

## Дистанционное определение температур естественных поверхностей в инфракрасной области спектра

*Ю.А. Машков*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет («ЛЭТИ»)*

**Аннотация:** Настоящая статья посвящена вопросам дистанционного зондирования естественных поверхностей с целью определения их температур по собственному излучению в инфракрасной (ИК) области спектра. Кратко изложены основы радиометрического метода, проанализированы факторы, влияющие на результат дистанционных измерений. Получена формула, по которой произведен расчет влияния отраженного от исследуемой поверхности излучения окружающей среды (фона) на результат измерения термодинамической температуры. Расчет учитывает излучательную способность эталонного черного тела, по которому производилась градуировка ИК-радиометра, радиационную температуру фона при градуировке прибора и выполнен для двух спектральных диапазонов, находящихся в окне прозрачности атмосферы. Результаты расчетов актуальны для повышения точности дистанционного зондирования температурных полей естественных объектов.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, ИК-излучение, ИК-радиометр, температурное поле, энергетическая яркость, излучение фона, абсолютно черное тело, оптический поток, радиационная температура, излучательная способность.

### 1. Введение

Расширяется потребность в дистанционном контроле температур и температурных полей естественных объектов по их инфракрасному излучению.

Неконтактные методы измерения температуры обладают целым рядом преимуществ по сравнению с контактными методами, такими, как:

- дистанционная регистрация температуры;
- отсутствие непосредственного контакта измеряемой среды с датчиком, благодаря чему датчик не влияет на температуру измеряемой среды;
- высокая чувствительность при большом объеме информации, выдаваемом за короткий срок;
- малая инерционность используемых приемников излучения.

Основными средствами для решения этих задач являются ИК-радиометры, которые широко применяются для изучения характеристик водоемов, земной поверхности, проведения метеорологических и экологических исследований.

Поток излучения от измеряемой поверхности, попадающий на объектив ИК-радиометра, частично поглощается промежуточной средой и зависит от температуры поверхности, ее излучательной способности и от величины отраженного поверхностью излучения сторонних источников.

Если коэффициент пропускания промежуточной среды и излучательная способность поверхности известны и учтены, то причиной появления методической погрешности измерения температуры будет изменяющееся по разным причинам излучение окружающих предметов, которое отражается поверхностью. Как показано в [1], при измерении температуры поверхности моря, ошибка, возникающая за счет влияния отраженного излучения, может составлять 0,5 К.

Чтобы учесть отраженное поверхностью излучение окружающей среды применяют различные методы, например:

- коррекция с помощью измерений на двух углах визирования 0 и 60°;
- использование для измерения поляризационного радиометра;
- коррекция при помощи радиометра, измеряющего окружающее излучение.

Для использования последнего метода, нужно знать излучательную способность эталонного черного тела, с помощью которого производилась градуировка ИК-радиометра.

Представленные в [2] формулы и таблицы поправок приведены для ИК-измерений температуры поверхности моря.

Получим формулу и произведем расчет корректировок в общем случае – для поверхности с произвольной излучательной способностью, с учетом

---

радиационной температуры окружающей среды (фона) и учитывающие излучательную способность эталонного черного тела. Расчет выполним для двух спектральных диапазонов, лежащих в окне прозрачности атмосферы: 8–12,6 мкм и 2–5 мкм.

## 2. Формулы для расчета корректировок

Радиометрический метод измерения температуры поверхности состоит в определении ее собственного ИК-излучения. Для этой цели, как уже отмечалось, служат радиационные термометры (ИК-радиометры). Излучение от измеряемой поверхности проходит через промежуточную среду (атмосферу) и воспринимается ИК-радиометром, который вырабатывает сигнал, пропорциональный энергии излучения, пришедшей к входу прибора.

Лежащие в основе радиометрического принципа измерения температуры законы теплового излучения подробно изложены в многочисленных специальных работах, например, [3,4]. Поэтому рассмотрим кратко лишь основные понятия и законы электромагнитного излучения, необходимые для понимания дальнейшего материала.

Зависимость энергии излучения поверхности от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$  описывается законом Планка

$$m_{\lambda,T} = \pi^{-1} \varepsilon_{\lambda,T} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

где  $m_{\lambda,T}$  – спектральная яркость поверхности, равная потоку энергии, испускаемому в единицу телесного угла с единицы площади при температуре  $T$  и длине волны  $\lambda$ ;  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $\varepsilon_{\lambda,T}$  – спектральная излучательная способность поверхности, равная отношению спектральной яркости поверхности при длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$  к спектральной яркости абсолютно черного тела (АЧТ) при тех же длине волны и температуре.

---

При определении температур естественных поверхностей, лежащих в интервале от  $-40^{\circ}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , их излучение сравнивают с излучением эталонного источника, температура которого известна. Такой метод позволяет минимизировать влияние собственного излучения оптических элементов прибора (объектива, фильтров) и повысить точность измерений. При помощи оптического модулятора [5] на приемник излучения попеременно попадает поток излучения от исследуемой поверхности и эталонного источника. Показания ИК-радиометра при условии, что изображение исследуемой поверхности полностью перекрывает приемник излучения, не зависят от дистанции измерения (в случае прозрачной атмосферы) и определяются температурой поверхности, ее излучательной способностью и отраженным от поверхности излучением окружающей среды.

В качестве приемников излучения используются так называемые «тепловые» фотоприемники, в которых энергия излучения превращается в теплоту. Это обуславливает возникновение термо-ЭДС (термоэлементы), изменение сопротивления (болометры), пьезо-ЭДС (пироэлектрики) [6].

На практике излучение тел измеряется не во всем спектре, а в каком-то его участке. Это объясняется тем, что атмосфера избирательно пропускает ИК-излучение тел, поэтому выбирают такой спектральный участок, в котором атмосфера наиболее прозрачна, например 8–12,6 мкм и 2–5 мкм.

Чтобы получить формулы для вычисления корректировок на отраженное от поверхности излучение фона, запишем уравнение оптических потоков в виде:

$$\varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon} F_p T_p^4 + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon}) F_{\phi\varepsilon} T_{\phi\varepsilon}^4 = \varepsilon_{\Delta\lambda} F_0 T_0^4 + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}) F_{\phi} T_{\phi}^4, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon}$  – излучательная способность эталонного черного тела;  $\varepsilon_{\Delta\lambda}$  – излучательная способность измеряемой поверхности;  $T_p$  – радиационная

поверхности;  $T_{\phi_2}$  – радиационная температура фона при градуировке;  $T_{\phi}$  – радиационная температура фона при измерениях;  $T_0$  – термодинамическая температура поверхности;  $F$  – универсальная функция, определяемая формулой:

$$F = \left( \int_0^{\lambda_2} m_{\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} m_{\lambda} d\lambda \right) / \int_0^{\infty} m_{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

где  $m_{\lambda}$  – спектральная яркость АЧТ, которая находится по формуле (1).

Индексация  $F$  в формуле (2) аналогична индексации  $T$ , значения  $F$  берутся из таблиц [7].

Так как излучательная способность измеряемой поверхности отличается от излучательной способности эталонного черного тела, с помощью которого производилась градуировка, показания ИК-радиометра при проведении измерений будут отличаться на величину  $\Delta T_p = T_0 - T_p$ , которой соответствует разность энергетических яркостей АЧТ  $\Delta M$  с температурами  $T_0$  и  $T_p$ :

$$\Delta M = F_0 T_0^4 - F_p T_p^4. \quad (4)$$

Выразим  $F_0 T_0^4$  из уравнения (2) и запишем (4) в виде:

$$\Delta M = \varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} \left[ \varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon} F_p T_p^4 - F_{\phi} T_{\phi}^4 \right] - \left[ F_p T_p^4 - F_{\phi} T_{\phi}^4 \right] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} F_{\phi_2} T_{\phi_2}^4. \quad (5)$$

Считая, что  $\Delta T$  малая величина и полагая  $F_0 = F_p$ , получим

$$\Delta M = 4 F_p T_p^3 \Delta T_p. \quad (6)$$

Объединив (5) и (6) получим формулу для расчета корректировки:

$$\Delta T_p = \frac{\varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} \left[ \varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon} F_p T_p^4 - F_{\phi} T_{\phi}^4 \right] - \left[ F_p T_p^4 - F_{\phi} T_{\phi}^4 \right] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda\varepsilon}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} F_{\phi_2} T_{\phi_2}^4}{4 F_p T_p^3}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует из приведенных выше формул, исходными данными для расчета являются следующие параметры: рабочий спектральный диапазон ИК-радиометра  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , излучательная способность поверхности  $\varepsilon_{\Delta\lambda}$  и ее радиационная температура  $T_p$ , излучательная способность эталонного черного тела  $\varepsilon_{\lambda_3}$ , а также радиационные температуры фона  $T_\phi$  при проведении измерений и градуировке ИК-радиометра  $T_{\phi_2}$ .

Значения излучательной способности исследуемой поверхности можно взять из таблиц [8], а эталонного черного тела определить экспериментальным путем, измерив его температуру контактным способом.

Радиационная температуры фона при градуировке  $T_{\phi_2}$  измеряется тем же радиометром, что и исследуемая поверхность. Радиационную температуру фона при проведении исследований  $T_\phi$  можно измерить дополнительным радиометром, регистрирующем излучение фона.

### 3. Результаты

Величины корректировок, рассчитанные по (6) для спектрального диапазона 8–12,6 мкм (числитель) и 2–5 мкм (знаменатель), приведены в таблице 1. Излучательная способность поверхности 0,950, эталонного излучателя – 0,987. Радиационная температура фона при градуировке ИК-радиометра принималась равной 20<sup>0</sup>С.

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

- величины корректировок изменяются в широком диапазоне и могут достигать величины порядка несколько градусов;
- корректировки зависят от разности радиационных температур измеряемой поверхности и объектов, создающих фон;

Таблица №1

Корректировки к показаниям радиометра на отраженное излучение фона

Радиационная температура фона, °С	Радиационная температура поверхности, °С						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
-40	$\frac{1.4}{2.4}$	$\frac{1.6}{1.9}$	$\frac{1.8}{1.6}$	$\frac{1.9}{1.4}$	$\frac{2.1}{1.3}$	$\frac{2.2}{1.3}$	$\frac{2.4}{1.3}$
-30	$\frac{1.0}{2.1}$	$\frac{1.2}{1.6}$	$\frac{1.4}{1.4}$	$\frac{1.6}{1.3}$	$\frac{1.8}{1.2}$	$\frac{2.0}{1.2}$	$\frac{2.2}{1.2}$
-20	$\frac{0.4}{1.4}$	$\frac{0.7}{1.2}$	$\frac{1.0}{1.1}$	$\frac{1.2}{1.1}$	$\frac{1.5}{1.1}$	$\frac{1.7}{1.1}$	$\frac{1.9}{1.2}$
-10	$\frac{-0.2}{0.5}$	$\frac{0.1}{0.6}$	$\frac{0.5}{0.7}$	$\frac{0.8}{0.8}$	$\frac{1.1}{0.9}$	$\frac{1.3}{1.0}$	$\frac{1.6}{1.1}$
0	$\frac{-1.0}{-1.0}$	$\frac{-0.5}{-0.3}$	$\frac{-0.1}{0.1}$	$\frac{0.3}{0.4}$	$\frac{0.6}{0.6}$	$\frac{0.9}{0.8}$	$\frac{1.2}{0.9}$
10	$\frac{-1.9}{-3.4}$	$\frac{-1.2}{-1.8}$	$\frac{-0.7}{-0.8}$	$\frac{-0.3}{-0.2}$	$\frac{0.1}{0.2}$	$\frac{0.5}{0.4}$	$\frac{0.8}{0.7}$

- при температурах поверхностей, меньших чем  $-10^{\circ}\text{C}$ , величины корректировок больше в коротковолновом спектральном диапазоне 2–5 мкм, при температурах, выше  $0^{\circ}\text{C}$  – величины поправок больше в длинноволновом диапазоне 8–12 мкм.

Формулы (6), (10) и (11) позволяют рассчитать корректировки к показаниям ИК-радиометра в самом общем случае – при любых значениях излучательной способности исследуемой поверхности и градуировочного устройства с учетом излучения фона при градуировке и проведении измерений.

#### 4. Сравнительный анализ других методов

Для сравнения рассмотрим другие специальные методы, применяемые для коррекции эффекта фонового отражения.

#### **4.1. Коррекция с помощью измерений на двух углах визирования 0 и 60°.**

Метод позволяет одновременно учитывать и эффект отражения и эффект атмосферного поглощения, так как при отклонении прибора на 60° не только удваивается атмосферный путь, но и удваивается погрешность, обусловленная отражением [9].

Метод дает хорошие результаты только в случае измерений при ясном небе или сплошной однородной облачности. При наличии разрывов в облачном покрове ошибка отражения сильно флуктуирует и метод становится ненадежным.

#### **4.2. Использование для измерений поляризационного радиометра.**

Включение поляризатора в схему прибора позволяет при визировании под углом Брюстера [9,10] исключить практически полностью эффект отражения. Например, вода, обладает поляризующим свойством – в интервале углов 45 – 50° величина  $\Delta T_p$  может быть существенно уменьшена за счет использования составляющей излучения, поляризованного в плоскости падения. Однако, в этом случае усложняется схема оптического канала ИК-радиометра, кроме того, данный метод применим только для оптически прозрачных сред.

### **5. Заключение**

Целью данной работы была задача, выяснить, как влияет отраженное от поверхности излучение окружающей среды на результат измерения термодинамической температуры исследуемой поверхности.

Нами получены формулы и выполнен расчет корректировок к показаниям ИК-радиометра с учетом влияния отраженного излучения фона, результаты представлены в таблице 1.

Из анализа формулы (7) следует, что для повышения точности дистанционного определения температуры нужна надежная информация об

---

излучательной способности  $\varepsilon$  поверхности. Излучательная способность зависит от ряда факторов: состояния поверхности, ее температуры, спектрального диапазона и др. Поэтому нужно оперативно определять излучательную способность прямо во время дистанционного зондирования.

Для достижения этой цели необходимо использовать ИК-радиометры, производящие измерения в двух разных спектральных диапазонах. Тогда, зная, как связаны между собой излучательные способности поверхности в этих диапазонах, можно рассчитать термодинамическую температуру.

Исследования в этом направлении представляются весьма перспективными.

### Литература

1. Бычкова И.А., Викторов С.В., Виноградов В.В. Дистанционное определение температуры моря. Ленинград: Гидрометеоздат, 1988. 223 с.
  2. Виноградов В.В., Шевелева Т.Ю., Вербицкий В.А. Руководство по применению аэрометодов в океанографии. Ч.2. Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. 69 с.
  3. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. Москва: Наука, 1964. 223 с.
  4. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Москва: Логос, 1999. 480 с.
  5. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 247 с.
  6. Торшина, И. П., Якушенков, Ю. Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора. Москва: МИИГАИК, 2017. 58 с.
  7. Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Москва: Наука, 1964. 318 с.
-

8. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва: Сов. радио, 1978. 400 с.

9. Deschamps P.Y. Teledetection de la temperature de la surface de la mer par radiometrie infrarouge. These de Docteur Sciences phys., Univ. de Lille 1; N 376, 1977. 205 p.

10. Maul G.A. Introduction to satellite oceanography. – Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, 1985. 606 p.

### References

1. Bychkova I.A., Viktorov S.V., Vinogradov V.V. Distancionnoe opredelenie temperaturey morja [Remote determination of sea temperature]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 223 p.

2. Vinogradov V.V., Sheveleva T.Ju., Verbickij V.A. Rukovodstvo po primeneniju aerometodov v okeanografii [Guidelines for the use of aerometods in oceanography]. Ch.2. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 69 p.

3. Bramson M.A. Infракрасное izluchenie nagretyh tel [Infrared radiation of heated bodies]. Moskva: Nauka, 1964. 223 p.

4. Jakushenkov Ju. G. Teorija i raschet optiko-jelektronnyh priborov [Theory and calculation of optoelectronic devices]. Moskva: Logos, 1999. 480 p.

5. Poskachej A.A., Chubarov E.P. Optiko-jelektronnye sistemy izmerenija temperaturey [Optoelectronic temperature measurement systems]. Moskva: Jenergoatomizdat, 1998. 247 p.

6. Torshina, I. P., Jakushenkov, Ju. G. Vybor priemnika izluchenija pri proektirovanii optiko-jelektronnogo pribora [Selection of a radiation receiver when designing an optoelectronic device]. Moskva: MIIGaIK, 2017. 58 p.

7. Bramson M.A. Spravochnye tablicy po infракрасному izlucheniju nagretyh tel [Reference tables on infrared radiation of heated bodies]. Moskva: Nauka, 1964. 318 p.



8. Kriksunov L.Z. Spravochnik po osnovam infrakrasnoj tehniki [Handbook of the basics of infrared technology]. Moskva: Sov. radio, 1978. 400 p.

9. Deschamps P.Y. Teledetection de la temperature de la surface de la mer par radiometrie infrarouge. These de Docteur Sciences phys., Univ. de Lille 1; 376, 1977. 205 p.

10. Maul G.A. Introduction to satellite oceanography. Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, 1985. 606 p.