



УДК 639.78

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ КАЛИБРОВКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТЕПЛОМ ДИАПАЗОНЕ С ОПТИМАЛЬНЫМ ВЫБОРОМ КОНФИГУРАЦИИ ТРЕУГОЛЬНЫХ ТЕСТОВЫХ УЧАСТКОВ

А. Д. Алиева

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена оптимизации калибровки широкополосных ИК спектрорадиометров, предназначенных для измерения температуры наземных объектов. Предлагается осуществить калибровку на базе данных, получаемых к одного из геометрически идентичных тестовых участков треугольного типа, формируемых по траектории прохождения спутника. С учетом известных данных о возникновении азимутальных погрешностей по мере увеличения длины строк развертки, расположенных перпендикулярно направлению движения, показано оптимальность выбора такого треугольного тестового участка, в котором с увеличением азимутальной погрешности при движении спутника растет и длина строки развертки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОПТИМИЗАЦИЯ, КАЛИБРОВКА, ТЕСТОВЫЙ УЧАСТОК, СПЕКТРОРАДИОМЕТР, СТРОКА РАЗВЕРТКИ, ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_3

<https://elibrary.ru/vbjqkp>

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление спутников дистанционного зондирования с тепловыми каналами связано с необходимостью изучения температуры земной поверхности (*LST*). Важность изучения этого физического показателя объясняется его важной ролью в процессах изменения климата, энергообменом между земной поверхностью и атмосферой, водного цикла. Изучение указанных процессов осуществляются как в региональных, так и планетарных масштабах используя различных технологии теплового дистанционного зондирования [1–6].

Специфика исследования температуры земной поверхности такова, что из-за инерционности физических процессов распространения тепла большая информативность спутниковых данных теплового диапазона может быть обеспечена путем возможного увеличения широты охвата рассматриваемой полосы на поверхности Земли. При этом актуальным оказывается правильный выбор размеров пикселя, чтобы достичь оптимальных энергоинформационных характеристик радиационных потоков, поступающих на вход дистанционного измерителя.

Наиболее яркими представителями спутниковых спектрорадиометров, оснащенных тепловыми каналами, являются сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения MODIS и



мультиспектральный сканирующий спектрорадиометр VIMS [7], установленный на китайском спутнике дистанционного зондирования GF-5 [8].

Вместе с тем, методические и натурные сложности, возникающие при калибровке тепловых каналов ИК радиометров, приводят к необходимости проведения кросс калибровки таких приборов, функционирующих уже на орбите. Согласно [9,10], такая кросс калибровка с использованием хорошо откалиброванного измерителя является альтернативой для улучшения калибровочных характеристик вновь эксплуатируемого измерителя. В качестве новейшего примера реализации, такой кросс калибровки можно указать работу [11], в которой подробно описана процедура калибровки третьей и четвертой каналов TIR спектрорадиометра VIMS на борту GF-5 с использованием данных MODIS. Вместе с тем стремление к дальнейшему повышению точности вновь эксплуатируемых устройств диктует необходимость подкоррекции методологических основ функционирования ранее созданных аналогичных средств, в частности MODIS, функционирующего на борту спутников Aqua и Terra. Например, в работе [11] проанализирована типичная погрешность широкополосных спектрорадиометров на примере MODIS. Как указывается в этой работе, ширина охвата MODIS составляет 2330 км, что приводит к увеличению зенитного угла крайних пикселей охвата до 60° и более. Как результат, возникают амплитудные погрешности при съеме радиометрического сигнала из-за углового эффекта [12], а также из-за пространственной изменчивости атмосферного пропускания [13]. В работе [11] с использованием модели атмосферы MODTRAN проведены вычисления потери радиационных потоков из-за вышеуказанных эффектов, влияющих на каналах 31 и 32 MODIS. Для оценки указанных потерь введен специальный показатель “отношение разности радиации” ($R(\theta)$), определяемый как

$$R(\theta) = \frac{Ra(\theta) - R_n}{R_n} \quad (1)$$

где: $Ra(\theta)$ -радиация, получаемая на верхней границе атмосферы при зенитном угле θ ; R_n -радиация, получаемая в надире ($\theta = 0$).

Соответствующие графики $R(\theta)$, для летного и зимнего сезонов, показаны на рис. 1.

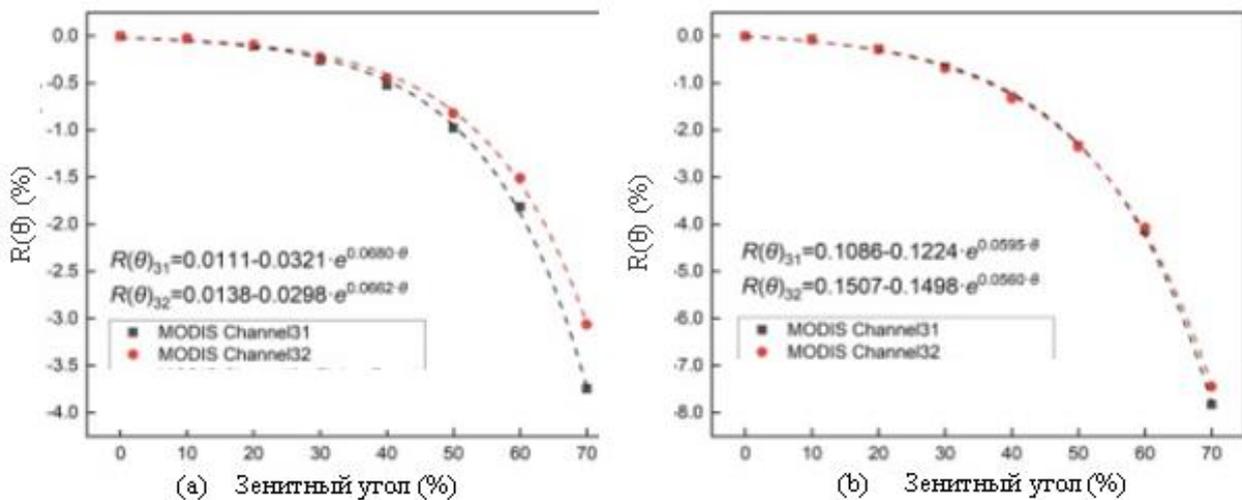


Рис. 1. Кривые показателя $R(\theta)$ в зимнем сезоне (a) и в летном сезоне (b)

Аналитические формулы, полученные в [11] для вычисления $R(\theta)$ приведены в табл. 1.

Табл. 1. Формулы для вычисления $R(\theta)$

Канал №	Зимний сезон	Летный сезон
31	$R(\theta)_{31} = 0,0111 - 0,0321e^{0,0680\theta}$	$R(\theta)_{31} = 0,1086 - 0,1224e^{0,0595\cdot\theta}$
32	$R(\theta)_{32} = 0,0138 - 0,0298e^{0,0682\theta}$	$R(\theta)_{32} = 0,1507 - 0,1498e^{0,0560\cdot\theta}$

Таким образом, в вышеупомянутой работе, учитывая уменьшение радиации на входе радиометра при больших углах зенита предлагается корректировать считанный сигнал $R_{obs}(\theta)$ следующим образом:

$$R_n^{cor} = R_{obs}(\theta) \cdot [1 - R(\theta)] \quad (2)$$

Вместе с тем коррекция типа (2) является обычным масштабированием, что по сути увеличит как полезный сигнал, так и шумы в системе. Как результат, увеличение отношение сигнал/шум, а также информативности вряд ли следует ожидать. Целью настоящей статьи является оптимизация межкалибровки широкоохватных термальных каналов аналогичных спектрорадиометров с использованием треугольных тестовых участков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализируем вопрос о выборе конфигурации предлагаемого треугольного тестового участка на траектории прохождения MODIS на поверхности Земли (рис. 1).

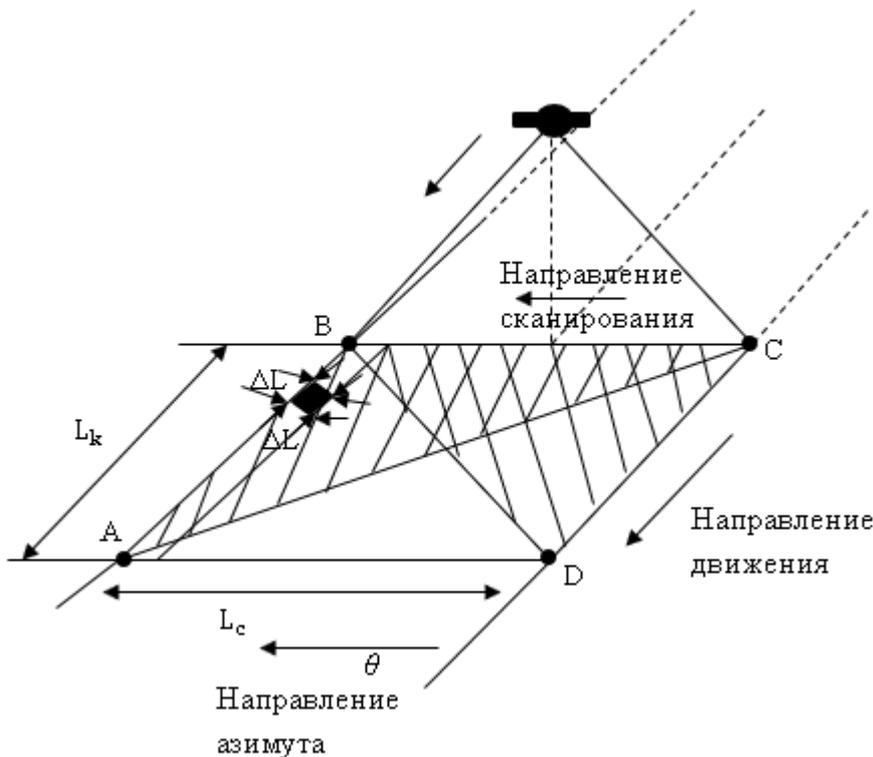


Рис. 2. Схематическое представление движения на орбите спектрорадиометра MODIS, формирования двух предполагаемых тестовых участков треугольного типа ABC и BCD, а также пикселя размерами $\Delta L \times \Delta L$

Как видно из сцены, изображенной на рис. 2, в ходе полета MODIS на борту спутника дистанционного зондирования можно выделить два воображаемых тестовых участка: ABC и BCD, измерительные данные с которых далее могут быть использованы для межкалибровки аналогичного широкоохватного ИК спектрорадиометра, например, спектрорадиометра VIMS на борту китайского спутника GF-5. Оптимизация межкалибровки вышеуказанных спектрорадиометров далее одного из выше рассмотренных треугольных тестовых участков по критерию минимума информационных потерь из-за широкоохватности сканирования, приводящего специфическим азимутальным потерям, изложенным выше. Изложим порядок проводимой оптимизации. Формулы, приведенные в таблице, в общем случае выразим следующим образом:

$$R(\theta) = a_1 - a_2 \exp(a_3 \theta) \quad (3)$$

С учетом (1) и (3) получим

$$\frac{Ra(\theta) - R_n}{R_n} = a_1 - a_2 \exp(a_3 \theta) \quad (4)$$

Из (4) при

$$\Delta R = R_n - Ra(\theta) \quad (5)$$

Получим

$$\Delta R = R_n [a_2 \exp(a_3 \theta) - a_1] \quad (6)$$

где Δ -радиационные потери, возникающие из-за увеличения угла азимута θ при считывании информации с края строки сканирования на верхней границе атмосферы.

Суть проводимой оптимизации заключается в вычислении количества информации, теряемой из-за потерь ΔR и выбора такой взаимосвязи между показателями L_k и θ , при которой указанные информационные потери минимальны. На основе выбранного типа взаимосвязи L и θ осуществляется выбор одного из вышеуказанных треугольных тестовых участков. С учетом (6) количество информации M , теряемого на строке длиной L определим как

$$M = \frac{L_k}{\Delta L} \log_2 \left[\frac{R_n (a_2 \exp(a_3 \theta) - a_1)}{\sigma} \right] \quad (7)$$

где: σ – шумы в системе.

Далее, введем на рассмотрение функцию связи

$$\theta = \theta(L_k) \quad (8)$$

С учетом конфигурации тестового участка ABC множество

$$L_k = \{L_{ki}\}; \quad i = \overline{1, n} \quad (9)$$

Является упорядоченным, т. е.

$$L_{ki} = L_{k,i-1} + \Delta L_k; \quad \Delta L_k = const; \quad L_{k0} = 0 \quad (10)$$

С учетом (8) рассмотрим следующие суммы:

$$M_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{ki}}{\Delta L} \log_2 \left[\frac{R_n(a_2 \exp(a_3 \theta)) - a_1}{\sigma} \right] \quad (11)$$

$$M_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n \theta(L_{ki}) = C \quad (12)$$

Ограничение, наложенное на сумму (12), указывает постоянство соответствующей суммы значений углов азимута для обоих треугольных тестовых участков. Условно считая L_k непрерывной величиной, можно написать следующие непрерывные аналоги сумм (11) и (12).

$$M_{H1} = \int_0^{L_{kmax}} \frac{L_k}{\Delta L} \log_2 \left[\frac{R_n(a_2 \exp(a_3 \theta(L_k))) - a_1}{\sigma} \right] dL_k \quad (13)$$

$$M_{H2} = \int_0^{L_{kmax}} \theta(L_k) dL_k = C \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) составим вариационную оптимизационную задачу для вычисления оптимальной функции $\theta(L_k)$ при которой M_{H1} достиг бы минимальной величины, т. е. радиационные потери обусловились бы минимальными информационными потерям. Целевой функционал F этой задачи имеет вид:

$$F = \int_0^{L_{kmax}} \frac{L_k}{\Delta L} \log_2 \left[\frac{R_n(a_2 \exp(a_3 \theta(L_k))) - a_1}{\sigma} \right] dL_k + \lambda \left[\int_0^{L_{kmax}} \theta(L_k) dL_k - C \right] \quad (15)$$

где: λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (15) согласно [14] должно удовлетворить условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{L_k}{\Delta L} \log_2 \left[\frac{R_n(a_2 \exp(a_3 \theta(L_k))) - a_1}{\sigma} \right] + \lambda \theta(L_k) \right\}}{d\theta(L_k)} = 0 \quad (16)$$

Из условия (16) находим

$$\frac{L_k}{a_0} \cdot \frac{a_2 a_3 \exp(a_3 \theta(L_k))}{(a_2 \exp(a_3 \theta(L_k)) - a_1)} + \lambda = 0 \quad (17)$$

где: $a_0 = \Delta L \cdot \ln 2$.

Из (17) получим:

$$\theta(L_k) = \frac{1}{a_3} \ln \frac{\lambda \cdot a_0 a_1}{L_k a_2 a_3 + \lambda \cdot a_0 a_2} \quad (18)$$

Таким образом, при решении (18) функционал F достигает экстремума. Для определения типа экстремума определим знак производной (17) по $\theta(L_k)$. Проведенный анализ показывает, что эта производная равна $(-a_2^2 a_3^2 a_0 a_1)$, т. е. всегда отрицательное число. Следовательно, при решении (18) искомые информационные потери достигают максимума. Этот вывод дает основание в качестве оптимального выбрать такую конфигурацию треугольного тестового участка, в котором L_k и θ изменяются прямопропорционально, т. е. участок ABD (рис. 2). Таким образом, при использовании

тестового участка ABD для калибровки ИК спектро радиометров информационные потери из-за широкополосности измерителей могут быть минимизированы.

Что касается вопроса вычисления множителя Лагранжа λ , то для этого можно воспользоваться выражениями (14) и (18), осуществив соответствующее интегрирование вычислить λ . Этот вопрос целиком является задачей прикладной математики и здесь не рассматривается.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована и решена задача оптимизации калибровки широкополосных ИК спектро радиометров, предназначенных для измерения температуры наземных объектов. Предлагается осуществить калибровку на базе данных, получаемых от одного из геометрически идентичных тестовых участков треугольного типа, формируемых по траектории прохождения спутника. С учетом известных данных о возникновении азимутальных погрешностей по мере увеличения длины строки развертки расположенной перпендикулярно направлению движения, показано оптимальность выбора такого треугольного тестового участка, в котором с увеличением азимутальной погрешности растет и длина строки развертки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wan Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product// Remote Sens. Environ. 140. P. 36-45. 2014.
2. Li Z. L., Tang B. H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I. F., Sobrino J. A. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives// Remote Sens. Environ. 131. P. 14-37. 2013.
3. Duan S. B., Li Z. L., Li H., Gottsche F. M., Wu H., Zhao W., Leng P., Zhang X., Coll C. Validation of collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements// Remote Sens. Environ. 225. P. 16-29. 2019.
4. Li H., Li R., Yang Y., Cao B., Bian Z., Hu T., Du Y., Sun L., Liu Q. Temperature-based and radiance-based validation of the collection 6 MYD11 and MYD21 land surface temperature products over barren surfaces in Northwestern China// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 59. P. 1794-1807. 2021.
5. Ren H., Liu R., Qin Q., Fan W., Yu L., Du C. Mapping finer-resolution land surface emissivity using landsat images in China// J. Geophys. Res. Atmos. 122. P. 6764-6781. 2017.
6. Zheng Y., Ren H., Guo J., Ghent D., Tansey K., Hu X., Nie J., Chen S. Land surface temperature retrieval from sentinel-3A sea and land surface temperature radiometer, using a split-window algorithm// Remote Sens. 11. 2019.
7. Ren H., Ye X., Liu R., Dong J., Qin Q. Improving land surface temperature and emissivity retrieval from the Chinese gaofen-5 satellite using a hybrid algorithm// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 56. P. 1080-1090. 2018.
8. Ye X., Ren H., Liu R., Qin Q., Liu Y., Dong J. Land surface temperature estimate from Chinese gaofen-5 satellite data using split-window algorithm// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 55. P. 5877-5888. 2017.
9. Barsi J., Schott J., Hook S., Raqueno N., Markham B., Radocinski R. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration// Remote sens. 6. P. 11607-11626. 2014.
10. Meng X., Cheng J. Estimating land and sea surface temperature from cross-calibrated Chinese Gaofen-5 thermal infrared data using split-window algorithm// IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 17. P. 509-513. 2020.
11. Ye X., Ren H., Liang Y., Zhu J., Guo J., Nie J., Zeng H., Zhao Y., Qian Y. Cross-calibration of Chinese gaofen-5 thermal infrared images and its improvement on land surface temperature retrieval// International J. Applied Earth observations Geoinformation. 101. 2022.
12. Ren H., Yan G., Chen L., Li Z. Angular effect of MODIS emissivity products and its application to the split-window algorithm// ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 66. P. 498-507. 2011.
13. Qin Z., Dallolmo G., Karnieli A., Berliner P. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advances very high resolution radiometer data// J. Geophys. Res. Atmos. 106. P. 22655-22670. 2001.
14. Эльсгольц Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление// М. Наука. 1974. С. 432.

METHOD FOR INCREASING THE INFORMATIONAL CONTENT OF CALIBRATION BROADBAND REMOTE SENSING SATELLITES IN THE THERMAL RANGE WITH OPTIMAL CHOICE OF TRIANGULAR TEST SITES CONFIGURATION

Aliyeva A.J.

The article is devoted to the optimization of calibration of broadband IR spectroradiometers designed to measure the temperature of ground objects. It is proposed to carry out calibration on the basis of data obtained from one of the geometrically identical test sections of the triangular type formed along the trajectory of the satellite. Taking into account the known data on the occurrence of azimuthal errors as the length of the scan lines perpendicular to the direction of motion increases, the optimality of choosing such a triangular test section is shown, in which the length of the scan line also increases with increasing azimuthal error during satellite movement.

KEYWORDS: OPTIMIZATION, CALIBRATION, TEST SITE, SPECTRORADIOMETER, SCAN LINE, EARTH SURFACE TEMPERATURE