

## Научная статья

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ  
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

УДК 622.232.72

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-56-61

Велиев Гасан Саркар оглы

Азербайджанский Технический Университет

\*E-mail: veliyev.n.g.@mail.ru

**ВОПРОСЫ ДВУХЭТАПНОЙ КАЛИБРОВКИ УСТРОЙСТВ ПАССИВНОГО  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Аннотация.**

Солнечные фотометры, будучи приборами пассивного дистанционного зондирования, являются наиболее распространенными измерительными инструментами из набора измерительных средств, предназначенных для исследования различных показателей атмосферной оптики. Солнечные фотометры позволяют измерить некоторые малые газы, аэрозоли, водные пары, а также показатели излучения Солнца. Работа этого прибора основывается на законе Бугера-Бера, основной задачей достижения высокой точности проводимых измерений с помощью солнечных фотометров является их калибровка. Калибровка солнечного фотометра в режиме пассивного дистанционного зондирования атмосферы или показателей солнца состоит из двух последовательно осуществляемых процедур калибровки: внешняя калибровка и внутренняя калибровка. Целью внешней калибровки является нахождение соответствия между исходным излучением Солнца, или внеатмосферным излучением. Задачей внутренней калибровки солнечного фотометра является нахождение соответствия между входным оптическим сигналом и выходным электрическим сигналом фотометра. Важной задачей любого измерительного инструмента дистанционного зондирования является его правильная внешняя калибровка. Для внешней калибровки солнечных фотометров обычно используют метод диаграмм Лэнгли, базирующийся на законе Бугера-Бера. Вместе с тем как сам метод диаграмм Лэнгли, так и его различные аналитические версии имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что вся процедура калибровки должна осуществляться в течение некоторого периода времени, когда оптическая толщина атмосферного аэрозоля существенно изменяется. Предложен двухэтапный метод калибровки устройств пассивного дистанционного зондирования, в качестве примера которого рассмотрен трехволновый солнечный фотометр, в котором осуществляется коррекция воздействия атмосферного аэрозоля путем введения промежуточного расчетного параметра и коэффициентов коррекции. В качестве первого этапа калибровки находится коэффициент калибровки между внеатмосферной солнечной радиацией и входной оптической радиацией Солнца. В качестве второго этапа калибровки находится коэффициент калибровки между входными и выходными сигналами фотометра. Общий коэффициент калибровки оказывается равным произведению вышеуказанных двух частных коэффициентов.

**Информация о статье**

Поступила:

15 сентября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

14 октября 2022 г.

**Ключевые слова:**

пассивное зондирование, солнечный фотометр, калибровка, аэрозоль, малые газы.

**Для цитирования:** Велиев Г.С. Вопросы двухэтапной калибровки устройств пассивного дистанционного зондирования // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6 (164). С. 56-61. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-56-61

## Введение

Пассивное дистанционное зондирование в качестве концепции удаленных измерений содержит два основных режима проведения дальних измерений: (1) извлечение спектральной или амплитудно-временной информации об удаленных объектах с использованием собственного термального излучения этих же объектов; (2) извлечение такого же типа информации об объектах, находящихся на пути распространения термального излучения удаленного излучения. Солнечные фотометры, реализующие концепцию пассивного дистанционного зондирования, являются наиболее распространенными измерительными инструментами из набора измерительных средств, предназначенных для исследования различных показателей атмосферной оптики. С помощью солнечных фотометров могут быть измерены различные газы (при гиперспектральной или обычной конструкции прибора), аэрозоли, водяные пары, а также показатели излучения Солнца. Работа этого прибора основывается на законе Бугера-Бера, математическое выражение которого имеет вид [1]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-m\tau_{atm}(\lambda)] \quad (1)$$

где:  $I(\lambda)$  – солнечная оптическая радиация (поток) на входе прибора;  $I_0(\lambda)$  – внеатмосферная солнечная радиация;  $\tau_{atm}(\lambda)$  – оптическая воздушная масса.

Солнечные фотометры составляют основу всемирной измерительной сети AERONET, состоящей из более чем 500 автоматических солнечно-фотометрических станций [2], а также различных региональных измерительных сетей [3-6]. Основной задачей достижения высокой точности проводимых измерений с помощью солнечных фотометров является их калибровка.

Схема проведения пассивного дистанционного зондирования с помощью солнечного фотометра приведена на рис. 1.

Калибровка солнечного фотометра в режиме пассивного дистанционного зондирования атмосферы или показателей солнца состоит из двух процедур калибровки:

1. Внешняя калибровка;
2. Внутренняя калибровка.

Целью внешней калибровки является нахождение соответствия между исходным излучением Солнца, или внеатмосферным излучением  $I_0(\lambda)$  на длине волны  $\lambda$ , и входной оптической радиацией фотометра, т.е.  $I(\lambda)$ :

$$I(\lambda) = d \cdot I_0(\lambda) \quad (2)$$

где  $d$  – коэффициент внешней калибровки.

Задачей внутренней калибровки солнечного фотометра является нахождение соответствия между входным оптическим сигналом  $I(\lambda)$  и выходным электрическим сигналом фотометра  $I(\lambda)_{\text{вых}}$ , т.е.

$$I(\lambda)_{\text{вых}} = P \cdot I(\lambda) \quad (3)$$

где  $P$  – коэффициент внутренней калибровки.

С учетом (2) и (3) получим

$$I(\lambda)_{\text{вых}} = P \cdot d \cdot I_0(\lambda) \quad (4)$$

Примем  $C = P \cdot d$ , где  $C$  – коэффициент общей калибровки.

В этом случае получаем

$$I(\lambda)_{\text{вых}} = C \cdot I_0(\lambda) \quad (5)$$

Важной задачей любого измерительного инструмента дистанционного зондирования является его правильная внешняя калибровка. Для внешней калибровки солнечных фотометров обычно используют метод диаграмм Лэнгли, суть которого состоит в следующем. Уравнение (1) приводится к виду:

$$\ln I_0(\lambda) = m \cdot \tau(\lambda) + \ln I(\lambda) \quad (6)$$

Далее проводятся измерения  $I(\lambda)$  при двух значениях  $m$ , т.е.  $m_1$  и  $m_2$  (рис. 2).

Далее осуществляется экстраполяция кривой в направлении  $m \rightarrow 0$ . По пересечению экстраполированной линии  $A(m_1)A(m_2)$  с ординатной осью дает величину  $\ln I_0(\lambda)$ , значение которого позволяет откалибровать прибор. В последнее время также появились различные расчетные версии метода диаграмм Лэнгли [7,8], суть которых также заключается в аналитическом вычислении величины  $I_0(\lambda)$ .

Вместе с тем как сам метод диаграмм Лэнгли, так и его различные аналитические версии имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что вся процедура калибровки должна осуществляться в течение некоторого периода времени, когда оптическая воздушная масса изменяется между двумя дискретными значениями  $m_1$  и  $m_2$ .

В течение соответствующего интервала времени оптическая толщина атмосферы может значительно измениться, что приведет к существенному искривлению линии  $A(m_1)A(m_2)$ . Отметим, что основной причиной изменения оптической толщины атмосферы является нестабильность атмосферного аэрозоля [9,10] [11,12]. Выходом из положения здесь является проведение всех необходимых измерений одновременно, возможно, на различных длинах волн.

## Предлагаемый метод

Предлагаемый многоволновый метод вычисления калибрационных постоянных солнечного фотометра базируется на линейной модели оптической толщины аэрозоля, согласно которой оптическая толщина аэрозоля  $\tau_{aer}(\lambda)$  является линейной суммой следующих составляющих:

$$\tau_{aer}(\lambda) = \tau_f(\lambda) + \tau_{ac}(\lambda) + \tau_c(\lambda) \quad (7)$$

где:  $\tau_f(\lambda)$  – оптическая толщина мелкодисперсной фракции атмосферного аэрозоля;  $\tau_{ac}(\lambda)$  – оптическая толщина среднелдисперсной (или аккумуляционной) фракции аэрозоля;  $\tau_c(\lambda)$  – оптическая толщина крупнодисперсной фракции аэрозоля.

Следует отметить, что линейная модель (7) верна для послойного расположения аэрозольных облаков, являющихся результатом эмиссии из различных источников. При этом логично ожидать, что более крупные аэрозольные частицы будут располагаться ближе к земле, чем менее крупные [13]. Впервые линейная модель аэрозоля была применена в работах [14, 15] для компенсации влияния

атмосферного аэрозоля на точность солнечно-фотометрических измерений.

Алгоритм реализации предлагаемого метода может быть изложен в виде последовательности следующих операций:

1. Выбор в видимой области длин волн электромагнитного излучения Солнца четырех значений длин волн ( $\lambda_i$ ;  $i = \overline{1,4}$ ), при которых поглощение каких-либо атмосферных газов отсутствует.

2. Проведение измерений на всех четырех длинах волн одновременно согласно выражению (1).

3. Составление промежуточного параметра  $\gamma_i$ , включающего корректирующие коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$ .

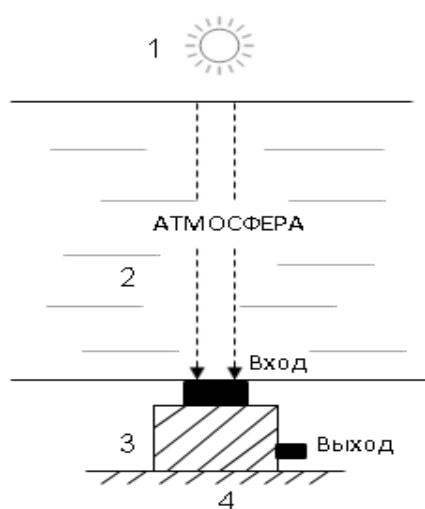


Рис. 1. Схема проведения пассивного дистанционного зондирования с помощью солнечного фотометра. Цифрами обозначены: 1 – Солнце; 2 – атмосфера; 3 – солнечный фотометр; 4 – земля

Fig. 1. Scheme of passive remote sensing using a solar photometer. The numbers indicate: 1 – the Sun; 2 – the atmosphere; 3 – the solar photometer; 4 – the earth

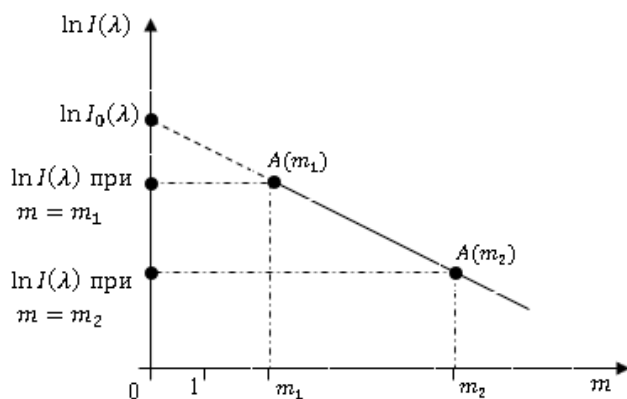


Рис. 2. Графическая интерпретация метода диаграмм Лэнгли

Fig. 2. Graphical interpretation of the Langley diagram method

4. Составление системы линейных уравнений для вычисления корректирующих коэффициентов.

5. Четырехкратная ротация членов в формуле составления  $\gamma_i$  и повтор операций 3 и 4 для вычисления  $\gamma_i$ ;  $i = \overline{1,4}$ .

6. Составление системы линейных уравнений относительно  $\frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}$ ;  $i = \overline{1,4}$  и вычисление  $I_0(\lambda_i)$ .

Подробно изложим математические основы реализации вышеизложенных операций.

В результате проведения второй операции вышеизложенного алгоритма получаем следующую систему уравнений:

$$I(\lambda_i) = I_0(\lambda_i) \cdot \exp[-(\tau_f(\lambda_i) + \tau_{ac}(\lambda_i) + \tau_c(\lambda_i))] \quad (8)$$

где  $i = \overline{1,4}$ .

Далее формируются промежуточные параметры  $\gamma_j$ ,  $j = \overline{1,4}$ .

На основе (8) первый промежуточный параметр  $\gamma_j$  формируется следующим образом:

$$\gamma_1 = \frac{\left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right]^{k_{11}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right]^{k_{21}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right]^{k_{31}}}{\left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right]} \quad (9),$$

где  $k_{ij}$ ;  $i = \overline{1,3}$ , – коэффициенты коррекции.

С учетом (8) и (9):

$$\gamma_1 = \exp[k_{11}\tau_f(\lambda_1) + k_{11}\tau_{ac}(\lambda_1) + k_{11}\tau_c(\lambda_1) + k_{21}\tau_f(\lambda_2) + k_{21}\tau_{ac}(\lambda_2) + k_{21}\tau_c(\lambda_2) + k_{31}\tau_f(\lambda_3) + k_{31}\tau_{ac}(\lambda_3) + k_{31}\tau_c(\lambda_3) - \tau_f(\lambda_4) - \tau_{ac}(\lambda_4) - \tau_c(\lambda_4)] \quad (10)$$

Для достижения условия  $\gamma_1 = 1$  с учетом (10) сформируем следующую систему уравнений относительно  $k_{i1}$ ;  $i = \overline{1,3}$

$$\left. \begin{aligned} k_{11}\tau_f(\lambda_1) + k_{21}\tau_f(\lambda_2) + k_{31}\tau_f(\lambda_3) &= \tau_f(\lambda_4) \\ k_{11}\tau_{ac}(\lambda_1) + k_{21}\tau_{ac}(\lambda_2) + k_{31}\tau_{ac}(\lambda_3) &= \tau_{ac}(\lambda_4) \\ k_{11}\tau_c(\lambda_1) + k_{21}\tau_c(\lambda_2) + k_{31}\tau_c(\lambda_3) &= \tau_c(\lambda_4) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

После решения системы уравнений (11) с учетом (9) запишем

$$1 = \frac{\left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right]^{k_{11}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right]^{k_{21}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right]^{k_{31}}}{\left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right]} \quad (12)$$

Логарифмируя (12), получим

$$k_{11} \ln \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right] + k_{21} \ln \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right] + k_{31} \ln \left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right] = \ln \left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right] \quad (13)$$

Далее путем ротации формируются следующие промежуточные параметры:

$$\gamma_2 = \frac{\left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right]^{k_{42}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right]^{k_{12}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right]^{k_{32}}}{\left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right]} \quad (14)$$

$$\gamma_3 = \frac{\left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right]^{k_{33}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right]^{k_{43}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right]^{k_{13}}}{\left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right]} \quad (15)$$

$$\gamma_4 = \frac{\left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)}\right]^{k_{24}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)}\right]^{k_{34}} \cdot \left[\frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)}\right]^{k_{44}}}{\left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)}\right]} \quad (16)$$

Проведя операции (10), (11), (12) для всех  $\gamma_i$ , получаем линейные уравнения, аналогичные (13).

$$k_{42} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)} \right] + k_{12} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \right] + k_{22} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)} \right] = \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)} \right] \quad (17)$$

$$k_{33} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)} \right] + k_{43} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)} \right] + k_{13} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \right] = \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)} \right] \quad (18)$$

$$k_{24} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)} \right] + k_{34} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_3)}{I(\lambda_3)} \right] + k_{44} \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_4)}{I(\lambda_4)} \right] = \ln \left[ \frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \right] \quad (19)$$

Решение системы уравнений (13), (17), (18), (19) позволяет вычислить соотношения

$$\left. \begin{aligned} I(\lambda_1) &= d_1 I_0(\lambda_1) \\ I(\lambda_2) &= d_2 I_0(\lambda_2) \\ I(\lambda_3) &= d_3 I_0(\lambda_3) \\ I(\lambda_4) &= d_4 I_0(\lambda_4) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где  $d_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  – внешние калибровочные коэффициенты.

Для установки внутренних калибровочных коэффициентов, в камере калибровки смоделировав условие

$$\tau_{atm}(\lambda_i) = 0 \quad (21),$$

получим

$$I(\lambda_i)_{\text{вых}} = p_i I(\lambda_i) \quad (22)$$

Следовательно, с учетом (2) и (22) получим

$$\frac{I(\lambda_i)_{\text{вых}}}{p_i} = d_i I_0(\lambda_i)$$

или

$$I(\lambda_i)_{\text{вых}} = p_i d_i I_0(\lambda_i)$$

Окончательно приняв  $C_i = p_i d_i$ , напишем

$$I(\lambda_i)_{\text{вых}} = C_i I_0(\lambda_i)$$

где  $C_i$  – общий коэффициент калибровки.

### Заключение

Предложен метод калибровки устройств пассивного дистанционного зондирования, состоящий из двух этапов. Дан пример реализации метода на базе солнечного фотометра. На первом этапе осуществляется внешняя калибровка, т.е. вычисляется коэффициент калибровки между внеатмосферной солнечной радиацией и входной оптической радиацией Солнца. На втором этапе калибровки находится коэффициент калибровки между входными и выходными сигналами фотометра. Общий коэффициент калибровки оказывается равным произведению вышеуказанных двухчастных коэффициентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lacaze B. About the bidimensional Beer-Lambert law// Tesa 14/16. 6 feb 2012.
2. Tan F., Lim H. S., Abdullah K., Yoon T. L., Holben B. Aeronet data-based determination of aerosol types // Atmospheric Pollution Research. 2015. №6. Pp. 682-695.
3. Sioris C. E., Abboud I., Fioletov V. E., McLinden C. A. AEROCAN, the Canadian sub-network of AERONET: Aerosol monitoring and air quality applications// Atmospheric Environment. 2017. № 167. Pp. 444-447.

4. Che H., Qi B., Zhao H., Xia X., Eck T. F. [etc.] Aerosol optical properties and direct radiative forcing based non measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China// Atmos. Chem. Phys. 18. 405-425. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-405-2018>

5. Dubovik O., Holben B. N., Lapyonok T., Sinyuk A., Mishchenko I., Yang P., Slutsker I. Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids// Geophys. Res. Lett. 29. 54-1-54-4. 2002.

6. Dubovik O., Holben B. N., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations// J. Atm. Sci. 59. 590-608. 2002.

7. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of sun photometers Chinese Optics Letters. 2009. Vol. 7. Issue 9. pp. 760-763

8. Гусейнова Р. О. Двухволновой метод калибровки солнечных фотометров повышенной точности // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 5. С. 393-396.

9. Mao Q., Wan H. Study on the characteristics of aerosol radiative forcing under complex pollution conditions in Beijing // Atmosphere 2022. 13. 501. <https://doi.org/10/3390/atmos13030501>

10. Zhang Q., Shen Z., Lei Y., Wang Y., Zeng Y. [etc.] Variations of particle size distribution, black carbon and brown carbon during a severe winter pollution event over Xi'an, China // Aerosol and Air Quality Research. 18. 1419-1430. 2018.

11. Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S., Sinyuk A., Dubovik O., Smirnov A., Giles D., O'Neill N. T., Tsay S. C., Ji Q., Almandouss A., Ramzan Khan N., Reid E. A., Schafer J. S., Sorojine M., Newcomb W., Slutsker I. Spatial and temporal variability of column-integrated aerosol optical properties in southern Arabian Gulf and United Arab Emirates in summer // J. Geophys. Res. 113. D01204. 2008.

12. Eck T. F., Holben B. N., Dubovik O., Smirnov A., Goloub P., Chen H. B., Chatenet B., Gomes L., Zhang X. Y., Tsay S. C., Ji Q., Giles D., Slutsker I. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific// J. Geophys. Res. 110. D06202. Doi:10.1029/2004JD005274. 2005.

13. Dulac F., Chazette P. Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign (7 June 1997) // Atmos. Chem. Phys. 3. 1817-1831. 2003.

14. Asadov H. H., Mirzabalayev I. M., Aliyev D. Z., Agayev J. A., Azimova S. R. [etc.] Synthesis of corrected multi-wavelength spectrometers for atmospheric trace gases// Chinese optics letters. Vol. 7. No 5. Pp. 361-365. May 10, 2009 .

15. Асадов Х. Г., Исаев А. А. Общая теория трехволновых озонметрических измерений // Измерительная техника. 2005. №8. С.66-68.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Велиев Гасан Саркар оглы.**, диссертант, Азербайджанский Технический Университет (Гусейн Джавид, 107, Баку, Ясамал, AZ1073), e-mail: veliyev.n.g.@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Велиев Г.С. – постановка исследовательской задачи в соавторстве с коллективом лаборатории ремонта и эксплуатации горнотранспортного оборудования; обзор соответствующей литературы; участие в проведении экспериментов; анализ отказов и простоев; аналитические расчеты; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-56-61

**Veliyev Hasan Sarkar oglu**

Azerbaijan Technical University

\*E-mail: veliyev.g.s.@mail.ru

## ISSUES ON TWO-STAGES CALIBRATION OF PASSIVE REMOTE SENSING DEVICES

### **Abstract.**

Solar photometers, being passive remote sensing devices, are the most common measuring instruments from a set of measuring instruments designed to study various indicators of atmospheric optics. Solar photometers allow you to measure some small gases, aerosols, water vapor, as well as solar radiation indicators. The operation of this device is based on the Booger-Behr law, their calibration is the main task of achieving high accuracy of measurements using solar photometers. Calibration of a solar photometer in the mode of passive remote sensing of the atmosphere or solar indicators consists of two calibration procedures performed sequentially: external calibration and internal calibration. The purpose of external calibration is to find a correspondence between the initial radiation of the Sun, or extra-atmospheric radiation. The task of internal calibration of the solar photometer is to find a correspondence between the input optical signal and the output electrical signal of the photometer. The most important task of any remote sensing measuring instrument is its correct external calibration. For external calibration of solar photometers, the Langley diagramming method is usually used, based on the Booger-Baer law. At the same time, both the Langley diagram method itself and its various analytical versions have a significant drawback, which is that the entire calibration procedure must be carried out for a certain period of time when the optical thickness of the atmospheric aerosol changes significantly. A two-stage method of calibration of passive remote sensing devices is proposed, as an example of which a three-wave solar photometer is considered, in which the effect of atmospheric aerosol is corrected by introducing an intermediate calculation parameter and correction coefficients. As the first stage of calibration, the calibration coefficient is found between the extra-atmospheric solar radiation and the input optical radiation of the Sun. As the second stage of calibration, there is a calibration coefficient between the input and output signals of the photometer. The total calibration coefficient turns out to be equal to the product of the above two partial coefficients.



### **Article info**

Received:

15 September 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

14 October 2022

**Keywords:** passive sensing, solar photometer, calibration, aerosol, small gases.

**For citation:** Veliyev H.S. Issues on two-stages calibration of passive remote sensing devices. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 6(164):56-61 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-56-61

## REFERENCES

1. Lacaze B. About the bidimensional Beer-Lambert law// Tesa 14/16. 6 feb 2012.
2. Tan F., Lim H.S., Abdullah K., Yoon T.L., Holben B. Aeronet data-based determination of aerosol types. *Atmospheric Pollution Research*. 6(2015). Pp. 682-695.
3. Sioris C.E., Abboud I., Fioletov V.E., McLinden C.A. AEROCAN, the Canadian sub-network of AERONET: Aerosol monitoring and air quality applications. *Atmospheric Environment*. 2017; 167:444-447.
4. Che H., Qi B., Zhao H., Xia X., Eck T. F. [etc.] Aerosol optical properties and direct radiative forcing based non measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China. *Atmos. Chem. Phys.* 18. 2018; 405-425. <https://doi.org/10.5194/acp-18-405-2018>
5. Dubovik O., Holben B. N., Lapyonok T., Sinyuk A., Mishchenko I., Yang P., Slutsker I. Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids// *Geophys. Res. Lett.* 29. 54-1-54-4. 2002.
6. Dubovik O., Holben B. N., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical mproperties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atm. Sci.* 59. 590-608. 2002
7. Asadov H.H., Chobanzadeh I.G. New method for calibration of sun photometers Chinese Optics Letters. 2009; 7(9):760-763.
8. Huseynova R.O. Two-wave method of calibration of solar photometers of increased accuracy. *Izv. Vuzov. Instrumentation*. 2015; 58:393-396.
9. Mao Q., Wan H. Study on the characteristics of aerosol radiative forcing under complex pollution conditions in Beijing. *Atmosphere*. 2022; 13:501. <https://doi.org/10.3390/atmos13030501>
10. Zhang Q., Shen Z., Lei Y., Wang Y., Zeng Y. [etc.] Variations of particle size distribution, black carbon and brown carbon during a severe winter pollution event over Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research*. 2018; 18:1419-1430.
11. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Sinyuk A., Dubovik O., Smirnov A., Giles D., O'Neill N. T., Tsay S.C., Ji Q., Almandouss A., Ramzan Khan N., Reid E.A., Schafer J.S., Sorojine M., Newcomb W., Slutsker I. Spatial and temporal variability of column-integrated aerosol optical properties in southern Arabian Gulf and United Arab Emirates in summer. *J. Geophys Res.* 113. D01204. 2008.
12. Eck T.F., Holben B.N., Dubovik O., Smirnov A., Goloub P., Chen H.B., Chatenet B., Gomes L., Zhang X.Y., Tsay S.C., Ji Q., Giles D., Slutsker I. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *J. Geophys. Res.* 110. D06202. Doi:10.1029/2004JD005274. 2005
13. Dulac F., Chazette P. Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign (7 June 1997). *Atmos. Chem. Phys.* 3. 1817-1831. 2003
14. Asadov H.H., Mirzabalayev I.M., Aliyev D.Z., Agayev J.A., Azimova S.R. [etc.] Synthesis of corrected multi-wavelength spectrometers for atmospheric trace gases// Chinese optics letters. 2009; 7(5):361-365.
15. Asadov H.H., Isaev A.A. General theory of three-wave ozonometric measurements. *Measuring technique*. 2005; 8:66-68.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

### About the authors:

**Veliyev Hasan Sarkar oglu**, PhD candidate, Azerbaijan Technical University (Huseyn Javid, 107, Yasamal, Baku, AZ1073), e-mail: [veliyev.n.g@mail.ru](mailto:veliyev.n.g@mail.ru)

### Contribution of the authors:

Veliyev G.S. – formulation of a research task in collaboration with the staff of the laboratory for the repair and operation of mining equipment; review of relevant literature; participation in experiments; analysis of failures and downtime; analytical calculations; conclusions; writing a text.

Author have read and approved the final manuscript.

