

Машков Юрий Александрович, Жукова Людмила Александровна

ПОПРАВКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В статье рассматривается вопрос повышения точности измерения температурных полей при дистанционном зондировании естественных поверхностей в инфракрасной области спектра. Получены формулы для расчета поправок на коэффициент излучения поверхности с учетом влияния отраженного излучения атмосферы, учитывающие способ градуировки радиометра - по воде и по модели абсолютно черного тела. Расчеты поправок выполнены для спектральных диапазонов 8...12,6 мкм и 2...5 мкм.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2016/11/21.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2016. № 11 (113). С. 80-82. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2016/11/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net
Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

УДК 537.531

Физико-математические науки

В статье рассматривается вопрос повышения точности измерения температурных полей при дистанционном зондировании естественных поверхностей в инфракрасной области спектра. Получены формулы для расчета поправок на коэффициент излучения поверхности с учетом влияния отраженного излучения атмосферы, учитывающие способ градуировки радиометра – по воде и по модели абсолютно черного тела. Расчеты поправок выполнены для спектральных диапазонов 8...12,6 мкм и 2...5 мкм.

Ключевые слова и фразы: дистанционное зондирование; инфракрасное излучение; инфракрасные радиометры; измерение температуры естественных объектов; исследование температурных полей; формула Планка; энергетическая яркость; излучение фона; абсолютно черное тело (АЧТ).

Машков Юрий Александрович, к. ф.-м. н., доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)

yurymash@yandex.ru

Жукова Людмила Александровна

Военная академия связи имени С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург

zhukovalud@yandex.ru

ПОПРАВКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Дистанционные методы исследования температурных полей поверхностей естественных объектов с помощью инфракрасных (ИК) радиометров находят широкое применение для изучения фундаментальных характеристик Мирового океана, природных ресурсов и климата Земли, проведения экологического мониторинга.

ИК-излучение, попадающее на входной зрачок радиометра, искажается слоем атмосферы и зависит от температуры объекта исследования, его коэффициента излучения и величины отраженного поверхностью объекта нисходящего излучения атмосферы – фона.

Если функция пропускания атмосферы и коэффициент излучения поверхности известны, то основным источником погрешности дистанционного измерения температуры является изменчивое излучение атмосферного фона.

Для коррекции влияния отраженного фонового излучения используют различные методы, среди которых:

- проведение измерений для двух различных углов визирования поверхности (0 и 60°);
- использование поляризационного ИК-радиометра, визирующего поверхность под углом Брюстера;
- непосредственное измерение величины фонового излучения при помощи ИК-радиометра, визирующего небо, и расчет поправок на коэффициент излучения поверхности.

Последний метод является наиболее надежным, однако для его эффективного применения необходимы дополнительные сведения о способе градуировки ИК-радиометра и коэффициенте излучения градуировочного устройства. Приведенные в литературе [5] таблицы поправок составлены для конкретного типа естественной поверхности – воды – и двух способов градуировки ИК-радиометра – по модели абсолютно черного тела (АЧТ) и по воде для рабочего спектрального диапазона 8...12 мкм.

Получим формулы для расчета поправок в самом общем случае. Для этого запишем уравнение спектральных энергетических яркостей в виде:

$$\varepsilon_{\lambda\varepsilon} L_{\lambda}^0(T_p) + (1 - \varepsilon_{\lambda\varepsilon}) L_{\lambda}^0(T_{\phi\varepsilon}) = \varepsilon(\lambda) L_{\lambda}^0(T_0) + (1 - \varepsilon(\lambda)) L_{\lambda}^0(T_{\phi}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\lambda\varepsilon}$ – спектральный коэффициент градуировочного устройства; $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения измеряемой поверхности; $L_{\lambda}^0(T_i)$ – спектральная энергетическая яркость АЧТ при температурах, равных радиационной температуре поверхности T_p , радиационной температуре фона при градуировке $T_{\phi\varepsilon}$, измерении T_{ϕ} и термодинамической температуре поверхности T_0 . Спектральная энергетическая яркость АЧТ определяется из формулы Планка:

$$L_{\lambda}^0(T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения, c_1 и c_2 – константы.

Так как реальная поверхность не является идеальным излучателем, проградуированный радиометр имеет ошибку измерения $\Delta T_p = T_0 - T_p$, которой соответствует разность энергетических яркостей АЧТ $\Delta L(\Delta T_p)$ с температурами T_0 и T_p :

$$\Delta L(\Delta T_p) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) [L_{\lambda}^0(T_0) - L_{\lambda}^0(T_p)] d\lambda, \quad (3)$$

где $\psi(\lambda) = \tau(\lambda)s(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптического фильтра радиометра с учетом относительной характеристики чувствительности фотоприемника; λ_1 и λ_2 – граничные длины волн спектрального диапазона ИК- радиометра.

Выразим $L_{\lambda}^0(T_0)$ из уравнения (1) и представим (3) в виде:

$$\Delta L(\Delta T_p) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) \left\{ \varepsilon^{-1}(\lambda) [\varepsilon_{\lambda z} L_{\lambda}^0(T_p) - L_{\lambda}^0(T_{\phi})] - [L_{\lambda}^0(T_p) - L_{\lambda}^0(T_{\phi})] + \frac{1 - \varepsilon_{\lambda z}}{\varepsilon(\lambda)} L_{\lambda}^0(T_{\phi z}) \right\} d\lambda. \quad (4)$$

С другой стороны, изменение энергетической яркости АЧТ при изменении его температуры на ΔT_p можно определить как

$$\Delta L(\Delta T_p) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) [L_{\lambda}^0(T_p + \Delta T_p) - L_{\lambda}^0(T_p)] d\lambda. \quad (5)$$

Соотношение (5), в котором левая часть определена из (4), позволяет рассчитать поправки на коэффициент излучения поверхности ΔT_p методом итераций.

Как следует из приведенных выражений, исходными данными для расчета являются следующие параметры: рабочий спектральный диапазон ИК-радиометра $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, спектральный коэффициент излучения поверхности $\varepsilon(\lambda)$ и ее радиационная температура T_p , спектральный коэффициент излучения градуировочного устройства $\varepsilon_{\lambda z}$, а также радиационные температуры фона T_{ϕ} при проведении измерений и градуировке прибора $T_{\phi z}$.

Значения коэффициента излучения исследуемой поверхности можно взять из таблиц [1-3], а градуировочного устройства – определить экспериментально или рассчитать.

Радиационные температуры или энергетические яркости фона при градуировке и измерениях могут быть измерены тем же радиометром, которым исследуют поверхность. Чтобы учесть угловую зависимость энергетической яркости, нужно измерить радиометром энергетическую яркость $L_{\phi}(\theta, \phi)$ для различных зенитных θ и азимутальных ϕ углов визирования неба, а затем произвести численное интегрирование по полусфере выражения

$$L_{\phi} = \pi^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{\phi}(\theta, \phi) \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi.$$

Для реализации итеративного метода решения уравнения (5) удобно представить зависимость энергетической яркости от температуры в рабочем спектральном диапазоне прибора полиномом $m = 4 \dots 5$ степени [4]

$$L_{\Delta\lambda T} = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + \dots + b_m T^m, \quad (6)$$

коэффициенты b_i которого определяются по методу наименьших квадратов для таблично заданной N парами значений T_i , $L_{\Delta\lambda}^0(T_i)$ функции

$$L_{\Delta\lambda}^0(T_i) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) L_{\lambda}^0(T_i) d\lambda, \quad (7)$$

где значения $L_{\lambda}^0(T_i)$ рассчитываются по формуле (2).

Если величина поправки не превышает $5 \dots 10^0$ С, когда зависимость $L = f(T)$ практически линейная, формулы для ее расчета записываются в явном виде.

Действительно, вариацию энергетической яркости АЧТ при изменении его температуры на ΔT можно приближенно определить как

$$\Delta L = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) \left(\frac{\partial L_{\lambda}^0(T)}{\partial T} \right)_{T=T_p} d\lambda \right) \Delta T. \quad (8)$$

Совмещая (4) и (8) и заменяя коэффициент пропускания оптического фильтра его средним значением, получим формулу

$$\Delta T_p = \frac{\varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} \left[\varepsilon_{\Delta\lambda\lambda} L_{\Delta\lambda}^0(T_p) - L_{\Delta\lambda}^0(T_\phi) \right] - \left[L_{\Delta\lambda}^0(T_p) - L_{\Delta\lambda}^0(T_\phi) \right] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda\lambda}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi\lambda})}{\left(\frac{\partial L_{\Delta\lambda}^0(T)}{\partial T} \right)_{T=T_p}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_{\Delta\lambda}, \varepsilon_{\Delta\lambda\lambda}$ – эффективные значения коэффициентов излучения поверхности и градуировочного устройства соответственно, $L_{\Delta\lambda}^0(T_p), L_{\Delta\lambda}^0(T_\phi), L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi\lambda})$ – энергетические яркости АЧТ в спектральном диапазоне прибора при соответствующих температурах.

Величины энергетических яркостей можно рассчитать по формуле (7) с помощью аппроксимации (6) или по таблицам ИК-излучения. В последнем случае формулу (9) удобно представить в виде

$$\Delta T_p = \frac{\varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} \left[\varepsilon_{\Delta\lambda\lambda} F_p T_p^4 - F_\phi T_\phi^4 \right] - \left[F_p T_p^4 - F_\phi T_\phi^4 \right] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda\lambda}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} F_{\phi\lambda} T_{\phi\lambda}^4}{4 F_p T_p^3}. \quad (10)$$

Индексация F в выражении (10) аналогична индексации T , значения F берутся из таблиц [1; 3].

Величины поправок, рассчитанные по (5) для спектрального диапазона 8...12,6 мкм (числитель) и 2...5 мкм (знаменатель), приведены в таблице. Коэффициент излучения поверхности составлял 0,950, градуировочного устройства – 0,987. Радиационная температура фона при градуировке прибора принималась равной 20°C.

Радиационная температура фона, °C	Радиационная температура поверхности, °C								
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-40	<u>1,3</u>	<u>1,4</u>	<u>1,6</u>	<u>1,8</u>	<u>1,9</u>	<u>2,1</u>	<u>2,2</u>	<u>2,4</u>	<u>2,5</u>
	3,4	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
-30	<u>0,7</u>	<u>1,0</u>	<u>1,2</u>	<u>1,4</u>	<u>1,6</u>	<u>1,8</u>	<u>2,0</u>	<u>2,2</u>	<u>2,3</u>
	2,8	2,1	1,6	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3
-20	<u>0,1</u>	<u>0,4</u>	<u>0,7</u>	<u>1,0</u>	<u>1,2</u>	<u>1,5</u>	<u>1,7</u>	<u>1,9</u>	<u>2,1</u>
	1,8	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
-10	<u>-0,7</u>	<u>-0,2</u>	<u>0,1</u>	<u>0,5</u>	<u>0,8</u>	<u>1,1</u>	<u>1,3</u>	<u>1,6</u>	<u>1,8</u>
	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1
0	<u>-1,6</u>	<u>-1,0</u>	<u>-0,5</u>	<u>-0,1</u>	<u>0,3</u>	<u>0,6</u>	<u>0,9</u>	<u>1,2</u>	<u>1,5</u>
	-2,2	-1,0	-0,3	0,1	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
10	<u>-2,7</u>	<u>-1,9</u>	<u>-1,2</u>	<u>-0,7</u>	<u>-0,3</u>	<u>0,1</u>	<u>0,5</u>	<u>0,8</u>	<u>1,1</u>
	-6,5	-3,4	-1,8	-0,8	-0,2	0,2	0,4	0,7	0,8

Список литературы

1. **Брамсон М. А.** ИК-излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964. 223 с.
2. **Брамсон М. А.** Справочные таблицы по ИК-излучению нагретых тел. М.: Наука, 1988. 318 с.
3. **Криксунов Л. З.** Справочник по основам ИК-техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
4. **Машков Ю. А.** Полиномиальная аппроксимация зависимости энергии ИК-излучения от температуры в ограниченных участках спектра: деп. ВИНТИ. 16.12.94. Рег. № 2899 – В 94.
5. **Руководство по применению аэрометодов в океанографии:** в 2-х ч. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Ч. 2. 69 с.

CORRECTIONS FOR THE RADIATION VALUE IN REMOTE SENSING OF NATURAL SURFACES IN THE INFRARED SPECTRAL REGION

Mashkov Yurii Aleksandrovich, Ph. D. in Physical-Mathematical Sciences, Associate Professor
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
yurymash@yandex.ru

Zhukova Lyudmila Aleksandrovna
S. M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps in Saint Petersburg
zhukovalud@yandex.ru

The article deals with the issue of increasing accuracy of measuring temperature fields in remote sensing of natural surfaces in the infrared spectral region. The authors propose formulae for calculating corrections for the radiation value of the surface under influence of reflected radiation of the atmosphere taking into account the method of calibrating the radiometer – according to water and to the model of the black body. Correction calculations are carried out for the spectral ranges 8...12.6 microns and 2...5 microns.

Key words and phrases: remote sensing; infrared radiation; infrared radiometers; measurement of natural objects temperature; study of temperature fields; Planck formula; radiance; background radiation; black body.