* [Development of thermovision and television systems]. Kiev, NTUU “KPI” Publ., 2007, 364 p. (in Russian).
6. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskiye osnovy optiko-elektronnykh priborov* [Theoretical foundation for optoelectronic devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 696 p. (in Russian).
7. Lloyd J. *Teplovizionnye sistemy* [Thermal Imaging Systems]. Moscow, Mir Publ., 1978, 416 p. (in Russian).
8. Blackwell H.R. Contrast thresholds of the human eyes. *Journal of the Optical Society of America*, 1946, vol. 36, № 11, pp. 624–643.
9. Campbell F.W., Gubisch R.W. Optical Quality of the Human Eye. *Journal of Physiology*, 1966, vol. 186(3), pp. 558–578.
10. Barten P.G.J. *Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality*. Bellingham: SPIE Press, 1999. – 211p.
11. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernye sistemy videniya* [Laser imaging systems]. Moscow, MGTU im.Baumana N., 2001, 174 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.12.2014.