



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 621.384.3

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ ОБЪЕКТОВ С БЕСПИЛОТНЫХ АВИАНОСИТЕЛЕЙ

КАТКОВСКИЙ Л.В.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 27 января 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Целью работы является исследование влияния всего комплекса параметров на характеристики получаемых тепловых изображений при съемке поверхности Земли с беспилотных летательных аппаратов. Рассчитаны значения минимальной детектируемой и минимальной разрешаемой разности температур в зависимости от параметров тепловизора, съемки и размеров объекта (пространственной частоты) для трех серийных малогабаритных тепловизоров, используемых при авиационной съемке объектов земной поверхности с беспилотных авианосителей. Аналитические формулы для оценки минимальной разрешаемой разности температур получены на основе математической модели тепловизора как линейной системы отдельных компонентов системы на основе методики, отличающейся от общепринятой. Оценки выполнены для двух случаев: наблюдения теплового изображения оператором на экране дисплея и для случая отсутствия оператора, когда электронное изображение анализируется пороговым алгоритмом. Впервые учтено влияние скорости движения носителя на общую модуляционную передаточную функцию системы и, соответственно, температурное и пространственное разрешения тепловизоров. Основными компонентами, которые необходимо учитывать при расчетах полной модуляционной передаточной функции съемочной системы, являются: объектив тепловизора, приемник излучения, движение носителя и зрительная система наблюдателя. При этом наибольшее влияние на разрешаемые системой температуры оказывают параметры фотоприемника и скорость движения носителя.

**Ключевые слова:** тепловизионная съемка, беспилотные авианосители, минимальная детектируемая и разрешаемая температуры, модуляционная передаточная функция.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Катковский Л.В. Расчет параметров тепловизионной съемки объектов с беспилотных авианосителей. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 53-61.

## CALCULATION OF OBJECTS THERMAL IMAGING PARAMETERS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

LEONID V. KATKOVSKY

*Scientific research institution «Institute of Applied Physics Problems named after A. N. Sevchenko»  
of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27 January 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** This article is aimed at studying the influence of the entire complex parameters on the characteristics of the obtained thermal images when shooting the Earth's surface from unmanned aerial vehicles. The values of the minimum detectable and minimum resolvable temperature differences are calculated depending on the parameters of the thermal imager, the survey and the size of the object (spatial frequency) for three serial miniature thermal cameras used in aerial surveys of the Earth's surface from unmanned aerial vehicles. Analytical formulas for estimating the minimum resolvable temperature difference are obtained on the basis of a mathematical model of the thermal imager as a linear system of individual components based on the technique that differs from the generally accepted one. Estimates were made for two cases: observation of a thermal image by an operator on a display screen and for the case when an electronic image is analyzed by a threshold algorithm with no operator engaged. For the first time, the influence of the carrier velocity on the overall modulation transfer function of the system and, accordingly, the temperature and spatial resolution of thermal imagers was taken into account. The main components that must be considered when calculating the full modulation transfer function of the system are: a thermal imager lens, a radiation detector, carrier movement and the observer's visual system. Moreover, the parameters of the detector and the speed of the carrier have the greatest influence on the temperatures resolvable by the system.

**Keywords:** thermal imaging, unmanned aerial vehicles, minimum detectable and resolved temperature, modulation transfer function.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Katkovsky L.V. Calculation of objects thermal imaging parameters from unmanned aerial vehicles. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 53-61.

### Введение

Авиационная тепловизионная съемка земной поверхности – одна из широко используемых технологий дистанционного зондирования, обладающая известными преимуществами в сравнении с космической съемкой. Она позволяет обнаруживать тепловые аномалии с высоким температурным и пространственным разрешением, что важно для диагностики природных и технических объектов. Тепловизионная аэросъемка, обладая высокой оперативностью и производительностью, низкой стоимостью получаемых данных на единицу площади, высокой точностью выявления аварийных мест актуальна для мониторинга трубопроводов, объектов энергетической, промышленной и городской инфраструктуры.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще используются в качестве носителей аппаратуры при авиасъемке [1, 2], что связано с появлением коммерчески доступных малогабаритных камер для разных диапазонов спектра, относительно невысокой стоимостью БПЛА, простотой их обслуживания и малой высотой полета при высоком пространственном и временном разрешениях. Однако качество получаемых данных зависит как от параметров полета БПЛА (высоты, скорости, стабильности траектории), так и параметров аппаратуры (постоянной времени приемника излучения, частоты кадров). Поэтому для съемки с БПЛА необходим выбор параметров, которые обеспечивали бы

максимально возможное качество данных. Основная задача тепловизора состоит в визуализации теплового поля с некоторым пространственным периодом с требуемым температурным разрешением.

В работе проводятся расчеты пространственного и температурного разрешений тепловых изображений серийных тепловизоров при съемке с БПЛА. При этом впервые учитывается влияние на них скорости носителя. Расчеты проведены для двух случаев: наблюдение изображений на дисплее оператором [3–5] и в случае отсутствия наблюдателя и дисплея, когда анализ изображения проводится на борту беспилотного носителя [6].

### Уравнения и расчеты температурного разрешения тепловизоров

Важнейшие характеристики тепловизионной съемочной системы – пространственное и температурное разрешения определяются как фотоприемником, так и характеристиками оптического, электронного тракта тепловизора и параметрами съемки. Основные характеристики исследуемых в работе камер, в качестве приемника излучения в которых используются микроболометрические матрицы, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики исследуемых тепловизоров  
**Table 1.** Characteristics of the studied thermal cameras

Параметры камеры Camera options	1	2	3
	ICI 8640 P	FLIR Vue Pro R	thermoMap
Спектральный диапазон, мкм	7–14	7,5–13,5	7,5–13,5
Частота кадров, Гц	30	30	7,5
Погрешность, °С	1	(+/-) 5	(+/-) 5
Количество пикселей	640×512	640×512	640×512
Радиометрическое разрешение, бит	14	14	14
Шаг пикселя, мкм	17	17	17
Эквивалентная шуму разность температур, °С	0,02	0,05	0,1
Фокусное расстояние, мм	13	13	9
Диафрагменное число	1,0	1,25	1,4

При относительно длительном времени наблюдения объекта (неподвижная система) используют обычно две характеристики: минимальную обнаруживаемую разность температур  $\Delta T_D$  (Detectable) и минимальную разрешаемую разность температур  $\Delta T_R$  (Resolvable) [4]. Первая – как мера обнаружения объекта определенных размеров, вторая – как мера распознавания объекта на шумовом фоне. Часто ограничиваются расчетами минимальной разрешаемой разности температур [5, 6], которая является более информативной и фактически устанавливает связь между пространственным и температурным разрешениями. Указанные разности температур, в свою очередь, зависят от размеров объекта (пространственной частоты) и эквивалентной шуму разности температур  $\Delta T_{NETD}$  (Noise Equivalent Temperature Difference), которая характеризует температурную чувствительность тепловизора и является, как правило, паспортным параметром, определяемым производителем. Как известно,  $\Delta T_{NETD}$  может быть рассчитана по следующей формуле [4]:

$$\Delta T_{NETD} = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_f \tau_{ob} A_{ob} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} = \frac{4\sqrt{\Delta f}}{(D_{ob}/F_{ob})^2 \tau_{ob} \sqrt{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}, \quad (1)$$

где  $A_{ob}, D_{ob}, F_{ob}$  – площадь, диаметр и фокусное расстояние входного объектива соответственно,  $R$  – расстояние до объекта,  $A_D$  – площадь чувствительной площадки приемника (пикселя), если пиксель квадратный со стороной  $a_D$ , то  $A_D = a_D^2$ . Вторая часть формулы (1) получается из первой более общей, если изображение протяженного объекта полностью заполняет пиксель, т. е. необходимо положить: площадь наблюдаемого объекта  $A_f = A_D (R/F_{ob})^2$  и площадь входного объектива  $A_{ob} = \pi D_{ob}^2/4$ .  $\Delta f$  – эквивалентная

шумовая полоса частот,  $D^*(\lambda)$  – удельная обнаружительная способность фотоприемника,  $\tau_{ob}$  – пропускание объектива,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $T$  – абсолютная температура. Обычно считают, что объект излучает по закону Ламберта с коэффициентом излучения  $\varepsilon$ . В этом случае спектральная функция светимости  $M_\lambda(\lambda, T)$  определяется формулой Планка.

Заданные величины  $\Delta T_{NETD}$  позволяют рассчитать по формуле (1) величины  $D^*$  исследуемых камер и сравнить чувствительности их фотоприемников. Обычно  $\Delta T_{NETD}$  рассчитывается в предположении, что  $\tau_{ob}=1$ , и для эффективной ширины полосы электронного тракта используется соотношение [4] ( $t_0$  – время экспозиции одного элемента матрицы,  $f_f$  – частота кадров):

$$\Delta f = 1/2t_0 = f_f/2. \quad (2)$$

С учетом данных табл. 1 для значений соответствующих величин  $D^*$  получаем  $D_{ICI\ 8640\ P}^* = 1,5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ,  $D_{FLIR\ Vue\ Pro\ R}^* = 1,0 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ,  $D_{thermoMap}^* = 3,2 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Оценим минимальную обнаруживаемую разность температур  $\Delta T_D$  для этих камер и неподвижного относительно камеры объекта. Для этого воспользуемся следующей формулой [4] для случая наблюдения изображения оператором на экране дисплея:

$$\Delta T_D(\xi) = (2\nu \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_D) (\alpha_D \beta_D / f_f t_E)^{0,5} / \bar{L}_S(\xi/r). \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что тест-объект в пространстве изображений представляет собой квадрат с угловым размером  $\xi$  на однородном фоне. В этом выражении  $\nu = 1/2\xi$  – угловая пространственная частота (мрад<sup>-1</sup>), соответствующая угловому размеру объекта  $\xi = l/H$  ( $l$  – линейный размер объекта,  $H$  – расстояние до объекта – высота съемки), отношение сигнал/шум для обнаружения объекта,  $SNR_D$ , зависит от задаваемой вероятности обнаружения. Для вероятности 0,9 принято полагать  $SNR_D = 4,5$ .  $\alpha_D, \beta_D$  – угловые размеры пикселя фотоприемника в пространстве изображений,  $\alpha_D = \beta_D = a_D / F_{ob}$ ,  $t_E = 0,2 \text{ с}$  – временная постоянная (временное разрешение) глаза человека, осуществляющего интегрирование кадров (величина  $\sqrt{f_f t_E}$  – количество кадров, интегрируемых зрительной системой),  $\bar{L}_S(\xi/r)$  – среднее нормированное значение яркости изображения объекта на экране дисплея в зависимости от нормированного углового размера тест-объекта, его находят обычно на основе заранее рассчитанных таблиц значений,  $r$  – угловой размер радиуса кружка рассеяния камеры (оптической системы и приемника) – параметр функции рассеяния точки. Обычно модуляционная передаточная функция (МПФ) всей оптико-электронной системы  $h(\nu)$  хорошо аппроксимируется гауссовой функцией (по одной из пространственных координат)  $h(\nu) = \exp(-2\pi^2 r^2 \nu^2)$ , параметр этой функции  $r$ , при условии согласования МПФ оптики и приемника, определяется размером пикселя приемника и равен [4]  $r = 0,282 \cdot \alpha_D$ .

Результаты расчетов по формуле (3) минимальной обнаруживаемой разности температур  $\Delta T_D$  для трех рассматриваемых камер и 4-х размеров объекта ( $l=5, 10, 20, 50 \text{ см}$ ) с высоты съемки  $H=100 \text{ м}$  приведены в табл. 2 (во второй колонке приведены соответствующие размерам объекта  $l$  пространственные частоты  $\nu$ ).

**Таблица 2.** Минимальные обнаруживаемые разности температур  $\Delta T_D$  для трех камер с высоты  $H=100 \text{ м}$   
**Table 2.** Minimum detectable temperature differences  $\Delta T_D$  for three cameras from the height of  $H = 100 \text{ m}$

Параметр Parameter	Частота, $\nu=H/2l$ , мрад <sup>-1</sup> Frequency, $\nu=H/2l$ , mrad <sup>-1</sup>	1 ICI 8640 P $\Delta T_D$	2 FLIR Vue Pro R $\Delta T_D$	3 thermoMap $\Delta T_D$
$\Delta T_{NETD}$ , К		0,02	0,05	0,1
$l = 5 \text{ см}$	1	0,83	2,1	18,3
$l = 10 \text{ см}$	0,5	0,21	0,52	4,23
$l = 20 \text{ см}$	0,25	0,059	0,15	1,12
$l = 50 \text{ см}$	0,1	0,015	0,037	0,25

Понятно, что формула (3) не может применяться для любых размеров объекта, поскольку по своему физическому смыслу  $\Delta T_D$  не может быть меньше  $\Delta T_{NETD}$ . Ограничение применения (3) обусловлено выполнением предположений, при которых она была получена [4]. Убывание  $\Delta T_D$  в (3) определяется как убыванием  $v$  с увеличением размера объекта, так и ростом безразмерной функции  $\bar{L}_s(\xi/r)$  с ростом  $\xi = 1/2v$ . Из условия  $\Delta T_D > \Delta T_{NETD}$  можно установить, что формула (3) применима для угловых размеров объекта  $\xi = l/H < 3,1\alpha_D$ . Заметим также, что выражение для минимальной обнаруживаемой разности температур не содержит МПФ, поскольку тест-объектом при ее получении является квадрат, а не мира, и отношение сигнал/шум вычисляется через величину яркости объекта в пространственной области ( $v$  здесь введена как параметр объекта для единообразия).

Перейдем к расчетам минимальной разрешаемой разности температур  $\Delta T_R$ , которая представляет собой минимальную разницу температур между штрихами миры определенной пространственной частоты и фоном, при которой возможно различение глазом на экране штрихов миры. Эта функция частоты устанавливает связь между пространственным и температурным разрешениями. При вычислении здесь отношения сигнал/шум используется МПФ, и в качестве объекта рассматривается тепловая тест-мира (мира Фуко), состоящая из 4-х прямоугольных полос, высота которых в семь раз превышает их ширину [4].

Для  $\Delta T_R$  при указанных условиях в [3, 4] получено выражение (периодичная структура миры выбирается вдоль оси  $x$  и частота  $v$  относится к этой же оси)

$$\Delta T_R(v) = \frac{\pi^2 \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \Gamma_s v}{8 \cdot h(v)} \left( \frac{2\alpha_D \beta_D}{7\Delta f \cdot t_0 \cdot f_f \cdot t_E} \right)^{0,5} = 0,66 \frac{\Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \Gamma_s v}{h(v)} \left( \frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_0 \cdot f_f \cdot t_E} \right)^{0,5}. \quad (4)$$

В этом выражении в дополнение к определенным ранее величинам:  $h(v)$  – МПФ всей системы на частоте  $v$ , равная произведению МПФ отдельных звеньев тепловизионной системы наблюдения,  $\Gamma_s$  – угловое увеличение системы камера – дисплей. Для матричного приемника  $\Delta f \cdot t_0 = 0,5$ . Примем также, что  $\Gamma_s = 1$  (оно обычно невелико),  $\alpha_D = \beta_D$ , тогда (4) переписется так (выделен множитель  $C$ , независящий от частоты):

$$\Delta T_R(v) = C v / h(v), \quad C = (0,93 \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \cdot \alpha_D) / (f_f \cdot t_E)^{0,5}. \quad (5)$$

В большинстве практических случаев электронный блок и дисплей не искажают изображения, которое создает тепловизор [5]. Поэтому считают, что МПФ электронного блока и дисплея равняются единице в пределах рабочей полосы частот. Таким образом, для МПФ тепловизора  $h(v)$  достаточно учесть МПФ оптической системы (объектива)  $h_o(v)$ , пространственную  $h_D(v)$  и временную  $h_{Dt}(v)$ , МПФ матричного приемника излучения, а также МПФ глаза наблюдателя  $h_E(v)$ . Кроме этих компонентов МПФ, при движении объекта относительно камеры необходимо ввести в МПФ еще множитель, связанный с движением объекта (motion)  $h_m(v)$ , который не рассматривался ранее, в том числе при аэрокосмической съемке [6], но который оказывает существенное влияние (как будет видно ниже) на МПФ и разрешаемую температуру системы. Таким образом, для полной МПФ имеем выражение

$$h(v) = h_o(v) h_D(v) h_{Dt}(v) h_E(v) h_m(v). \quad (6)$$

Вычислим последовательно все компоненты МПФ. Для МПФ объектива воспользуемся приближением линейной зависимости от частоты [4]:

$$h_o(v) = 1 - (1 - h_1)(v/v_1), \quad (7)$$

где  $v_1$  – пространственная частота, при которой значение МПФ уменьшается до значения  $h_1$ .

Пространственная часть МПФ матричного приемника  $h_D(v)$  определяется в основном его чувствительным элементом – угловым размером пикселя  $\alpha_D$ , т. е.

$$h_D(v) = \sin c(\alpha_D v) \equiv \sin(\pi \alpha_D v) / (\pi \alpha_D v). \quad (8)$$

Эта МПФ зависит, таким образом, от соотношения угловой пространственной частоты наблюдаемой картины (миры) и углового мгновенного поля зрения прибора. Параметры

$h_1$  и  $v_1$  функции (7) можно найти из условия согласования пространственной МПФ объектива и приемника по принципу равнозначности, считая что они одинаково ухудшают качество изображения, так что на частоте разрешения  $v_{res}$  контраст каждой подсистемы равен 0,5:

$$1 - (1 - h_1)(v_{res}/v_1) = \sin(\pi\alpha_D v_{res}) / (\pi\alpha_D v_{res}) = 0,5. \quad (9)$$

Решение второго из уравнений (9) есть  $\alpha_D v_{res} = 0,6$ , тогда получаем

$$h_o(v) = 1 - (\alpha_D/1,2)v. \quad (10)$$

Для МПФ глаза наблюдателя  $h_E(v)$  используем аппроксимацию Шульца [7], которая, как считается [5], наилучшим образом аппроксимирует экспериментальную МПФ глаза:

$$h_E(v) = 2,63 \cdot [\exp(-1,92v) - \exp(-5,67v)]. \quad (11)$$

Временная МПФ  $h_{Dt}(v)$  приемника излучения, учитывающая его инерционность [6]

$$h_{Dt}(v) = (1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2)^{-0,5} = (1 + 4\pi^2 t_D^2 \alpha_D^2 f_f^2 v^2)^{-0,5}, \quad (12)$$

где  $t_D$  – постоянная времени приемника излучения (для микроболометра обычно  $t_D = 10$  мс), и подставлена связь между пространственной угловой частотой  $v$  и временной частотой  $f$  в соответствии с формулой  $f = (\alpha_D/t_0)v = \alpha_D f_f v$ ; время формирования одного элемента изображения  $t_0$  для микроболометрической матрицы определяется частотой кадров  $t_0 = 1/f_f$ .

Очевидно, что для МПФ, учитывающей движение объекта (носителя),  $h_m(v)$ , можно применить аналогичную (12) передаточную функцию эталонного фильтра, в которую войдут скорость движения носителя  $V$  и период мира  $l$ :

$$h_m(v) = [1 + 4\pi^2 t_D^2 (V/l)^2]^{-0,5} = [1 + 4\pi^2 t_D^2 (2vV/H)^2]^{-0,5}. \quad (13)$$

Отметим, что обычно при расчетах  $\Delta T_R(v)$  используется методика [5, 6], когда для учета МПФ электронного тракта и глаза вводится коэффициент ширины полосы, показывающий отличие реальной полосы пропускания от эффективной шумовой полосы эталонного фильтра  $\Delta f$  в (4). В данной работе используется иной подход, при котором МПФ всех звеньев системы учитываются непосредственно в общей МПФ (6), а эффективная ширина полосы соответствует эталонному фильтру (формула (2)).

Наконец, перейдем к случаю оценки  $\Delta T_R$ , когда в системе отсутствует оператор и анализируется электронное изображение мира Фуко с помощью порогового устройства. При этом исключается не только МПФ глаза из формулы (6), но и из (4) исключаются факторы, учитывающие временное и пространственное интегрирование изображений глазом оператора. В результате вместо (5), (6) получаем следующее выражение для минимальной разрешаемой разности температур [6]:

$$\Delta T_R^*(v) = (\pi \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R) / (4 \cdot h^*(v)), \quad h^*(v) = h_o(v)h_D(v)h_{Dt}(v)h_m(v) \quad (14)$$

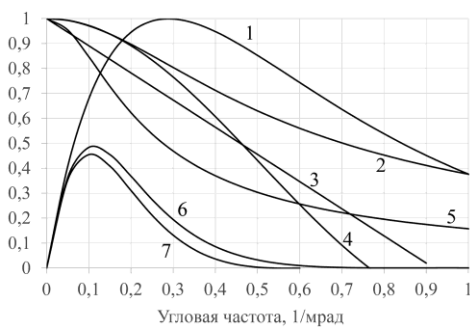
### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображены МПФ отдельных звеньев тепловизора ICI 8640 P с наименьшей эквивалентной шуму разницей температур 0,02 К и общая МПФ для трех камер в зависимости от угловой пространственной частоты наблюдаемой мира  $\Delta v$  (мрад<sup>-1</sup>). Расчеты проведены, как и в табл. 2, для высоты съемки  $H=100$  м и скорости движения БПЛА  $V=5$  м/с. Заметим, что типичный диапазон скоростей БПЛА составляет 0–15 м/с и диапазон высот 0–500 м. Общие МПФ для камер 1 и 2 совпадают ввиду одинаковых параметров, от которых зависит МПФ.

Для того чтобы оценить влияние МПФ глаза оператора и МПФ движения БПЛА на общую МПФ системы, на рис. 2 показаны также МПФ камеры ICI 8640 P без учета МПФ глаза и МПФ движения. Как видим, влияние МПФ глаза существенно только при малых частотах ( $< 0,2$  мрад<sup>-1</sup>), тогда как влияние движения носителя значительно во всем диапазоне частот.

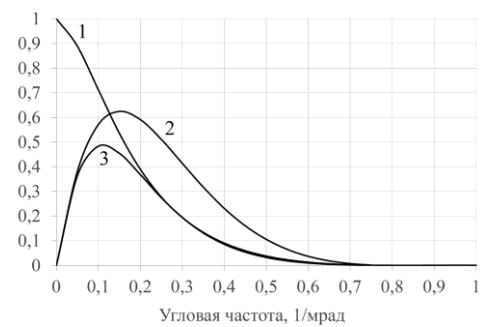
Расчет минимальных разрешаемых температур для ИК камер выполняется по формулам (5), (6). На рис. 3 показаны зависимости детектируемых и разрешаемых камерами

разностей температур в зависимости от частоты, причем для камеры 1 приведены еще кривые: без учета МПФ глаза наблюдателя и без МПФ движения носителя. Включение в схему глаза наблюдателя несущественно меняет разрешаемый температурный контраст, тогда как движение носителя, даже с относительно небольшой скоростью (5 м/с), существенно снижает разрешаемую разность температур. Заметим, что на графиках для малых частот, если  $\Delta T_R$  становилось меньше  $\Delta T_{NETD}$  (что физически неверно), полагалось  $\Delta T_R = \Delta T_{NETD}$ . Детектируемые разности температур в основном меньше, чем разрешаемые, хотя для малых частот они могут быть и больше, что, возможно, связано с улучшением разрешения при сближении угловых размеров пикселя и объекта (пересечение кривых  $\Delta T_R$  и  $\Delta T_D$  наблюдается при частоте, соответствующей угловому размеру пикселя). На рис. 4 показаны для сравнения разрешаемые разности температур камер для случая наблюдения оператором (5) и для случая машинной обработки (14). При наблюдении на экране разрешаемые температуры ниже, что объясняется временным и пространственным интегрированием изображений глазом (сравните выражения (4) и (14) без учета  $h(v)$  и  $h^*(v)$ ) и что для рассматриваемых параметров заметно улучшает отношение сигнал/шум.



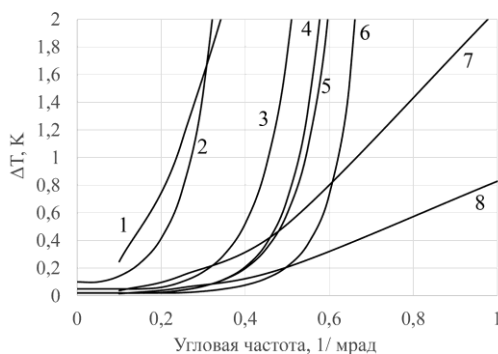
**Рис. 1.** МПФ отдельных звеньев для камеры ICI 8640 P и общие МПФ для трех камер: 1 – МПФ глаза; 2 – временная МПФ пикселя; 3 – МПФ объектива; 4 – пространственная МПФ пикселя; 5 – МПФ движения носителя; 6 – общая МПФ камер 1 и 2 (табл. 1); 7 – общая МПФ камеры 3

**Fig. 1.** MTF of individual components for the ICI 8640 P camera and the entire MTF for all three cameras: 1 – MTF of eye; 2 – temporary MTF of pixel; 3 – MTF of lens; 4 – spatial MTF of pixel; 5 – MTF of carrier motion; 6 – total MTF of cameras 1 and 2 (Table 1); 7 – total MTF of camera 3



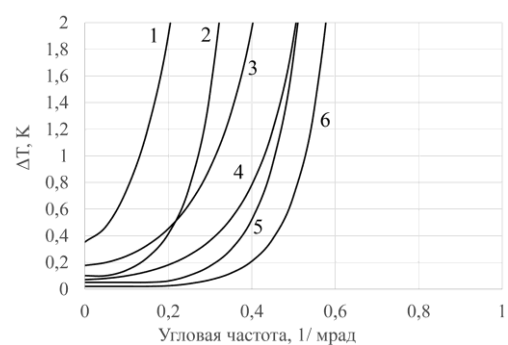
**Рис. 2.** МПФ камеры ICI 8640 P: 1 – общая без учета МПФ глаза; 2 – общая без учета МПФ движения БПЛА; 3 – общая с учетом всех звеньев системы

**Fig. 2.** MTF of the ICI 8640 P camera: 1 – MTF without taking into account the MTF of the eye; 2 – MTF without taking into account the MTF of UAV movement; 3 – total MTF taking into account all parts of the system



**Рис. 3.** Разрешаемые  $\Delta T_R$  и детектируемые  $\Delta T_D$  разности температур для камер 1, 2, 3 (из табл. 1): 1 –  $\Delta T_D$  камеры 3; 2 –  $\Delta T_R$  камеры 3; 3 –  $\Delta T_R$  камеры 2; 4 –  $\Delta T_R$  камеры 1; 5 –  $\Delta T_R$  камеры 1 без учета МПФ глаза; 6 –  $\Delta T_R$  камеры 1 без учета МПФ движения; 7 –  $\Delta T_D$  камеры 2; 8 –  $\Delta T_D$  камеры 1

**Fig. 3.** Resolvable  $\Delta T_R$  and detectable  $\Delta T_D$  temperature differences for cameras 1, 2, 3 (from Table 1): 1 –  $\Delta T_D$  of camera 3; 2 –  $\Delta T_R$  of camera 3; 3 –  $\Delta T_R$  of camera 2; 4 –  $\Delta T_R$  of camera 1; 5 –  $\Delta T_R$  of camera 1 excluding eye MTF; 6 –  $\Delta T_R$  of camera 1 excluding motion MTF; 7 –  $\Delta T_D$  of camera 2; 8 –  $\Delta T_D$  of camera 1



**Рис. 4.**  $\Delta T_R$  для камер 1, 2, 3: при компьютерном анализе – кривые 1, 3, 4 для камер 3, 2, 1 соответственно; при наблюдении оператором на экране дисплея – кривые 2, 5, 6 для камер 3, 2, 1

**Fig. 4.**  $\Delta T_R$  for cameras 1, 2, 3: by computer analysis – curves 1, 3, 4 for cameras 3, 2, 1, respectively; observed by the operator on the display screen – curves 2, 5, 6 for cameras 3, 2, 1 respectively

### Заклучение

Получены формулы и рассчитаны минимальные детектируемые и минимальные разрешаемые разности температур для трех серийных миниатюрных тепловизоров при съемке с беспилотных авианосителей. Предложен альтернативный подход к расчету минимальной разрешаемой разности температур, отличающийся расчетом полной МПФ системы наблюдения с учетом всех звенев без введения, как это обычно принято, коэффициента отличия реальной ширины шумовой полосы системы от ширины полосы эталонного фильтра.

Расчеты проведены как для случая наблюдения изображения оператором на дисплее, так и для случая отсутствия дисплея и наблюдателя (машинная обработка). Показано, что сама по себе МПФ глаза незначительно влияет на разрешаемую температуру, тогда как влияние пространственной и временной интегрирующей способности глаза может значительно уменьшить разрешаемые температуры. Впервые учтено влияние на разрешаемые температуры скорости движения носителя и показано, что оно значительно даже при небольшой скорости движения (5 м/с при высоте съемки 100 м), и эту компоненту МПФ необходимо учитывать при тепловизионной съемке с движущихся платформ.

### Список литературы

- 1 Uto K., Seki H., Saito G., Kosugi Y. Characterization of Rice Paddies by a UAV-Mounted Miniature Hyperspectral Sensor System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013;6(2):851-860. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2250921.
- 2 Cen H. Y., Wan L., Zhu J. P. Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. *Plant Methods*. 2019;5(1). DOI: 10.1186/s13007-019-0418-8.
- 3 Ллойд Дж. *Системы тепловидения*. Москва: Мир; 1978.
- 4 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. *Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження*. Київ: НТУУ «КПІ»; 2007.
- 5 Аль-Мзирави А., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов. *Приборы и методы измерений*. 2015;6(1):64-69.
- 6 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Тягур В.М.. Мінімальна розділювана різниця температур тепловізора аерокосмічного базування. *Космічна наука і технологія*. 2014;20(1):23-27. DOI: 10.15407/knit2014.01.023.
- 7 Карасик В.Е., Орлов В.М. *Лазерные системы видения*. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2001.

### References

- 1 Uto K., Seki H., Saito G., Kosugi Y. Characterization of Rice Paddies by a UAV-Mounted Miniature Hyperspectral Sensor System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013;6(2):851-860. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2250921.
- 2 Cen H. Y., Wan L., Zhu J. P. Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. *Plant Methods*. 2019;5(1). DOI: 10.1186/s13007-019-0418-8.
- 3 Lloyd J. [*Thermal imaging systems*]. Moscow: Mir; 1978. (In Russ.)
- 4 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. [*Design of thermal and television surveillance systems*]. Київ: НТУУ «КПІ»; 2007. (In Ukrainian)
- 5 Al-Mziravi A., Kolobrodov V.G., Mikitenko V.I. [Calculation of the minimum resolved temperature difference of thermal imaging devices]. *Pribory i metody izmereniy=Devices and methods of measurements*. 2015;6(1):64-69. (In Russ.)
- 6 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Тягур В.М. [Minimum resolvable temperature difference for thermal imager of space basing]. *Kosmichna nauka tehnologii =Space science and technology*. 2014;20(1):23-27. DOI: 10.15407/knit2014.01.023. (In Ukrainian)
- 7 Karasik V.E., Orlov V.M. [*Laser vision systems*]. Moscow: Publishing house MGTU im. N.E. Bauman; 2001. (In Russ.)



#### Сведения об авторах

Катковский Л.В., д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией дистанционной фотометрии НИИПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

#### Адрес для корреспонденции

220045, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Курчатова, д. 7,  
Научно-исследовательское учреждение  
«Институт прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко» Белорусского  
государственного университета  
тел. +375-17-396-44-09;  
katkovskyl@bsu.by, katkovskyl@gmail.com  
Катковский Леонид Владимирович

#### Information about the authors

Katkovsky L.V., D.Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory of Remote Photometry NIIPFP named by A. N. Sevchenko of Belarusian State University.

#### Address for correspondence

220045, Republic of Belarus,  
Minsk, Kurchatova str., 7,  
Research Institution “Institute of Applied  
Physical Problems named by A. N. Sevchenko”  
of Belarusian State University  
tel. + 375-17-396-44-09;  
katkovskyl@bsu.by, katkovskyl@gmail.com  
Katkovsky Leonid Vladimirovich