

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНОВЫСОТНЫХ БАЛЛОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ НАЗЕМНЫХ МИКРОТЕЛЕСКОПОВ СЕТИ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Х. Г. Асадов¹ ✉, У. Ф. Мамедова²

¹ Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Азербайджанская Республика

² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Одним из путей повышения точности наземного отслеживания орбитальных спутников является высокоточная калибровка используемой для этой цели сети микротелескопов. Для этой цели наиболее целесообразно использовать стабильные лазерные источники излучения. На практике в качестве таких источников используются баллонные платформы, поднятые на определенную высоту. Однако использование для калибровки одной фиксированной высоты всех источников может привести к недостаточной величине отношения сигнал/шум из-за непредсказуемых атмосферных явлений, а использование излучателей с различными спектральными характеристиками может усложнить требуемую методику анализа. Нами предложено использование однотипных лазеров и проведение калибровки с использованием платформ, поднятых на разные высоты. Вводится неявная функция зависимости дивергенции луча от высоты поднятия баллона. На эту функцию налагается некоторое интегральное ограничение. Далее исходно принимается, что количество микротелескопов, принимающих оптическое излучение от одного источника, линейно зависит от высоты нахождения данного источника. Требуется вычислить оптимальный вид вводимой неявной функции, при которой специально составленный целевой функционал, численно равный суммарному сигналу калибровки, достигает максимума. Предлагается использовать указанное свойство целевого функционала для проверки правильности проведенной процедуры калибровки. При этом обеспечение требуемого вида введенной ранее неявной функции является технически вполне решаемой задачей, т. к. дивергенция луча является управляемой величиной, а высота подъема платформы может быть измерена с достаточной точностью.

Ключевые слова: калибровка, микротелескопы, оптимизация, измерительная сеть, отслеживание спутников.

Введение

Такие глобальные астрономические события, как расширение вселенной и эффект смещения красной зоны в спектре, а также необходимость отслеживания функционирующих спутников на орбите диктуют необходимость проведения периодической калибровки самих телескопов [1–2].

В качестве примера можно указать сеть наземных микротелескопов OSCOM, предназначенную для оптического слежения спутников CubeSat,

в частности для контроля высоты полета и положения солнечных панелей и антенн спутников. В системе OSCOM используются микротелескопы Celestron 14 Edge HD. Наличие информации об абсолютной яркости свечения необходимо для определения альbedo поверхности спутника. Для калибровки в данном случае используется свет звезд с известной магнитудой.

Как отмечается в [1], проведение калиброванных фотометрических измерений всегда связано с проблемой динамичности атмосферных условий, что обычно приводит к несовпадению фотометрических данных, полученных при различных временных показателях. Здесь также следует учесть такие факторы, как неточность калибровки

✉ asadzade@rambler.ru

фотометров, различные характеристики используемых оптических фильтров, использование различных калибровочных источников и т. д. [3–5].

Аналогичные проблемы существуют в наземной сети микротелескопов, используемой для наблюдения за спутниками CALIPSO [6]. Как отмечено в работе [7], неточная калибровка фотометрических устройств, совместное воздействие затуханий сигнала в видимом и близком ИК диапазонах, вносимых атмосферой и самой измерительной аппаратурой, – являются источником большой неопределенности результатов исследования свойств и величины «темной энергии». Очевидно, что повышение точности калибровки фотометрических измерителей диктует необходимость наличия специальных внешних источников оптической радиации, специально установленных на ракетах или баллонах. Использование в целях калибровки отраженной от спутников солнечной радиации или переотраженной от поверхности Земли солнечной радиации приводит к большой неопределенности результатов измерений из-за нестабильности свойств атмосферы и альбедо Земли.

1. Существующий метод

Наиболее перспективным в решении данного вопроса следует считать использование источников оптической радиации, установленных на высотных баллонах и ракетах. Например, если установить вольфрамовую лампу с мощностью 25 Вт, излучающую оптическую радиацию мощностью 1 Вт в диапазоне 390–780 нм изотропно во всех направленных, то на Земле получим точечный источник со звездной величиной 12,5.

Согласно [7], альтернативой изотропно излучающей и в принципе нестабильной вольфрамовой лампе является лазерный источник, установленный на каком-либо носителе, возможно, на спутнике, или на специальных высотных баллонах. Дивергенция лазерного луча равна нескольким миллирадианам, и магнитуда такого орбитального лазера на уровне Земли определяется следующим выражением:

$$m \approx -2,5 \log_{10} \left(\frac{P}{h^2 d^2} \right) - 20,1, \quad (1)$$

где P – мощность лазера в милливаттах; h – высота орбиты спутника, на котором установлен лазер; d – среднее квадратическое отклонение дивергенции лазерного луча в миллирадианах.

При этом допускаем, что апертура телескопа намного меньше, чем среднее квадратическое отклонение дивергенции луча на уровне Земли.

Согласно [7], разработана программа ALTAIR, согласно которой для калибровки наземных микротелескопов используются диодные лазеры с длинами волны 639 нм, 690 нм, 440 нм

и 532 нм. Согласно работе [8], использование изотропных источников для калибровки обладает тем преимуществом, что результаты измерений оказываются менее чувствительными к относительному углу между источником и наблюдателем. Из-за отсутствия таких идеальных источников в настоящее время используются высотные баллоны, на которых могут быть установлены либо кварцевые-вольфрамовые-галогеновые лампы, либо светоизлучающие диоды, либо плазменные лампы.

Вариант построения платформы, носимой баллоном, показан на рис. 1а, 1б [8].

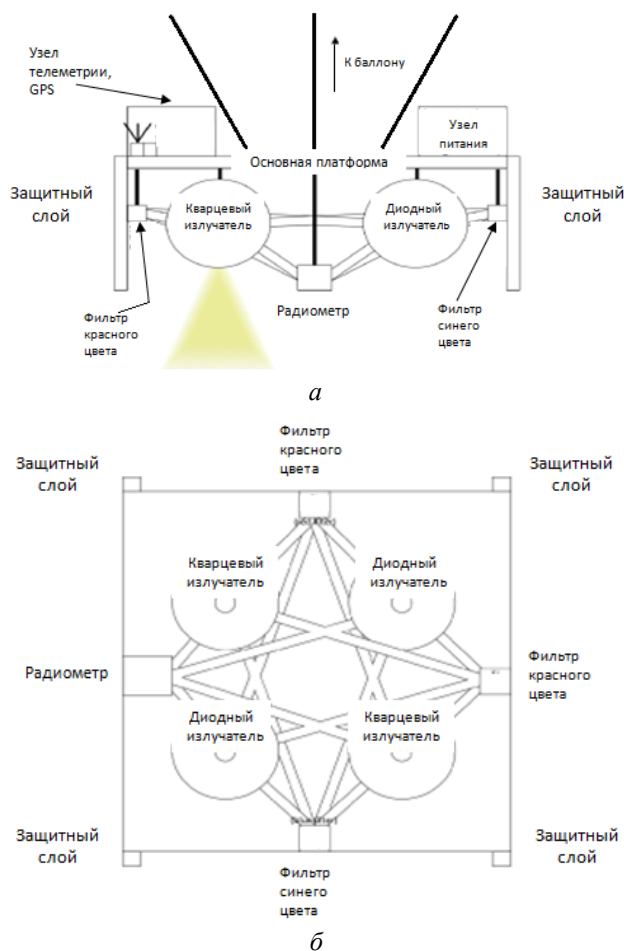


Рис. 1. Схематическое представление платформы, носимой баллоном: а – вид сбоку; б – вид сверху

2. Предлагаемый метод

Основной недостаток баллонного метода калибровки наземных микротелескопов – низкая достоверность результатов калибровки из-за проведения измерений на одной высоте полета и использования различных типов источников света, несогласованных по спектральным характеристикам. Предлагаются следующие изменения в конструкции платформы:

1. Замена всех источников на однотипные лазерные излучатели.

2. Проведение калибровочных процедур на различных высотах.

Вышеуказанное первое нововведение может обеспечить некоторую изотропность излучения за счет дивергенции однотипных лазерных лучей.

Второе нововведение позволит приобрести новый качественный показатель-признак верности проведенной калибровки в виде появления экстремума в суммарном калибровочном сигнале.

Несколько подробно остановимся на втором нововведении. Очевидно, что при предлагаемых нововведениях базовой формулой расчета оказывается выражение (1).

Если учесть, что измерения в предлагаемом методе проводятся на разных высотах в пределах $0 \div h_{max}$, то, условно переходя на непрерывную модель анализа, введем на рассмотрение функцию:

$$d = \varphi(h), \quad (2)$$

показывающую зависимость дивергенции от высоты полета платформы. Далее можно предположить, что с увеличением показателя d также увеличится количество микротелескопов, которые будут охвачены оптическим следом лазерных лучей, исходящих от лазеров на платформе. С учетом вышеуказанного суммарную звездную величину одного излучателя платформы на высоте h оценим как:

$$m_{\Sigma} = -2,5 \cdot k \cdot h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \varphi(h)^2} dh + C(h). \quad (3)$$

$$\frac{d \left\{ - \left[2,5 \cdot k \cdot h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \varphi^2(h)} + C(h) + \lambda [\varphi(h) - C_1] \right] \right\}}{d(\varphi(h))} = 0. \quad (7)$$

Из условия (7) получим следующее выражение:

$$\frac{5 \cdot k \cdot h}{\varphi(h) \cdot \ln 10} + \lambda = 0. \quad (8)$$

Из (8) находим:

$$\varphi(h) = \frac{-5 \cdot k \cdot h}{\lambda \cdot \ln 10}. \quad (9)$$

С учетом выражений (5) и (9) имеем:

$$- \int_0^{h_{max}} \frac{5 \cdot k \cdot h}{\lambda \cdot \ln 10} dh = C_1. \quad (10)$$

Из (10) находим:

$$\lambda = \frac{-5 \cdot k \cdot h_{max}^2}{2C_1 \cdot \ln 10}. \quad (11)$$

С учетом выражений (8) и (11) получим:

$$\varphi(h) = \frac{2 \cdot C_1 \cdot h}{h_{max}^2}. \quad (12)$$

Интегрируя (3) по всем h в пределах $(0 \div h_{max})$, получим:

$$m_{инт} = - \int_0^{h_{max}} 2,5 \cdot k \cdot h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \varphi^2(h)} dh + \int_0^{h_{max}} C \cdot h dh. \quad (4)$$

Для решения задачи вычисления оптимальной функции $\varphi(h)$ рассмотрим следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{h_{max}} \varphi(h) dh = C_1, \quad (5)$$

где $C_1 = \text{const}$. С учетом выражений (4) и (5) сформируем функционал безусловной вариационной оптимизации F , который представляется в виде суммарного калибровочного сигнала:

$$F = - \int_0^{h_{max}} 2,5 \cdot k \cdot h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \varphi^2(h)} dh + \int_0^{h_{max}} C \cdot h dh + \lambda \left[\int_0^{h_{max}} \varphi(h) dh - C_1 \right]. \quad (6)$$

Хорошо известно [9; 10], что решение задач типа (5) и (6) должно удовлетворить условию:

Таким образом, при решении (12) целевой функционал (6) достигает экстремума. Для определения типа экстремума достаточно определить знак второй производной интегранта в (6) по $\varphi(h)$ и убедиться, что она всегда отрицательна, т. е. при решении (12) функционал цели (6) достигает максимума.

Обладающий таким свойством суммарный калибровочный сигнал, количественно определяемый выражением (4), может быть использован в качестве экстремального показателя верности проводимой калибровки микротелескопов.

3. Модельные исследования

Проведем модельное исследование для проверки верности полученного результата.

Методика проверки состоит в следующем.

1. Определяется пара функций, отвечающих условию (5). Одной из этих функций выберем функцию (12). Вторую функцию определим из условия:

$$\int_0^{h_{\max}} \varphi_2(h) dh = C_1, \quad (13)$$

где

$$C_1 = \frac{A \cdot h_m}{2}, \quad (14)$$

$$A = \frac{2C_1}{h_m}. \quad (15)$$

Можно показать, что если выбрать φ_2 в виде линейной функции

$$\varphi_2(h) = \frac{2C_1}{h_m} - \frac{A \cdot h}{h_m}, \quad (16)$$

то условие (13) выполняется (рис. 2).

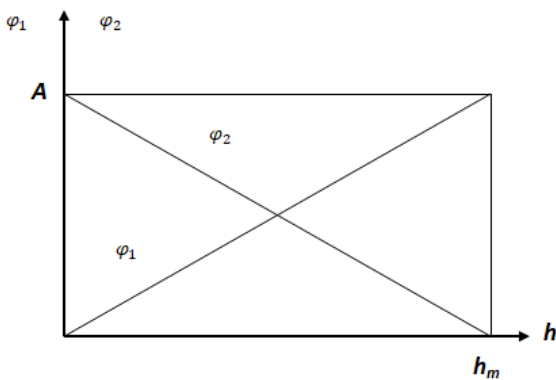


Рис. 2. К выбору функции φ_2

2. Исследуется экстремум первого члена в целевом функционале (6) без постоянных множителей, т. е.:

$$F_1 = - \int_0^{h_m} h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \varphi^2(h)} dh. \quad (17)$$

Для этого ставим решение (12) в (17). Получим:

$$F_1(\varphi_1) = - \int_0^{h_m} h \cdot \log_{10} \frac{P \cdot h_{\max}^4}{4C_1^2 h^4} dh. \quad (18)$$

Ставим выражение (16) в (17). Получаем:

$$F_1(\varphi_2) = - \int_0^{h_m} h \cdot \log_{10} \frac{P}{h^2 \left(\frac{2C_1}{h_m} - \frac{A \cdot h}{h_m} \right)^2} dh. \quad (19)$$

Следует построить графики интегрантов в (18) и (19) и далее визуально оценить площади под ними.

Примем модельные величины:

$$A=1; h_m=1; C_1=1; P=1. \quad (20)$$

Таким образом, следует построить графики функций:

$$S_1(h) = -h \cdot \log_{10} \frac{10}{4h^4}, \quad (21)$$

$$S_2(h) = -h \cdot \log_{10} \frac{10}{h^2(2-h)^2}, \quad (22)$$

в интервале $h=0 \div 1$.

Построенные графики $S_1(h)$ и $S_2(h)$ приведены на рис. 3. Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, площадь участка под кривой 1 значительно больше площади участка под кривой 2. Следовательно, функционал цели (6) при решении (12) получает большее значение, чем при выборе функции (16). Таким образом, подтверждается оптимальность решения (12).

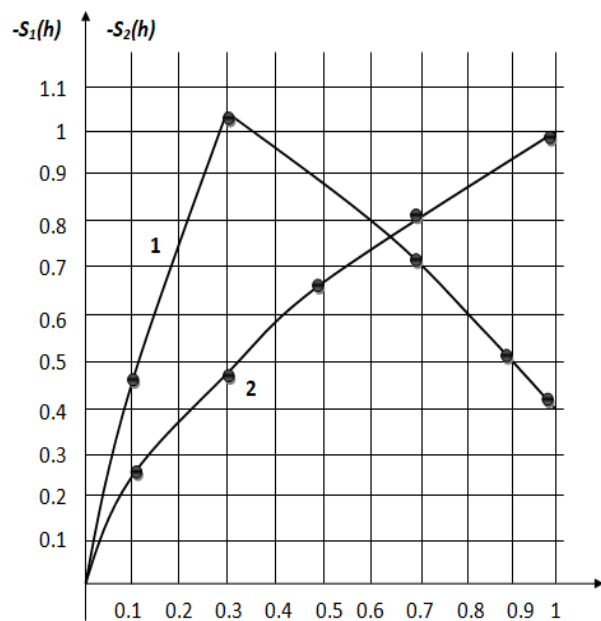


Рис. 3. Графики функций $S_1(h)$ и $S_2(h)$. Принятые обозначения: 1 – график функции $S_1(h)$; 2 – график функции $S_2(h)$

Заключение

Показано, что требование дальнейшего повышения точности наземного отслеживания орбитальных спутников диктует необходимость повышения точности калибровки используемой для этой цели сети микротелескопов. Для этой цели используются внешние стабильные источники излучения в виде лазера, устанавливаемые на баллонных платформах, поднятых на одинаковую высоту.

Однако, осуществление калибровки всего лишь на одной высоте может привести к недостаточной величине отношения сигнал/шум, а использование излучателей с различными спектральными характеристиками может усложнить требуемую методику анализа. Нами предложено использование однотипных лазеров и проведение

калибровки на множестве высот поднятия платформ. При этом если соблюдено принятое ограничительное условие, то оказывается, что суммарный калибровочный сигнал при соблюдении некоторого оптимального условия может достигнуть экстремального значения. Предлагается использовать указанное свойство для проверки правильности проведенной процедуры калибровки.

Список литературы

- [1] Bilardi S., Barjatya A., Gasdia F. Larger optics improved calibration techniques for small satellite observations with the ERAU OSCOM system [Электронный ресурс]. URL: www.amostech.com/TechnicalPapers/2017/Poster/Bilardi.pdf (дата обращения: 14.02.2020).
- [2] Payne T. E., Castro P. J., Gregory S. A. Satellite photometric error determination // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 2015.
- [3] Stubbs C. W. Toward more precise survey photometry for PanSTARRS and LSST: Measuring directly the optical transmission spectrum of the atmosphere // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, vol. 119, pp. 1163–1178.
- [4] Butkovskaya V. V. On the variability of Vega // Bull. Crim. Astrophys. Observ., 2014, vol. 110, no. 1, pp. 80–84.
- [5] Stubbs C. W., Tonry J. L. Addressing the photometric calibration challenge: Explicit determination of the instrumental response and atmospheric response function and tying it all together // The Science of Calibration, Astronomical Society of the Pacific, 2016, vol. 503, p. 37.
- [6] Winker D. M., Vaughan M. A., Omar A. H., Hu Y., Powell K. A., Liu Z., Hunt W. H., Young S. A. Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms // J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, vol. 26, pp. 2310–2323.
- [7] Justin E. A., Fagin M. H., Brown Yo. J., Stubbs Ch. W., Kuklev N. A., Conley A. J. Precision calibration via artificial light sources above the atmosphere [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1207.1938> (дата обращения: 14.02.2020).
- [8] Albert J. E. Satellite mounted light sources as photometric calibration standards for ground based telescopes // The Astronomical Journal, 2012, vol. 143, no. 1, p. 16.
- [9] Эльцгольд Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. 432 с.
- [10] Асадов Х. Г. Применение принципа параметрического уменьшения размерности для синтеза одного подкласса информационных систем и планирования измерительного эксперимента // Измерительная техника. 2003. № 6. С. 3–6.

QUESTIONS ON UTILIZATION OF DIFFERENT HEIGHT BALLOON SOURCES OF OPTICAL RADIATION FOR CALIBRATION OF NETWORK OF GROUND MICROTETELESOPES FOR TRACKING OF ORBITAL SATELLITES

H. H. Asadov¹, U. F. Mamedova²

¹ Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

One of ways to increase accuracy of ground tracking of orbital satellites is high accuracy calibration of network of microtelescopes used for this purpose. To attain high accuracy utilization of stable laser sources of radiation is most expedient. To install such sources the balloon platforms mounted at some height are practiced. But utilization of only one fixed height of all sources for calibration could lead to insufficient value of signal/noise ratio due to unpredictable atmospheric events. At the same time utilization of sources with different spectral characteristics can complicate the required methodic for analysis. Authors suggest utilization of same type lasers and carrying out of calibration using platforms installed at different heights. Non-apparent function of dependence of laser beams divergence on height of balloon installation is

considered for analysis. Some integrated limitation is imposed on this function. It is assumed that number of microtelescopes receiving optical radiation of one source linearly depends on height of the source. It is required to find out the optimum type of suggested non-apparent function upon which target functional composed as sum of all calibration signals could reach maximum. Utilization of such property of target functional for checking up of carried out calibration procedure is suggested. Providing for the required type of suggested non-apparent function is technically resolvable task because the beam divergence is controlled parameter and height of platform can be measured with sufficient accuracy.

Keywords: calibration, microtelescopes, optimization, measuring network, satellites tracking.

References

- [1] Bilardi S., Barjatya A., Gasdia F. Larger optics improved calibration techniques for small satellite observations with the ERAU OSCOM system. Available at: www.amostech.com/TechnicalPapers/2017/Poster/Bilardi.pdf (accessed 14.02.2020).
- [2] Payne T. E., Castro P. J., Gregory S. A. Satellite photometric error determination // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI, 2015.
- [3] Stubbs C. W. Toward more precise survey photometry for PanSTARRS and LSST: Measuring directly the optical transmission spectrum of the atmosphere // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, vol. 119, pp. 1163–1178.
- [4] Butkovskaya V. V. On the variability of Vega // Bull. Crim. Astrophys. Observ., 2014, vol. 110, no. 1, pp. 80–84.
- [5] Stubbs C. W., Tonry J. L. Addressing the photometric calibration challenge: Explicit determination of the instrumental response and atmospheric response function and tying it all together // The Science of Calibration, Astronomical Society of the Pacific, 2016, vol. 503, p. 37.
- [6] Winker D. M., Vaughan M. A., Omar A. H., Hu Y., Powell K. A., Liu Z., Hunt W. H., Young S. A. Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms // J. Atmos. Oceanic Technol., 2009, vol. 26, pp. 2310–2323.
- [7] Justin E. A., Fagin M. H., Brown Yo. J., Stubbs Ch. W., Kuklev N. A., Conley A. J. Precision calibration via artificial light sources above the atmosphere. Available at: <https://arxiv.org/abs/1207.1938> (accessed 14.02.2020).
- [8] Albert J. E. Satellite mounted light sources as photometric calibration standards for ground based telescopes // The Astronomical Journal, 2012, vol. 143, no. 1, p. 16.
- [9] Elzgolts L. E. *Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie* [Differential equations and calculus of variations]. Moscow, Nauka, 1974, 432 p. (In Russian)
- [10] Asadov Kh. G. *Primenenie principa parametriceskogo umen'sheniya razmernosti dlya sinteza odnogo podklassa informacionnyh sistem i planirovaniya izmeritel'nogo eksperimenta* [Application of the principle of parametric dimensionality reduction for the synthesis of one subclass of information systems and the planning of a measurement experiment] // Measurement Techniques, 2003, no. 6, pp. 3–6. (In Russian)

Сведения об авторах

Асадов Хикмет Гамид оглы – доктор технических наук, профессор, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства Азербайджана. Область научных интересов: дистанционное зондирование, физика атмосферы, информационно-измерительные системы, экология.

Мамедова Улькер Физули гызы – докторант Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, физика атмосферы.