

Методы и модели системного анализа

Вопросы системного анализа средств дистанционного зондирования земли методом производной спектроскопии

Х.Г. АСАДОВ, Н.Ш. АБИЛОВА

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация. Проанализированы вопросы системного анализа активных систем дистанционного зондирования Земли с привлечением элементов производной спектроскопии. Предложен метод оптимизации дистанционного зондирования Земли с применением основного и производного спектра отраженного и рассеянного сигналов при помощи метода вариационной оптимизации Эйлера. На базе 1-D модели отраженного и рассеянного сигналов получено дифференциальное уравнение, позволяющее вычислить основной спектр измерительного сигнала, при котором итоговый сигнал дистанционного зондирования Земли достигает максимума. Предложена структурная схема оптимальной системы дистанционного зондирования Земли. Проанализированы возможные режимы работы системы дистанционного зондирования Земли с использованием основного и производного спектров.

Ключевые слова: производный спектр, дистанционное зондирование, системный анализ, оптимизация, отраженный сигнал, моделирование.

DOI: 10.14357/20790279240403 **EDN:** PBDVQN

Введение

Можно с уверенностью сказать, что существуют определенные пробелы в области системного анализа систем дистанционного зондирования Земли с применением метода производной спектроскопии. Анализ существующих работ по применению методов производной спектроскопии в дистанционном зондировании [1-5] показал, что использование в качестве информативного сигнала суммы основного и производного спектров осуществляется для выявления спектральных признаков наличия отдельно взятых компонентов, представляющих определенный интерес для исследователя. Однако если ставить цель выявления ранее не предполагаемых

компонентов в исследуемой среде спектральным методом, то становится возможным достижение потенциальной информативности систем дистанционного зондирования в широком интервале длин волн. Данная задача достижения экстремума информативности неявным образом была решена предложенным нами методом применительно к наземному фотометрическому зондированию атмосферы. Данный метод предусматривает вариационную оптимизацию предложенного нами функционала Эйлера-Бугера (Метод ЭВАА) [6]. В настоящей статье рассматривается возможность применения этого метода к системам активного дистанционного зондирования Земли.

1. Материалы и методы

Рассмотрим упрощенную схему дистанционного зондирования Земли, осуществляемого сканирующей радиометрической аппаратурой, установленной на определенном типе носителя (спутник, самолет, БПЛА) (рис. 1).

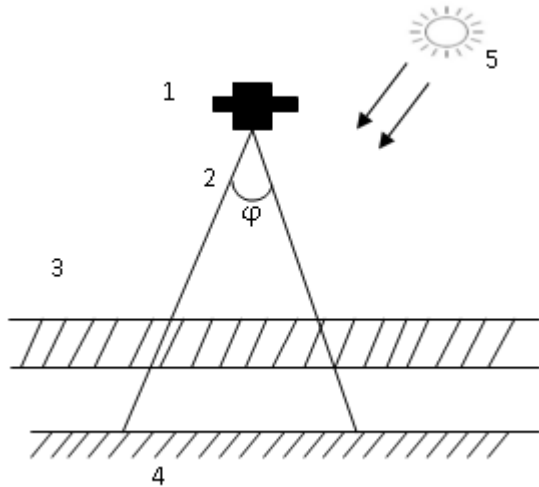


Рис. 1. Схематическое представление процесса дистанционного зондирования Земли: 1-носитель, на борту которого установлен спектрометр; 2-угол обзора (φ); 3-аэрозольный слой; 4-Земля; 5-Солнце

Согласно [7], для исследования отраженного сигнала земной поверхности можно использовать радиационную модель 1-D, которая позволяет оценить чувствительность AOD (оптическая плотность аэрозоли) к изменению альбедо земной поверхности [8]. Модель 1-D охватывает тот случай, когда атмосфера слабо загрязнена аэрозолем и учитывается только эффект однократного рассеяния и отражения. При этом на вход спектрометра поступает суммарный оптический сигнал I_{Σ} в виде:

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 \quad (1)$$

где I_1 -прямой отраженный от поверхности Земли сигнал; I_2 -диффузно-рассеянная радиация, возникающая из-за прямого и обратного рассеяния аэрозольных частиц.

I_1 определяется по формуле [8]:

$$I_1 = I_0 \exp(-2AOD) A \quad (2)$$

где I_0 -солнечная радиация на верхней границе атмосферы; A -альбедо земной поверхности.

I_2 определяется по формуле [8]:

$$I_2 = I_0 \cdot AOD \cdot \frac{\omega(1-g)}{2} + I_0 \cdot AOD \cdot A \cdot \omega(1+g) \quad (3)$$

При этом, формула (3) охватывает тот случай, когда солнечный луч однократно отражается от Земли, а также отражается вперед от аэрозольного слоя с учетом однократного рассеяния и отражения от земли. Вкратце рассмотрим возможности выявления экстремального режима зондирования Земли с применением основного и производного спектра, используя некоторую разновидность метода, [6]. Согласно методу Эйлера экстремум нижеприведенного функционала

$$F_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0 [I(\lambda); I'(\lambda); \lambda] d\lambda \quad (4)$$

должна удовлетворять условию:

$$\frac{\partial F_0}{\partial I(\lambda)} - \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial F_0}{\partial I'(\lambda)} \right] = 0. \quad (5)$$

Далее рассматриваем случай, когда на вход спектрометра поступает суммарный сигнал $I_{\Sigma}(\lambda)$, где

$$I_{\Sigma 1} = I(\lambda) + I'(\lambda). \quad (6)$$

На выходе спектрометра формируется квадратичный сигнал F_B , где

$$F_0 = [I(\lambda) + I'(\lambda)]^2. \quad (7)$$

Таким образом, с учетом (5)-(7) получим:

$$\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} = 2[I(\lambda) + I'(\lambda)]; \quad (8)$$

$$\frac{dF_0}{dI(\lambda)} = 2[I(\lambda) + I'(\lambda)]; \quad (9)$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} \right] = 2[I'(\lambda) + I''(\lambda)]. \quad (10)$$

С учетом (6)-(10) получим

$$I_{\Sigma} - \frac{dI_{\Sigma 1}}{d\lambda} = 0 \quad (11)$$

Перепишем (11) как

$$\frac{dI_{\Sigma 1}}{I_{\Sigma 1}} = d\lambda \quad (12)$$

и далее, осуществив интегрирование (12), получим

$$\ln I_{\Sigma 1}(\lambda) = \lambda + C; \quad C = \text{const} \quad (13)$$

или

$$I(\lambda) + I'(\lambda) = \exp(\lambda + C) \quad (14)$$

Вычислим сигналы $I(\lambda)$ и $I'(\lambda)$ применительно дистанционному зондированию Земли с бортового сканирующего спектрометра.

С учетом (2) и (3) имеем:

$$\begin{aligned} I(\lambda) &= I_1 + I_2 = I_0 \exp(-2AOD) \cdot A + \\ &+ I_0 \cdot AOD \cdot \frac{\omega(1-g)}{2} + I_0 \cdot AOD \cdot A \cdot \omega(1+g) = \\ &= I_0 \left[\exp(-2AOD) \cdot A + AOD \cdot \frac{\omega(1-g)}{2} \right] + \\ &+ AOD \cdot A \cdot \omega(1+g) = I_0(\lambda) \psi_1(\lambda), \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\psi_1(\lambda) = \exp(-2AOD) \cdot A + AOD \left[\frac{\omega(1-g)}{2} \right] + AOD \cdot A \cdot \omega(1+g). \quad (16)$$

С учетом (16) имеем:

$$I'(\lambda) = I_0(\lambda)' \cdot \psi_1(\lambda) + I_0(\lambda) \psi_1'(\lambda). \quad (17)$$

С учетом (14) – (16) получим:

$$I_0(\lambda)[\psi_1(\lambda) + \psi_1'(\lambda)] + I_0(\lambda)' \cdot \psi_1(\lambda) = \exp(\lambda + C). \quad (18)$$

Выражение (18) перепишем как:

$$I_0(\lambda)' + I_0(\lambda) \frac{[\psi_1(\lambda) + \psi_1'(\lambda)]}{\psi_1(\lambda)} = \frac{\exp(\lambda + C)}{\psi_1(\lambda)}. \quad (19)$$

Таким образом, выражение (19) представляет собой линейное дифференциальное уравнение с правой стороной, которое может быть решено используя известные методы решения.

Для сравнения отметим, что в работе [6] при применении метода ЭБАА было получено более простое уравнение, в виде (14), которое было использовано в качестве базового уравнения для получения выражения (19).

Как видно из выражения (19) при $\psi_1'(\lambda) = 0$ это дифференциальное уравнение по сути является повтором (14) с некоторым масштабированием правой стороны.

Блок-схема системы дистанционного зондирования, в котором реализован предлагаемый метод, показана на рис. 2.

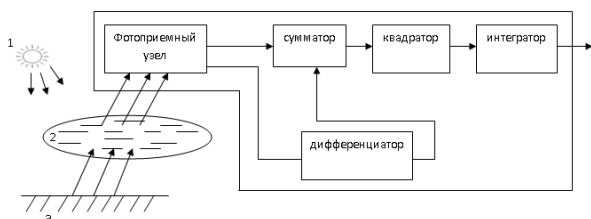


Рис. 2. Блок-схема системы дистанционного зондирования Земли: 1-Солнце; 2-аэрозольный слой атмосферы; 3-Земля

Следует отметить возможности работы системы и в других режимах, например:

- Использование только основного спектра, когда F_0 не содержит $I'(\lambda)$. В этом случае оптимизация осуществляется исходя из условия:

$$\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} = 0.$$

- Использование только $I'(\lambda)$, т.е. переход на режим производной спектроскопии. В этом случае имеем:

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{dF_0}{dI'(\lambda)} \right] = 0.$$

2. Обсуждение

Таким образом, метод ЭБАА, ранее предложенный авторами в работе [6], модифицирован для применения в системах дистанционного зондирования Земли. В отличие от работы [6], где была рассмотрена случай пассивного зондирования атмосферы, в настоящей статье учитываются только отраженные от Земли и рассеянные радиационные составляющие. Сумма указанных сигналов с применением 1-D модели и производная указанной суммы была учтена в уравнении Эйлера, в результате чего, следуя вариационной задаче оптимизации, было получено линейное дифференциальное уравнение с правой стороной. Решение этого уравнения позволяет выявить функциональную зависимость от длины волны суммарного сигнала, при которой система дистанционного зондирования на выходе формирует экстремальный сигнал.

Заключение

1. Предложен метод оптимизации дистанционного зондирования Земли с применением основного и производного спектра при помощи метода вариационной оптимизации Эйлера.
2. Путем применения модели 1-D получено дифференциальное уравнение, позволяющее вычислить основной спектр измерительного сигнала, при котором итоговый сигнал дистанционного зондирования Земли достигает максимума.
3. Разработана структурная схема оптимальной системы дистанционного зондирования Земли. Указаны режимы системы зондирования Земли с учетом возможностей использования основного и производного спектров.

Литература

1. Ortiz J.D., Avouris D.M., Schiller S.J., Luvall J.C., Lekki J.D. Evaluating visible derivative spectroscopy by varimax-rotated, principal component analysis of aerial hyperspectral images from the western basin of lake Erie// Journal of great lakes research. 45(3). 2019. P. 522-535. <http://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.03.005>.
2. Bostater C.R. High order derivative spectroscopy for selecting spectral regions&channels for remote sensing algorithm development// Part of the EUROPTO Conference on remote Sensing for earth science applications. Florence, Italy. September 1999.
3. Shafique N.A., Fulk F., Cornier S.M., Autrey B.C. Coupling hyperspectral remote sensing with field spectrometer to monitor inland water quality parameters.

4. Hong Y., Chen Y., Yu L., Liu Y., Zhang Y., Liu Y., Cheng H. Combining fractional order derivative and spectral variable selection for organic matter estimation of homogeneous soil samples by VIS-NIR spectroscopy// Remote Sens. 2018. P. 479.
5. Louchard E.M., Reid R.P., Stephens C.F., Davis C.O., Leathers R.A., Downes T.V. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments// Optics express. 2002. Vol. 10. No 26.
6. Асадов Х.Г., Абилова Н.Ш. Вопросы системного анализа пассивного дистанционного зондирования атмосферных газов. ИСА РАН. 2024. Том 74. Вып. 2. С. 33-39.
7. Brovkin V., Boysen L., Raddatz T., Gayler V., Loew A., Claussen M. Evaluation of vegetation cover and land-surface albedo in MPI-ESM CMIP5 simulations// J. Adv. Model. Earth Syst. 2013. 5. P. 48-57.
8. Arras K.O. An introduction to error propagation: derivation, meaning and examples of equation $Cy = Fx Cx Fx T$ // Technical report: EPFL-ASL-TR-98-01 R3 . Ecole Polytechnique federale de Lausanne (EPFL): Lausanne, Switzerland. 1998.

Асадов Хикмет Гамид оглы НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Начальник отдела. Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: asadzade@rambler.ru (ответственный за переписку)

Абилова Наргиз Шамил гызы НИИ Аэрокосмической информатики Национального Аэрокосмического Агентства, г. Баку, Республика Азербайджан. Зам. начальника отдела. Докторант (аспирант). Область научных интересов: информационно-измерительные системы, системный анализ, дистанционное зондирование, экология. E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com

Issues of system analysis of earth remote sensing means by derivative spectroscopy

H.H. Asadov, N.S. Abilova

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The issues of system analysis of active Earth remote sensing systems involving elements of derivative spectroscopy are analyzed. A method for optimizing remote sensing of the Earth using the main and derivative spectrum of reflected and scattered signals using the Euler variational optimization method is proposed. Based on the 1-D model of reflected and scattered signals, a differential equation is obtained that allows calculating the main spectrum of the measuring signal, at which the final signal of remote sensing of the Earth reaches a maximum. A block diagram of an optimal Earth remote sensing system is proposed. The possible modes of operation of the Earth remote sensing system using the basic and derived spectra are analyzed.

Keywords: *derived spectrum, remote sensing, system analysis, optimization, reflected signal, modeling*

DOI: 10.14357/20790279240403 **EDN:** PBDVQH

References

1. Ortiz J.D., Avouris D.M., Schiller S.J., Luvall J.C., Lekki J.D. Evaluating visible derivative spectroscopy by varimax-rotated, principal component analysis of aerial hyperspectral images from the western basin of lake Erie// Journal of great lakes research. 45(3). 2019. P. 522-535. <http://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.03.005>.
2. Bostater C.R. High order derivative spectroscopy for selecting spectral regions&channels for remote sensing algorithm development// Part of the EUROPTO Conference on remote Sensing for earth science applications. Florence, Italy. September 1999.
3. Shafique N.A., Fulk F., Cornier S.M., Autrey B.C. Coupling hyperspectral remote sensing with field spectrometer to monitor inland water quality parameters.
4. Hong Y., Chen Y., Yu L., Liu Y., Zhang Y., Liu Y., Cheng H. Combining fractional order derivative and spectral variable selection for organic matter estimation of homogeneous soil samples by VIS-NIR spectroscopy// Remote Sens. 2018. P. 479.
5. Louchard E.M., Reid R.P., Stephens C.F., Davis C.O., Leathers R.A., Downes T.V. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments// Optics express. 2002. Vol. 10. No 26.

6. *Asadov H.H., Abilova N.Sh.* Issues of system analysis of passive remote sensing of atmospheric gases. Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol. 74. No 2. P. 33-39.
7. *Brovkin V., Boysen L., Raddatz T., Gayler V., Loew A., Claussen M.* Evaluation of vegetation cover and land-surface albedo in MPI-ESM CMIP5 simulations// J. Adv. Model. Earth Syst. 2013. 5. P. 48-57.
8. *Arras K.O.* An introduction to error propagation: derivation, meaning and examples of equation $Cy = FxCxFxT$ // Technical report: EPFL-ASL-TR-98-01 R3 . Ecole Polytechnique federale de Lausanne (EPFL): Lausanne, Switzerland. 1998.

Asadov Hikmet Hamid oglu Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. The head of the department. Doctor of Technical Sciences, Professor. Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology. E-mail: asadzade@rambler.ru (responsible for correspondence)

Abilova Nargiz Shamil gizi Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocosmic Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Deputy. the head of the department. Doctoral student (post-graduate student). Research interests: information and measurement systems, system analysis, remote sensing, ecology. E-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com