

Исследование характеристик нагретых объектов в оптически плотных отражающих средах

Е. А. Рудченко, Н. И. Яковлева, А. В. Никонов

Разработан метод определения характеристик слабо нагретых объектов в плотных отражающих средах, который позволяет корректно проводить расчеты коэффициентов излучения, отражения и температур, обеспечивая поиск объектов в сложных условиях. Для расчета предложена оригинальная система уравнений, учитывающая особенности объектов и задающая распределение излучения в области наблюдения тепловизионной системы в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм.

Ключевые слова: инфракрасный, ИК, тепловизионный канал, фотоприемное устройство, ФПУ.

Ссылка: Рудченко Е. А., Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 83.

Reference: E. A. Rudchenko, N. I. Iakovleva, and A. V. Nikonov, Prikl. Fiz. No. 1, 83 (2020).

Введение

Чрезвычайные ситуации в водной среде часто требуют проведения оперативного поиска и спасения людей. Задача характеризуется сложными начальными условиями, а именно, наличием волн и бликов на поверхности воды, малым альбедо водных поверхностей в условиях плохой видимости и близкой с поверхностью водоема температурой человека.

Для предложенного поиска может быть использована оптико-электронная система, содержащая два тепловизионных канала, работающих в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм [1, 2]. Основой каждого тепловизионного канала является матричное фото-

приемное устройство (ФПУ) с достаточно высокими характеристиками [3–5].

Цель данной работы заключается в нахождении следующих характеристических параметров: излучательной способности и температуры T_0 объекта (человека) с помощью двух тепловизионных каналов, работающих в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм.

Теоретическая модель

Рассмотрим систему визуализации, работающую в заданных спектральных диапазонах: $\Delta\lambda_1 = 3,5\text{--}5,0$ мкм и $\Delta\lambda_2 = 9,5\text{--}10,0$ мкм. Из постановки задачи следует, что инфракрасное излучение генерируется тремя источниками, а именно: излучением объекта наблюдения (человек), излучением фона и излучением поверхности водоема в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$. На рис. 1 представлен объект с температурой T_0 . Он излучает с коэффициентом $\varepsilon_0(\lambda)$ и отражает падающее на него излучение фона с коэффициентом $R_0(\lambda)$. Дополнительно поверхность водоема излучает с коэффициентом $\varepsilon_v(\lambda)$ и отражает излучение с коэффициентом $R_v(\lambda)$.

Рудченко Елизавета Александровна^{1,2}, студент.
Яковлева Наталья Ивановна¹, г.н.с. НИЦ, к.т.н.
Никонов Антон Викторович^{1,2}, нач. НИЦ, к.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2020 г.

© Рудченко Е. А., Яковлева Н. И., Никонов А. В., 2020

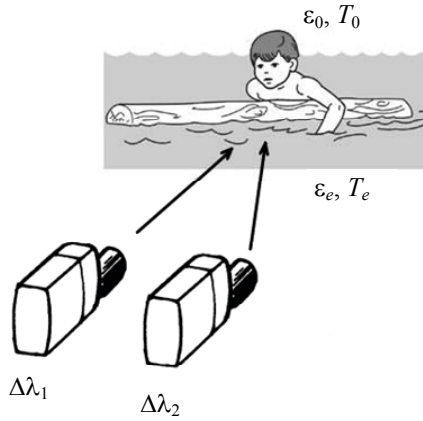


Рис. 1. Объект (человек), наблюдаемый двумя тепловизионными каналами.

Для задачи обнаружения нагретого объекта используем концепцию «черного тела», т. е. представим объект (например, человека), излучающим в заданном спектральном диапазоне. Плотность мощности излучения объекта описывается законом Планка

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

где $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$ – спектральная плотность мощности излучения, то есть мощность, испускае-

$$R_1(\lambda, T_e) = G \int_{\Delta\lambda_1} R_0(\lambda) \times \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda + G \int_{\Delta\lambda_1} R_0(\lambda) \times \varepsilon_{v1}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda + \int_{\Delta\lambda_1} \varepsilon_0(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda$$

$$R_2(\lambda, T_e) = G \int_{\Delta\lambda_2} R_0(\lambda) \times \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda + G \int_{\Delta\lambda_2} R_0(\lambda) \times \varepsilon_{v2}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda + \int_{\Delta\lambda_2} \varepsilon_0(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda.$$

Для решения задачи необходимо дополнить систему уравнений, учтя излучение фона в двух диапазонах ($R'_1(\lambda, T_e)$ и $R'_2(\lambda, T_e)$) и излучение, генерируемое водной поверхностью ($R''_1(\lambda, T_e)$ и $R''_2(\lambda, T_v)$):

$$R'_1(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_1} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda,$$

$$R'_2(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_2} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda,$$

$$R''_1(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda, T_e) \varepsilon_{v1}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda,$$

мая на единицу площади и на единицу длины волны, $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Дж с (или Вт с²) – постоянная Планка, $k = 1,38054 \times 10^{-23}$ Дж К⁻¹ – постоянная Больцмана, $c = 2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света, а T – абсолютная температура черного тела в градусах Кельвина (К).

Эффективная излучательная способность объекта во всем диапазоне длин волн (коэффициент «серости») определяется соотношением интегралов

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, T) &= \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) \times \left[\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \right] \times d\lambda}{\int_0^\infty \left[\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \right] \times d\lambda} = \\ &= \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) \times \left[\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \right] \times d\lambda. \end{aligned}$$

Из формулы следует, что спектральная плотность мощности излучения есть некоторая функция от длины волны и температуры.

Мощность излучения человека в каждом заданном спектральном диапазоне ($\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$) равна сумме слагаемых, характеризующих отраженное излучение от падающей радиации фона и поверхности водной среды, плюс собственное излучение

$$R''_2(\lambda, T_v) = \int_{\Delta\lambda_2} R_v(\lambda, T_e) \varepsilon_{v2}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda.$$

Поскольку наблюдатель, по условиям задачи, находится на берегу водоема и смотрит на объект под небольшим углом, то в рассматриваемых спектральных диапазонах вода в основном отражает излучение с коэффициентами $R_{v2}(\lambda, T_e) = 0,9$ отн. ед. и $R_{v1}(\lambda, T_e) = 0,87$ отн. ед. Отсюда предположим, что в длинноволновой области спектра коэффициент излучения воды составляет $\varepsilon_{v2}(\lambda) = 0,1$ отн. ед., в средневолновой – $\varepsilon_{v1}(\lambda) = 0,13$ отн. ед.

Задачу решаем графическим методом, предварительно задавая начальные параметры объектов, а затем уточняя их. Проведя необ-

ходимые преобразования, общую систему уравнений запишем в виде:

$$R_1(\lambda, T_e) + G\varepsilon_0 \times [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)] = \varepsilon_0(\lambda) \int_{\Delta\lambda_1} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda + G \times [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)]$$

$$R_2(\lambda, T_e) + G\varepsilon_0 \times [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)] = \varepsilon_0(\lambda) \int_{\Delta\lambda_2} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda + G \times [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)]$$

$$R'_1(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_1} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda$$

$$R'_2(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_2} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda$$

$$R''_1(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda, T_e) \varepsilon_{v1}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda$$

$$R''_2(\lambda, T_v) = \int_{\Delta\lambda_2} R_v(\lambda, T_e) \varepsilon_{v2}(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_v)}{d\lambda} d\lambda$$

где G – геометрический параметр.

Расчет параметров

Будем считать объекты серыми, следовательно, коэффициенты ε_v и ε_0 можно рассматривать как постоянные величины. В табл. 1 представлены предполагаемые температуры объектов в рассматриваемых спектральных

поддиапазонах, которые считаются начальными параметрами.

Заменим объекты эквивалентными черными телами, имеющими аналогичные характеристики. Эквивалентные распределения Планка для объектов с температурами T_{12} и T_{22} показаны на рис. 2.

Таблица 1

Температуры объектов

Диапазон, мкм	Объект № 1 – человек	Объект № 2 – воздух	Объект № 3 – вода
$\Delta\lambda_1 = 3,5-5,0$	$T_{11} = 308$ К	$T_{31} = 295$ К	$T_{21} = 294$ К
$\Delta\lambda_1 = 9,5-10,0$	$T_{12} = 310$ К	$T_{32} = 297$ К	$T_{22} = 296$ К

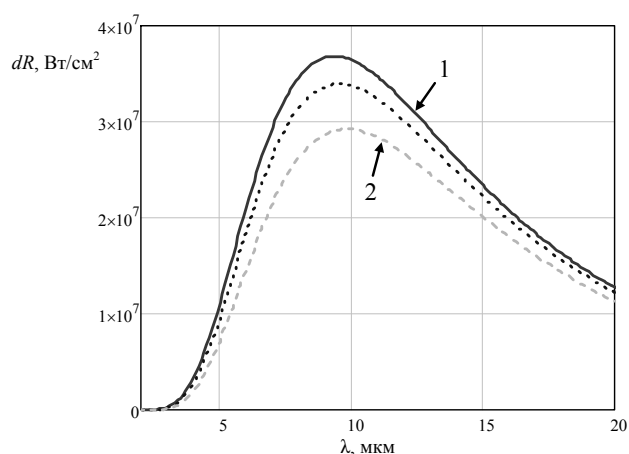


Рис. 2. Эквивалентные распределения Планка для объектов с температурами T_{12} и T_{22} . Кривая 1 – излучение человека; кр. 2 – излучение воды.

Рассчитаем мощности излучения объектов в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$. Данные расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Мощности излучения

Диапазон, мкм	Мощность излучения $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$, Вт/см ²		
	Объект № 1 (человек)	Объект № 2 (воздух)	Объект № 3 (вода)
$\Delta\lambda_1 = 3,5-5,0$	$7,47 \times 10^{-4}$ ($T = 308$ K)	$4,71 \times 10^{-4}$ ($T = 295$ K)	$4,54 \times 10^{-4}$ ($T = 294$ K)
$\Delta\lambda_2 = 9,5-10,0$	$1,83 \times 10^{-3}$ ($T = 310$ K)	$1,49 \times 10^{-3}$ ($T = 297$ K)	$1,46 \times 10^{-3}$ ($T = 296$ K)

Найдем отношение плотностей излучения для воды, разделив значение плотности излучения в первом диапазоне на плотность во втором

$$\frac{R_1''(\lambda, T_{v1})}{R_2''(\lambda, T_{v2})} = \frac{0,1}{0,13} \times \frac{0,9 \times 4,54 \times 10^{-4}}{0,87 \times 1,46 \times 10^{-3}} = 0,25.$$

Для решения уравнений и определения неизвестных параметров используем графический метод приближения [6]. Построим тем-

пературную зависимость разностной плотности мощности объектов 1, 2, используя табл. 3 и рис. 3.

В точке пересечения характеристики с осью x определяем температуру воды.

Температура воды составила $T_v = 290$ K ($\sim 17^\circ\text{C}$).

Оценим коэффициенты излучения фона в заданных спектральных диапазонах по характеристике спектральной плотности фона (рис. 4).

Таблица 3

Температурная зависимость разностной плотности мощности

Температура, K	Объект № 1, $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$, Вт/см ²	Объект № 3, $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \times 0,25$, Вт/см ²	Разница $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$, Вт/см ²
150	$-2,82 \times 10^{-6}$	$1,71 \times 10^{-8}$	$2,84 \times 10^{-6}$
200	$-3,03 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$3,32 \times 10^{-5}$
300	$-2,15 \times 10^{-4}$	$5,65 \times 10^{-4}$	$7,79 \times 10^{-4}$
400	$7,19 \times 10^{-3}$	$8,56 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$

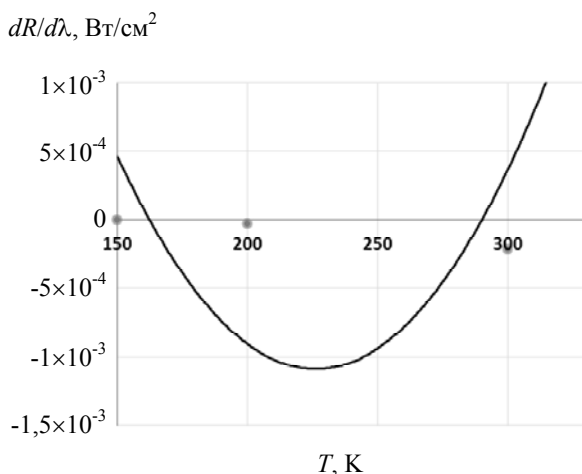


Рис. 3. Температурная зависимость разности плотности мощности (расчет температуры воды).

Из рис. 4 видно, что коэффициент излучения фона на длине волны 5 мкм составляет $\varepsilon_{e1} = 0,52$ отн. ед., а на длине волны 10 мкм –

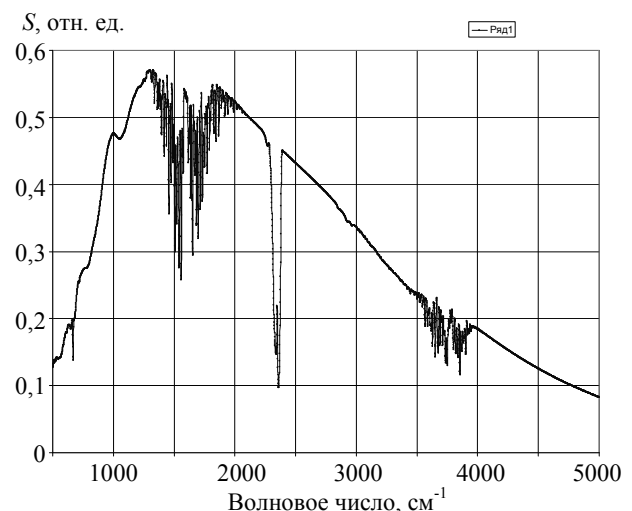


Рис. 4. Характеристика спектральной плотности фона.

$\varepsilon_{e2} = 0,48$ отн. ед. Рассчитаем соотношение коэффициентов мощности для фона.

$$R'_1(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_1} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda = 0,52 \times \int_{\Delta\lambda_1} \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda$$

$$R'_2(\lambda, T_e) = \int_{\Delta\lambda_2} \varepsilon_e(\lambda) \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda = 0,48 \times \int_{\Delta\lambda_2} \frac{dR(\lambda, T_e)}{d\lambda} d\lambda$$

$$\frac{R'_1(\lambda, T_0)}{R'_2(\lambda, T_0)} = \frac{0,52}{0,48} \times \frac{4,71 \times 10^{-4}}{1,49 \times 10^{-3}} = 0,34.$$

Определим соотношение мощности излучения человека в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, причем примем коэффициент излучения человека равным $\varepsilon_{01} = \varepsilon_{02} = 0,8$ отн. ед.

$$\begin{aligned} & \frac{R_1 - 0,8 \times \left[\int_{\Delta\lambda_1} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)] \right] - [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)]}{R_2 - 0,8 \times \left[\int_{\Delta\lambda_2} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)] \right] - [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)]} = \\ & = \frac{7,47 \times 10^{-4} - 0,8 \times \{7,47 \times 10^{-4} - 2,86 \times 10^{-4}\} - 2,86 \times 10^{-4}}{1,83 \times 10^{-3} - 0,8 \times \{1,83 \times 10^{-3} - 8,78 \times 10^{-4}\} - 8,78 \times 10^{-4}} = 0,42. \end{aligned}$$

Из системы уравнений получим

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta\lambda_1} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - 0,8 \times \left[\int_{\Delta\lambda_1} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)] \right] - [R'_1(\lambda, T_e) + R''_1(\lambda, T_e)] = \\ & = \left(\int_{\Delta\lambda_2} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - 0,8 \times \left[\int_{\Delta\lambda_2} \frac{dR(\lambda, T_0)}{d\lambda} d\lambda - [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)] \right] - [R'_2(\lambda, T_e) + R''_2(\lambda, T_e)] \right) \times 0,42. \end{aligned}$$

Уравнение позволяет нам определить температуру человека графическим методом, для чего строим зависимость от температуры разностной плотности мощности (табл. 4).

На рис. 5 представлена температурная зависимость разности плотности мощности человека и воды.

Таблица 4

Зависимость от температуры разностной плотности мощности

Температура, К	Объект № 1, $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$, Вт/см ²	Объект № 3, $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \times 0,42$, Вт/см ²	Разница $\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda}$, Вт/см ²
200	$1,06 \times 10^{-5}$	$-1,11 \times 10^{-5}$	$-5,79 \times 10^{-7}$
300	$1,83 \times 10^{-5}$	$-1,31 \times 10^{-4}$	$-1,13 \times 10^{-4}$
400	$-1,25 \times 10^{-3}$	$-4,57 \times 10^{-5}$	$-1,71 \times 10^{-3}$
500	$-8,06 \times 10^{-3}$	$-9,84 \times 10^{-4}$	$-9,05 \times 10^{-3}$

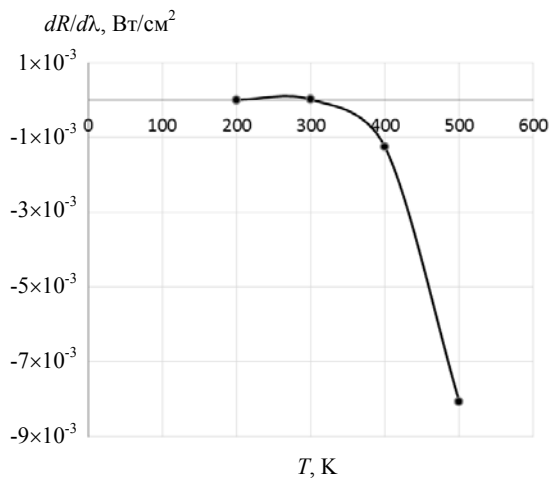


Рис. 5. Температурная зависимость разности плотности мощности (расчет температуры человека).

Из графика находим, что температура человека составляет $T_0 = 304$ K (31 °C).

Заключение

В работе представлен и исследован метод расчета параметров слабо нагретых объектов в плотных отражающих средах с использованием концепции «черного тела». Метод учитывает, что объект (человек) в заданных спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1 = 3,5\text{--}5,0$ мкм и $\Delta\lambda_2 = 9,5\text{--}10,0$ мкм излучает и отражает падающее излучение из окружающей среды и от

водной поверхности. Поэтому измеряя мощности с помощью двухканальной системы, можно определить искомые параметры объекта наблюдения, а также при необходимости параметры окружающей среды.

В работе определены температуры рассматриваемых конкретных объектов: поверхности водоема $T_v = 290$ K и человека $T_0 = 304$ K. Полученные результаты зависят от задания начальных параметров: характеристики спектральной плотности фона, альбедо воды при различных углах расположения тепловизионной системы, которые должны уточняться в реальных условиях наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 58.
2. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257.
3. Дирочка А. И., Чепурнов Е. Л., Егоров А. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 275.
4. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
5. Boltar K. O., Burlakov I. D., Filachev A. M., Klimanov E. A., Ponomarenko V. P., Solyakov V. N., Stafeyev V. I. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2007. Vol. 16. No. 4. P. 234.
6. Gaussorgues G. Infrared Thermography – Springer Science + Business Media Dordrecht, 1994.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Investigation of slightly heated objects characteristics in a dense reflective media

E. A. Rudchenko^{1,2}, N. I. Iakovleva¹, and A. V. Nikonov^{1,2}

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

Received February 13, 2020

A method has been developed for determining the characteristics of slightly heated objects in dense reflective media, which allows one to correctly calculate the emissivity, reflection, and

temperature coefficients, providing a search under difficult conditions of slightly heated objects. The proposed system of equations is completely original and takes into account the features of the behavior of objects under given observation conditions.

Keywords: infrared, IR, imager channel, Focal Plane Array, FPA.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and P. V. Vlasov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 58 (2016).
2. V. I. Stafeyev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, and et al., *Semiconductors* **39** (10), 1257 (2005).
3. A. I. Dirochka, E. L. Chepurnov, and A. V. Egorov, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (4), 275 (2018).
4. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and E. V. Degtyarev, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 43 (2007).
5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, E. A. Klimanov, V. P. Ponomarenko, V. N. Solyakov, and V. I. Stafeyev, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* **16** (4), 234 (2007).
6. G. Gaussorgues, *Infrared Thermography*. (Springer Science + Business Media Dordrecht, 1994).