

УЧЕТ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В. Белов^{1,2}, А.В. Кожевникова¹, М.В. Тарасенков^{1,2}

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

e-mail: Belov@iao.ru, avk@iao.ru, tmv@iao.ru

Ключевые слова: перенос оптического излучения в рассеивающих и поглощающих средах, метод Монте-Карло, поляризация света

Рассматривается задача об оценке влияния поляризации на отдельные компоненты излучения, формирующие спутниковые изображения земной поверхности. Разработанные алгоритмы статистического моделирования могут быть использованы при атмосферной коррекции аэрокосмических изображений земной поверхности. Выполненное тестирование подтверждает достоверность полученных решений.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов наблюдения окружающей среды в глобальном масштабе является дистанционное пассивное спутниковое оптическое зондирование или мониторинг системы атмосфера-земная поверхность [1-3]. Возможности этого способа наблюдения достаточно широки, но при использовании спутниковых данных возникают определенные сложности в их интерпретации. Дело в том, что атмосфера по своей структуре является сложной аэрозольно-газовой средой, что влияет на принимаемый спутниковой оптико-электронной системой сигнал. Неполный учет влияния атмосферы на получаемые спутниковые изображения земной поверхности может повлечь за собой ложную интерпретацию этих измерений. Поэтому могут возникать ситуации, когда необходимо выполнять атмосферную коррекцию спутниковых изображений.

Данная проблема решается довольно давно, и в настоящий момент разработано достаточно много подходов к атмосферной коррекции, например [4-7]. Во многих алгоритмах коррекции тем или иным способом решается стационарное уравнение переноса излучения относительно интенсивности принимаемого излучения. Процесс переноса оптического излучения в атмосфере можно рассматривать как процесс распространения корпускул (фотонов) или электромагнитной волны. Полное состояние оптического излучения описывается вектор-параметром Стокса, а его распространение – с помощью векторного уравнения переноса излучения вида:

$$(\vec{\omega}, \vec{\nabla})I_i(\vec{r}, \vec{\omega}) + \sigma_i(\vec{r})I_i(\vec{r}, \vec{\omega}) = \sum_{j=1}^4 \int_{\Omega} R_{i,j}(\vec{r}, \cos \gamma) I_j(\vec{r}, \vec{\omega}') d\vec{\omega}' + F_i(\vec{r}, \vec{\omega}) \quad (1)$$

где $\vec{I} \equiv (I_1, I_2, I_3, I_4) = (I, Q, U, V)$ - компоненты вектор-параметра Стокса; $\vec{\omega} = (\mu, \varphi)$ - единичный вектор направления; R_{ij} - компоненты суммарной аэрозольно-молекулярной матрицы рассеяния; F - распределенные в атмосфере источники излучения.

Уравнение (2) описывает процесс переноса излучения с учетом такого свойства света, как поляризация. В ранее опубликованных работах оценивалось влияние учета состояния поляризации излучения на суммарную интенсивность принимаемого излучения. Например, в работе [8, С. 117-138] указывается, что неучет поляризации света вносит погрешность до 10%. Однако вопрос о том, как влияет учет поляризации излучения на результаты атмосферной коррекции в настоящий момент в полной мере не решен. Учет поляризации принимаемого излучения может также служить дополнительной информацией об отражательных свойствах земной поверхности.

Таким образом, задача анализа влияния поляризации на характеристики, определяющие перенос изображения, остается актуальной и требующей решения.

Постановка задачи и метод решения

Задача рассматривается в следующей постановке (рис. 1). В атмосфере или вне ее расположена оптическая система, с помощью которой осуществляется наблюдение за участком земной поверхности. На верхнюю границу атмосферы в направлении ω_{sun} падает параллельный поток солнечного излучения. Атмосфера разделена на сферические слои, в каждом из которых заданы коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния и ослабления $\sigma_{s,a}$, $\sigma_{s,m}$, $\sigma_{t,a}$, $\sigma_{t,m}$, а также матрицы аэрозольного и молекулярного рассеяния $R_{ij,a}$ и $R_{ij,m}$. Требуется выполнить расчет компонент излучения, формирующих изображение наблюдаемого участка земной поверхности, и оценить влияние поляризации на суммарный принимаемый сигнал. Используя это, в дальнейшем предполагается оценить влияние поляризации на результаты атмосферной коррекции.

При учете поляризации излучения, принимаемое оптическое излучение состоит из:

$$I_{i,sum}(\vec{r}_d, \vec{\omega}_d) = I_{i,sum}(\vec{r}_d, \vec{\omega}_d) + I_{i,0}(\vec{r}_d, \vec{\omega}_d) + I_{i,surf}(\vec{r}_d, \vec{\omega}_d), \quad (2)$$

где $I_{i,sum}$ - вектор-параметр Стокса излучения, принимаемого оптической системой, $I_{i,sum}$ - вектор-параметр Стокса солнечной дымки, $I_{i,0}$ - вектор-параметр Стокса нерассеянного излучения от наблюдаемого объекта, $I_{i,surf}$ - вектор-параметр Стокса поверхностной дымки.

Наиболее эффективным методом решения поставленной задачи является, с нашей точки зрения, метод Монте-Карло. Решение предлагается построить следующим образом. Длина свободного пробега “фотонов” моделируется в соответствии с законом Бугера для интенсивности. Вектор-параметр Стокса $I = (I, Q, U, V)$ после рассеяния преобразуется как:

$$(I, Q, U, V) = P(\omega', \omega, r) \cdot (I, Q, U, V), \quad (3)$$

где $P(\omega', \omega, r)$ - фазовая матрица рассеяния, которая рассчитывается по формуле [8]:

$$P(\omega', \omega, r) = L(\pi - i_2) R(\mu, r) L(-i_1), \quad (4)$$

где $L(i)$ - матрица поворота, $R(\omega', \omega, r)$ - суммарная аэрозольно-молекулярная матрица рассеяния.

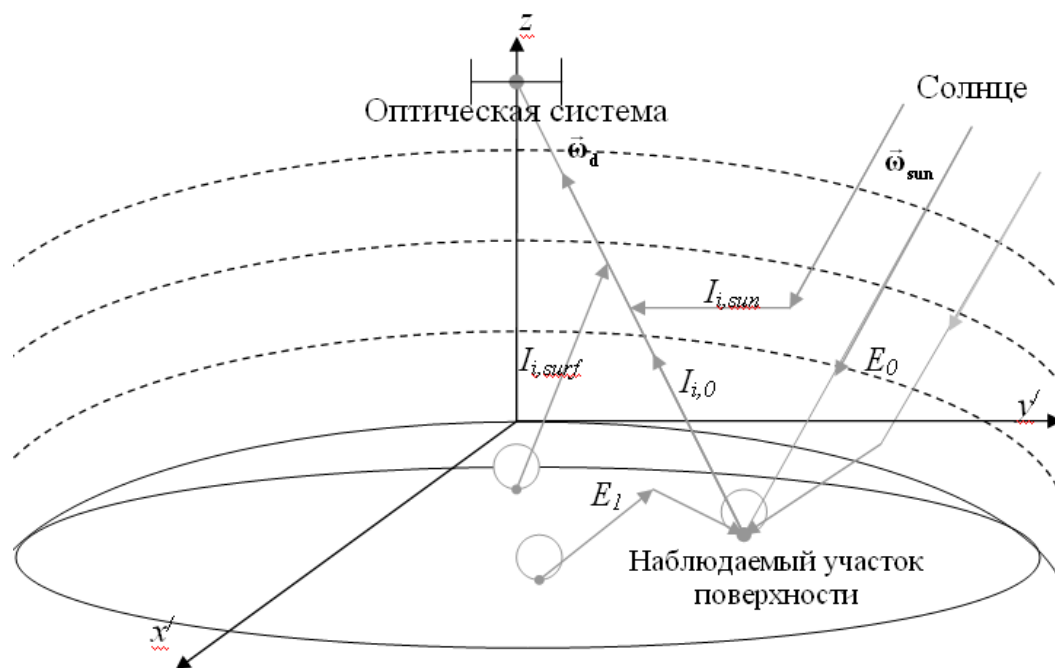


Рисунок 1 – Геометрическая схема постановки задачи.

В ранее разработанные алгоритмы, описанные в [7], были добавлены блоки, учитывающие поляризацию. В схемах с сопряженным моделированием траекторий движения фотонов было учтено, что интегральное векторное уравнение переноса излучения относительно вектор-параметра Стокса не является самосопряженным.

Для проверки правильности работы разработанных алгоритмов были выполнены тестовые расчеты вектор-параметра Стокса, полученные методом Монте-Карло для прямой и сопряженной схемы моделирования, для плоской однородной молекулярной атмосферы и поглощающей земной поверхности. Полученные оценки сравнены с результатами, приведенными в [9]. На рис.2 приведены соответствующие результаты. Расчеты выполнялись для следующих условий: оптическая толщина молекулярной атмосферы $\tau = 1$, коэффициент отражения Земли $r = 0$, азимутальный угол $\varphi = 90^\circ$, косинус зенитного угла оптической оси приемника $\mu = 0.98$, а косинусы зенитных углов солнца $\mu_0 = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.92, 1.0$, солнечная постоянная равна $\pi \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{мкм})$.

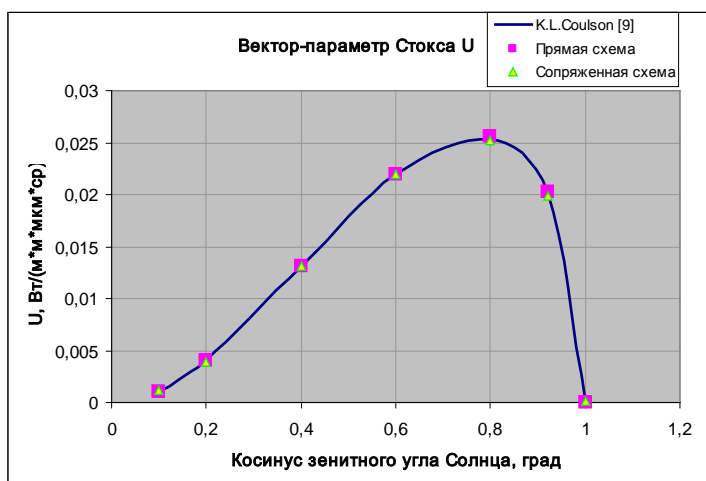
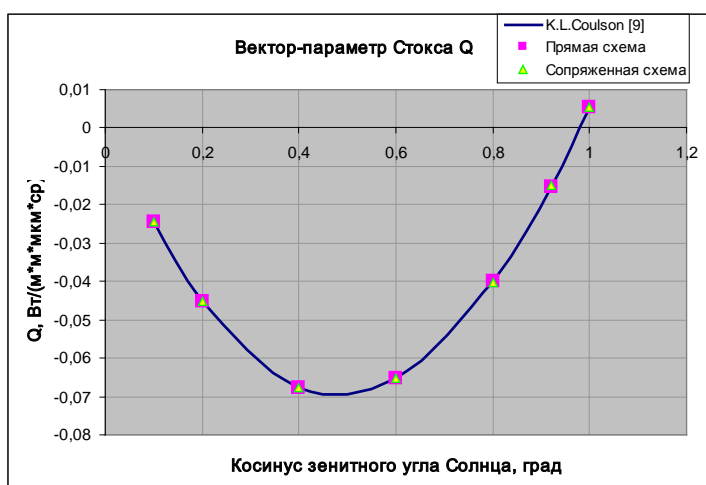
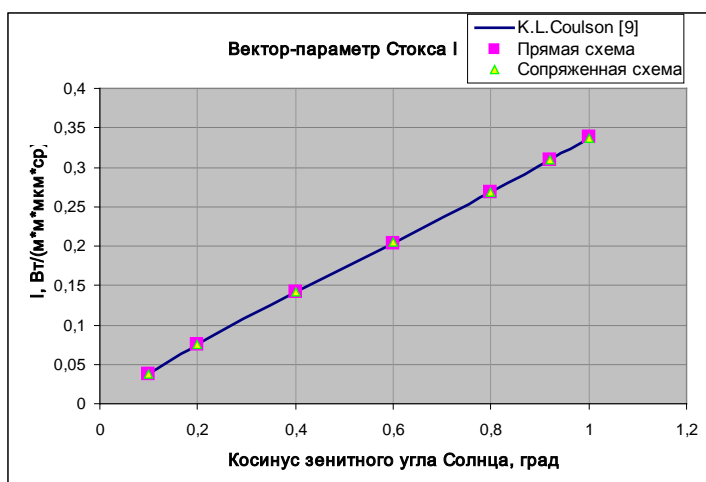


Рисунок 2 – Графики сравнения результатов из [9] с результатами статистического моделирования алгоритмами прямой и сопряженной статистического моделирования

Из рисунка 2 видно, что результаты расчета трех компонент вектор-параметра Стокса практически совпадают с данными из [9], максимальное отличие с прямой схемой моделирования для величины I равна $3.2E-4$ Вт/(м²км·ср), для Q – $1.13E-4$ Вт/(м²км·ср), для U – $2.32E-4$ Вт/(м²км·ср). Максимальное отличие с сопряженной схемой моделирования для I – $4.80E-4$ Вт/(м²км·ср), для Q – $3.96E-4$ Вт/(м²км·ср), для U – $2.35E-4$ Вт/(м²км·ср). Максимальная погрешность расчетов для прямых схем моделирования траекторий составляла для I – 0.14%, для Q – 0.17%, для U – 4.4%. Максимальная погрешность для сопряженной схемы моделирования траекторий для I – 0.49%, для Q – 0.75%, для U – 8.5%. Таким образом, отличие лежит в пределах погрешности расчетов. Четвертый компонент вектор-параметра Стокса V (степень эллиптичности) в условиях естественного источника излучения остается нулевым. Отсюда можно сделать вывод, что добавленный в алгоритм блок учета поляризации работает правильно. Соответственно можно применять его для расчета остальных компонент излучения и для более сложных параметров атмосферы.

Оптические параметры молекулярной атмосферы в дальнейшем планируется задавать генератором оптических моделей на основе LOWTRAN-7 [10], а матрица аэрозольного

рассеяния и коэффициенты рассеяния и поглощения на основе модели Г.М. Крекова и Р.Ф. Рахимова [11].

Таким образом, разработаны и оттестированы алгоритмы статистического моделирования компонент излучения, формирующих изображение поверхности с учетом поляризации. В дальнейшем, используя эти алгоритмы, будет решена задача оценки влияния учета поляризации излучения на результаты атмосферной коррекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №15-01-00783-А, РФФИ 15-07-06811-А, президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5, программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

Литература:

1. *Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П.* Когнитивные технологии обработки оптических изображений высокого пространственного и спектрального разрешения. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 593-600.
2. *С.А. Барталев, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценок, О.Ю. Панов, В.Ю. Ефремов* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat //Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2014.Т. 11. №1. С. 9-20
3. *Томишин О.А., Соловьев В.С.* Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии (2002 г.). // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 634-639.
4. *Протасов К.Т., Бусыгин Л.А., Белов В.В.* Метод преобразования гистограмм яркостей и вейвлет-коррекция атмосферных искажений спутниковых изображений // Оптика атмосферы и океана. – Т.23, №2, 2010. – С. 136-142.
5. *Vermote E.F., Vermeulen A.* Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. – 1999. [электронный ресурс]: http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf.
6. *Reinersman P.N., Carder K.L.* Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect // Applied optics. – vol. 34, №21, 1995. – pp. 4453-4471.
7. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* О точности и быстродействии RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазоне // Оптика атмосферы и океана. – Т. 26, №5, 2013. – в печати.
8. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. 284 с.
9. *Coulson, Kinsell L.* Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering. Berkeley, University of California Press, 1960, 548 p.
10. *Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O.* User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hansom AFB. MA 01731, 1988. P.137
11. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптические модели атмосферного аэрозоля.- Томск: Изд-е Томского филиала СО АН СССР, 1986 г., 296 с.