



УДК 504.3.054

О ВОЗМОЖНОСТИ НАЗЕМНЫХ АДАПТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ГАЗОВ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВ

Н.Г. Джавадов¹, Х.Г. Асадов¹, А. Дж. Алиева¹¹ *Национальное аэрокосмическое агентство, г.Баку, Азербайджанская Республика*

В статье изложен предлагаемый метод наземных адаптивных измерений малых газов атмосферы с помощью гиперспектральных солнечных фотометров. Метод базируется на аддитивной модели атмосферного аэрозоля. Введена функция адаптивного управления коэффициентом масштабирования сигнала на длине волны поглощения измеряемого газа. В предложенном методе также используется трехволновый механизм нейтрализации влияния аэрозольного континуума. При этом, предлагаемый метод обеспечивает автономность операций устранения влияния аэрозоля и проведение адаптивного управления коэффициентом усиления основного измерительного канала фотометра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР, АЭРОЗОЛЬ, МАЛЫЕ ГАЗЫ, АТМОСФЕРА, АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_35_21

<https://elibrary.ru/cwatww>

1. ВВЕДЕНИЕ

Появившиеся в последние десятилетия прошлого века гиперспектрометры являются важнейшим инструментом для определения концентрации различных малых газов в атмосфере. В настоящее время гиперспектрометры, установленные на различных летательных аппаратах активно используются для исследования как малых газов, так и аэрозоля в атмосфере [1-3]. Для этого широко используются как различные модели самой атмосферы, так и различные методы устранения влияния аэрозоля при измерениях малых газов и солнечной радиации. Гиперспектральный метод исследований проник не только в сферу бортовых измерений, но и начинает активно использоваться при проведении наземных измерений с помощью солнечных или лунных фотометров [4-6]. Так, например, в работе [4] сообщается о разработке солнечного фотометра, работающего в диапазоне длин волн 350-1050 нанометров с шагом 3,5 нм. Аналогичные устройства описаны также в работах [5, 6].

Электронная почта авторов для переписки:

Асадов Хикмет Гамидовичевич, e-mail: asadzade@rambler.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru<https://elibrary.ru/cwatww>

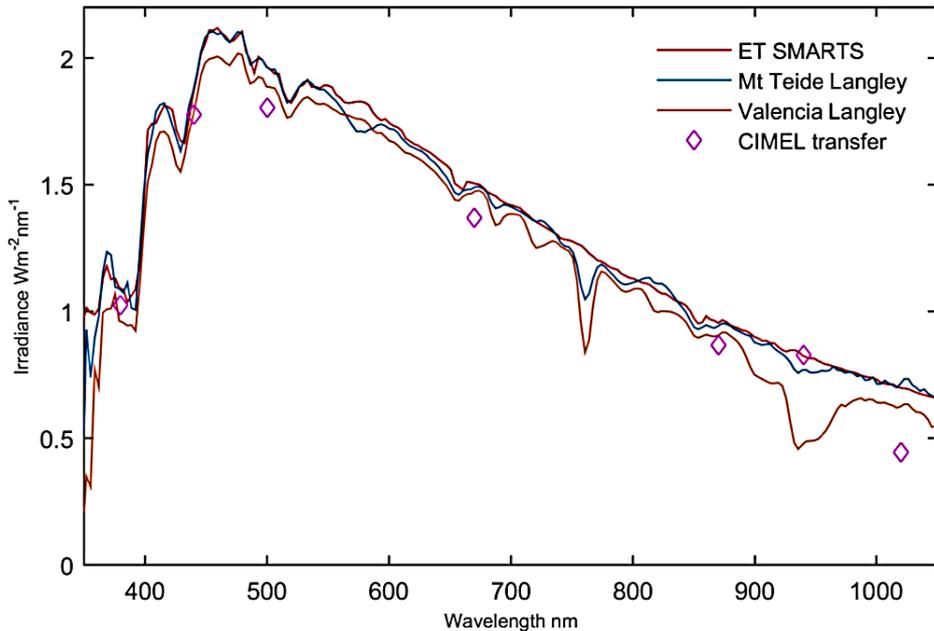


Рис. 1. Спектральные характеристики прямого и диффузного излучения солнца, измеренные с помощью трех типов гиперспектральных радиометров [4], установленных на борту Английского исследовательского судна RRS James Clark Ross

Согласно [4], гиперспектральные устройства позволяют измерить концентрацию таких газов как NO_x , O_3 , пары H_2O . В качестве примера на рис. 1 приведены спектральные характеристики прямой и диффузной солнечной радиации, полученной с помощью трех типов гиперспектральных измерителей. Многочисленные врезки на этих характеристиках показывают возможность измерения концентраций различных малых газов атмосферы используя соответствующие линии поглощения, наложенные на спектр излучения Солнца.

Очевидно, что для обеспечения высокой точности и информативности результатов гиперспектральных измерений с помощью гиперспектрометров, установленных на уровне земной поверхности должны быть учтены все факторы нестабильности, влияющие на результат измерений.

Согласно [7], такими факторами являются;

1. Молекулярное рассеяние;
2. Аэрозольное поглощение или рассеяние;
3. Поглощение Солнечной радиации водяными парами, кислородом и озоном.

В общем случае, наиболее сильным фактором, влияющим на наземные атмосферные измерения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах является аэрозоль, оптическая толщина которого определяется по формуле

$$\tau_a(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

где: $\beta(\lambda)$ - аэрозольная мутность атмосферы;

λ - длина волны измерений;

α - показатель Ангстрема;

Теоретической базой для проведения наземных атмосферных измерений является закон Бугера-Бера-Ламберта, согласно которому [8]

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \cdot R^2 \cdot Tg \exp\{-m(\theta) \cdot \tau(\lambda)\} \quad (2)$$

где: $E_0(\lambda)$ - Солнечное излучение на длине волны λ на расстоянии одной астрономической единицы вне атмосферы;

R – расстояние между землей и солнцем;

$m(\theta)$ – относительная оптическая воздушная масса;

$\tau(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы;

Tg – пропускание измеряемого газа.

В общем случае атмосферный аэрозоль представляется в качестве смеси аэрозольных частиц различных размеров. Однако, имеются немалое число публикаций, в которых исследуется многослойные модели атмосферного аэрозоля, в которых слои мелкодисперсных, среднедисперсных и крупнодисперсных аэрозолей расположены раздельно [9-10].

С учетом вышеприведенных представлений далее излагается метод адаптивного наземного измерения малых газов атмосферы с помощью Солнечного фотометра с использованием модифицированного варианта известного трехволнового метода измерений [11-12].

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

С учетом (2), сигналы на выходах каналов измерений на длинах волн λ_i ; $i = \overline{1,3}$ могут быть определены как (при $m=1$, где m – оптическая воздушная масса)

$$S(\lambda_1) = S_0(\lambda_1) \exp[-\tau_{aer}(\lambda_1)] \tag{3}$$

$$S(\lambda_2) = S_0(\lambda_2) \exp[-(\tau_{aer}(\lambda_2) + \tau_q(\lambda_2))] \tag{4}$$

$$S(\lambda_3) = S_0(\lambda_3) \exp[-\tau_{aer}(\lambda_3)] \tag{5}$$

где $S_i(\lambda_i)$; $i = \overline{1,3}$ – освещенность на входе измерителя на длине волны λ_i ;

$S_0(\lambda_i)$; $i = \overline{1,3}$ – внеатмосферная освещенность;

$\tau_q(\lambda_2)$ – оптическая толщина измеряемого газа.

Графическая интерпретация измеряемых длин волн показана на рис. 2

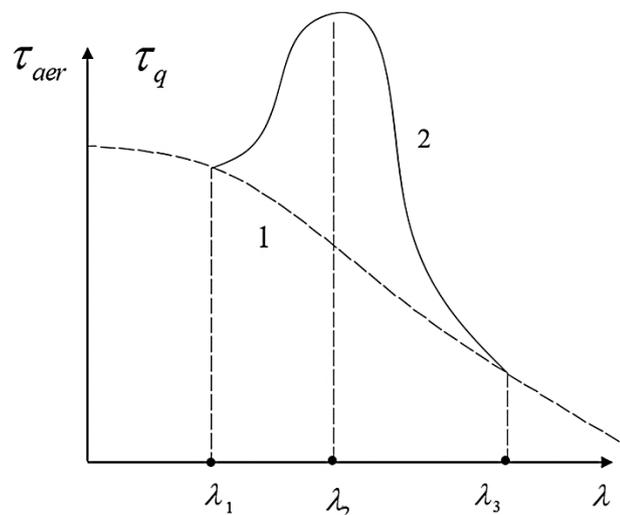


Рис. 2. Графическая интерпретация выбранных позиций длин волн проводимых измерений: 1- аэрозольный континуум; 2- контур линии поглощения исследуемого газа

Предлагаемый метод предусматривает проведение следующих операций алгоритма реализации метода.

1. Возведение в степени k_1 и k_3 соответственно $S(\lambda_1)$ и $S(\lambda_3)$, где k_1 и k_3 – корректирующие коэффициенты;
2. Умножение $S(\lambda_2)$ на адаптивно управляемый коэффициент k_2 .
3. Вычисления параметра γ , где

$$\gamma = \frac{S(\lambda_1)^{k_1} \cdot S(\lambda_3)^{k_3}}{k_2 \cdot S(\lambda_2)} = \frac{S_0(\lambda_1)^{k_1} \cdot S_0(\lambda_3)^{k_3}}{k_2 \cdot S_0(\lambda_2)} \times \exp\left[-(k_1\tau_{aep.}(\lambda_1) + k_3\tau_{aep.}(\lambda_3) - \tau_{aep.}(\lambda_2) - \tau_q(\lambda_2))\right] \quad (6)$$

Отметим, что показатель (6) при надлежащем выборе корректирующих коэффициентов приобретает физический смысл отношения соответствующих величин в виде множителя, стоящего перед экспонентой в (5).

4. Вычисление корректирующих коэффициентов k_1 и k_3 на основе аддитивной модели атмосферного аэрозоля.
5. С использованием прогнозной модели изменения $\tau_q(\lambda_2)$, ввод функции адаптивного управления.

$$k_2 = k_2(\tau_q) \quad (7)$$

6. Определение оптимального вида функции (7) на основе решения вариационной оптимизационной задачи минимизации γ .

Рассмотрим вопросы реализации 4-го пункта алгоритма предлагаемого метода. Как было указано выше, будем рассматривать специфическую двухслойную модель атмосферного аэрозоля

$$\tau_{aep.}(\lambda) = \tau_f(\lambda) + \tau_c(\lambda) \quad (8)$$

где: $\tau_f(\lambda)$ - мелкодисперсная компонента атмосферного аэрозоля;

$\tau_c(\lambda)$ - крупнодисперсная компонента.

Так как $\tau_f(\lambda)$ и $\tau_c(\lambda)$ представляют по определению разные источники, то они могут быть аппроксимированы известным уравнением Ангстрема в виде

$$\tau_f(\lambda) = \beta_f \cdot \lambda^{-\alpha_f} \quad (9)$$

$$\tau_c(\lambda) = \beta_c \cdot \lambda^{-\alpha_c} \quad (10)$$

Как видно из (6), полная компенсация влияния атмосферного аэрозоля происходит при удовлетворении условия

$$k_1\tau_{aep.}(\lambda_1) + k_3\tau_{aep.}(\lambda_3) = \tau_{aep.}(\lambda_2) \quad (11)$$

С учетом (7)-(11) получаем следующую систему уравнений

$$k_1 \cdot \lambda_1^{-\alpha_f} + k_3 \cdot \lambda_3^{-\alpha_f} = \lambda_2^{-\alpha_f} \quad (12)$$

$$k_1 \cdot \lambda_1^{-\alpha_c} + k_3 \cdot \lambda_3^{-\alpha_c} = \lambda_2^{-\alpha_c} \quad (13)$$

При известных значениях α_f и α_c решение системы уравнений (11) и (12) позволяет определить коэффициенты k_1 и k_3 для выбранных длин волн λ_1, λ_2 и λ_3 .

Рассмотрим вопросы определения оптимального вида вводимой функции управления (6). С учетом устранения влияния аэрозоля выражение (6) принимает вид:

$$\gamma = \frac{A}{k_2(\tau_q(\lambda_2))} \cdot \exp[-\tau_q(\lambda_2)], \quad (14)$$

где

$$A = \frac{S_0(\lambda_1)^{k_1} \cdot S_0(\lambda_3)^{k_3}}{S_0(\lambda_2)} \quad (15)$$

Для нахождения оптимального вида функции $k_2(\tau_q)$, далее опустив указание длины волны, которая неизменна, сформируем следующее ограничительные условие, применительно к функции (6)

$$\int_0^{\tau_{q\max}} k_2(\tau_q) d\tau_q = C; \quad C = const \quad (16)$$

Отметим, что физический смысл условия (16) заключается в предполагаемой ограниченности энергии, выделенного для реализации адаптивного управления в виде функции $k_2(\tau_q)$.

С учетом (13) и (15) сформируем целевой функционал F задачи Лагранжа неоклассического вариационного исчисления

$$F = \int_0^{\tau_{q\max}} \frac{A}{k_2(\tau_q)} \exp[-\tau_q] d\tau_q + \varepsilon \left[\int_0^{\tau_{q\max}} k_2(\tau_q)^{d\tau_q} - C \right] \quad (17)$$

где: ε – множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера-Лагранжа F достигает экстремума если

$$-\frac{A}{k_2(\tau_q)^2} \exp(-\tau_q) + \varepsilon = 0 \quad (18)$$

Из (17) находим

$$k_2(\tau_q) = \sqrt{\frac{A \cdot \exp(-\tau_q)}{\varepsilon}} \quad (19)$$

Для вычисления ε из (16) и (19) имеем

$$\int_0^{\tau_{q\max}} \sqrt{\frac{A}{\varepsilon}} \cdot \exp\left(\frac{-\tau_q}{2}\right) d\tau_q = C \quad (20)$$

Из (20) получим

$$\varepsilon = \frac{4A \cdot \exp(-\tau_{q\max})}{C^2} \quad (21)$$

Из (19) и (21) получаем

$$k_2(\tau_q) = \sqrt{\frac{A \exp(-\tau_q) \cdot C^2}{4A \cdot \exp(-\tau_{q\max})}} = \frac{C}{2} \exp\left[-(\tau_q - \tau_{q\max})\right] \quad (22)$$

Таким образом, адаптивное управление сигнала с помощью коэффициента k_2 предусматривает его рост при уменьшении τ_q в интервале $\tau = 0 \div \tau_{q\max}$

При этом F достигает минимума, т.к. производная (17) по $k_2(\tau_q)$ всегда положительна.

Таким образом, при адаптивном экспоненциальном управлении (22) целевой функционал, являющийся интегралом параметра γ , достигает минимума, т.к. знаменатель (6) при этом достигает максимума. Это в свою очередь, означает, что измерение $S(\lambda_2)$ может быть осуществлено более информативным образом, т.к. с уменьшением τ_q коэффициент k_2 в адаптивном режиме должен расти.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод адаптивных измерений малых газов атмосферы с применением гиперспектральных солнечных фотометров. Метод основан на аддитивной модели атмосферного аэрозоля и предусматривает введение функции адаптивного управления усилением сигнала на длине волны поглощения измеряемого газа, а также известный трехволновый механизм устранения влияния аэрозольного континуума. При этом, предлагаемый метод реализуем и при невыполнении операции удаления аэрозольного континуума, т.к. обеспечивается автономность операций устранения влияния аэрозоля и проведения адаптивного управления коэффициентом усиления основного измерительного канала фотометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mengmeng Yang, Yong Hu, Hongzhen Tian, Faisal Ahmed Khan, Qinqing Liu, Joaquim I. Goes, Helga do Gomes and Wonkook Kim. Atmospheric correction of airborne hyperspectral CASI data using polymer, 6S and FLAASH. *Remote Sens.* 2021, 13(24), 5062. <https://doi.org/10.3390/rs13245062>
2. Michael K. Griffin and Hsiao-hua K. Burke. Compensation of hyperspectral data for atmospheric effects. *Lincoln Laboratory Journal.* Volume 14, №1, 2003.
3. Steven M. Adler-Golden, Michael W. Matthew, Lawrence S. Bernstein, Robert Y. Levine, Alexander Berk, Steven C. Richtsmeyer, Prabhat K. Acharya, Gail P. Anderson, Jerry W. Feide, J.A. Gardner, Michael L. Hoke, Laila S. Jeong, Brian Pukall, Anthony J. Ratkowski, Hsiao-hua K. Burke. Atmospheric correction for shotwave spectral imagery based on MODTRAN 4, *Proc. SPIE* 3753, Imaging Spectrometry V, (27 october 1999); doi:10.1117/12.366315.
4. John Wood, Tim J. Smyth and Victor Estelles. Autonomous marine hyperspectral radiometers for determining solar irradiances and aerosol optical properties. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1723-1737, 2017 www.atmos-meas-tech.net/10/1732/2017/ doi: 10.5194/amt-10-1723-2017
5. Alessandro Barducci, Francesco Castagnoli, Donatella Guzzi, Paolo Marcoianni, Ivan Pippi, and Marco Poggesi. "Solar spectral irradiometer for validation of remotely sensed hyperspectral data," *Appl. Opt.* **43**, 183-195 (2004) <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-43-1-183>
6. Pagnutti M. Hyperspectral sun photometer for atmospheric characterization and vicarious calibrations. Stennis Space Center, Mississippi. 2008. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20090016274>

7. *Katkovsky L. V., Martinov A. O., Siliuk V.A., Ivanov D. A., Kokhanovsky A.A.* Fast atmospheric correction method for hyperspectral data. *Remote Sens.* 2018,10,1698; doi:10.3390/rs10111698
8. *Lina Xun, Hui Lu, Congcong Qian, Yong Zhang, Shanshan Lyu and Xin Li.* Analysis of aerosol optical depth from sun photometer at Shouxian, China. *Atmosphere* 2021,12,1226. [https // doi.org/10.3390/ atmos 12091226](https://doi.org/10.3390/atmos12091226)
9. *Sarangi C., Tripathi S. N., Mishra A. K., Goel A., Welton E. J.* Elevated aerosol layers and their radiative impact over Kanpur during monsoon onset period/*Journal of Geophysical Research Atmospheres.* 24 June, 2016 121(13). <https://doi.org/10.1002/2015JD024711>
10. *Dulac, F. and 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.*, 2003. 3, 1817–1831, <https://doi.org/10.5194/acp-3-1817-2003>.
11. *Асадов Х.Г., Ибрагимов Э.А., Джавадов Н.Г., Гашимов Дж.Г.* Двухступенчатый трехволновый метод построения солнечного фотометра с двухпараметрической коррекцией / *Международный научный журнал Альтернативная Энергетика и Экология.* № 4 (96), 2011, ст. 70-73.
12. *Асадов Х.Г., Сулейманов Ш.Т.* Синтез трехволновых скорректированных измерителей малых компонент атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне. – *Метрология*, 2007, № 9, с. 3–7.

ON THE POSSIBILITY OF GROUND-BASED ADAPTIVE MEASUREMENTS OF MINOR GASES IN THE ATMOSPHERE USING HYPERSPECTRAL SOLAR PHOTOMETERS

Djavadov N. G., Asadov H. H., Alieva A. J.

The article proposes a method for ground-based measurements of small gaseous media using hyperspectral solar photometers. The method is based on an additive model of atmospheric aerosol. The function of the control response of the scale factor of the signal to the manifestation of the absorption of the measured gas is introduced. The proposed method also uses a three-wave aerosol continuum neutralization mechanism. The proposed method ensures the independence of aerosol separation procedures, and the adaptive control of gain factor of the photometer measuring channel.

KEYWORDS: SOLAR PHOTOMETER, AEROSOL. SMALL GASES, ATMOSPHERE, ADAPTIVE CONTROL