Исследование влияния метеорологических условий на оптические свойства атмосферы при дистанционном зондировании Земли в ночное время

А. А. Пойда¹, М. Н. Жижин², А. В. Андреев²

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Москва, 123098, Россия E-mail: poyda_aa@nrcki.ru ² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: and@iki.rssi.ru

Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли позволяет детектировать и оценивать различные параметры световых и инфракрасных источников, включая яркость, температуру, площадь и т.д. Одной из ключевых сложностей при этом является локальная вариация оптических свойств атмосферы вследствие поглощения и рассеяния излучения от исследуемых объектов (облака, туман, аэрозоли и осадки). В статье представлен метод локальной оценки и коррекции атмосферных искажений на спутниковых снимках, полученных в ночное время суток. В основу метода легли модели многократного рассеивания световых лучей в атмосфере, позволяющие учитывать её оптическую плотность и средний размер аэрозольных частиц (туман, дождь). В отличие от предыдущих работ, которые были ориентированы в первую очередь на компьютерный синтез и оценку эффекта погодных условий на ночных фотоснимках и в компьютерных играх, данная работа направлена на анализ спутниковых изображений ночной поверхности Земли и определение истинных параметров объектов съёмки (электрических огней, газовых факелов), локальных атмосферных и погодных условий (облака, смог, дымовые шлейфы). Результаты работы позволят выделять на мультиспектральных изображениях области малых атмосферных искажений, а также восстанавливать размытые и спектрально искажённые данные ДЗЗ с учётом локальных метеорологических условий.

Ключевые слова: ДЗ ночной поверхности Земли, оптические свойства атмосферы, коррекция атмосферных искажений

Одобрена к печати: 20.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-251-259

Введение

Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли позволяет детектировать и классифицировать ночные огни и инфракрасные источники от людских поселений, транспортной инфраструктуры (автомобили, корабли), индустриальных объектов (газовые факелы, сталелитейные и цементные печи, электростанции), лесных пожаров, извержений вулканов и т. п. Спутниковые наблюдения ночных огней на поверхности Земли осложняются локальной вариацией оптических свойств атмосферы вследствие поглощения и рассеяния излучения от исследуемых объектов (облака, туман, аэрозоли и осадки) и паразитной засветки (лунный свет, полярное сияние, космические лучи).

В статье представлен новый метод локальной оценки коррекции атмосферных искажений на спутниковых снимках. В основу метода положена модель многократного рассеивания световых лучей в атмосфере, позволяющая учитывать оптическую плотность атмосферы, т.е. величину, характеризующую ослабление света в среде за счёт его поглощения и рассеяния (Metari, Deschenes, 2007; Narasimhan, Nayar, 2003a). Однако предыдущие работы были направлены в первую очередь на компьютерный синтез и оценку эффекта погодных условий (туман, дождь) на фотографиях и в компьютерных играх. В представляемой работе предпринята попытка адаптировать предложенные модели для случая спутниковых изображений.

Результаты работы позволят не только выделять на мультиспектральных изображениях области малых атмосферных искажений (участки, размытые или полностью закрытые облаками), но и частично видеть «сквозь облака» с помощью восстановления (деконволюции) размытых и спектрально искажённых данных ДЗЗ с учётом локальных метеорологических условий, что, в свою очередь, повысит надёжность детектирования и точность оценки параметров (яркость, повторяемость, температура, субпиксельный размер, оптическая толща атмосферы, размер аэрозольных частиц) для источников видимого и ИК-излучения на ночной стороне Земли.

От предыдущих исследований влияния атмосферы на ночные снимки в канале DNB спектрорадиометра VIIRS на спутнике Suomi NPP (McHardy et al., 2015) наш результат отличается тем, что впервые предпринята попытка учесть не только прямое, но и многократное рассеяние в атмосфере, которое проявляет себя в виде «гало» вокруг ярких источников света, что приводит как к ослаблению их видимой яркости, так и к размытию или снижению локальной резкости изображения.

Модель рассеивания света атмосферой

В работе (Narasimhan, Nayar, 2003а) построена модель многократного рассеяния излучения от точечного источника в атмосфере, если известны оптическая плотность и размер аэрозольных частиц, с помощью бесконечных рядов из полиномов Лежандра. Позднее в работе (Metari, Deschenes, 2007) было получено приближение этой модели с использованием обобщённого нормального распределения:

$$I_R(x, y) = I_0 \cdot GGD(x, y),$$

где $I_R(x, y) - \phi$ иксируемая на сенсоре яркость источника излучения в точке (x, y); $I_0 -$ яр-кость источника излучения; $GGD(x, y, \sigma, \rho) = \frac{\exp\left[-\frac{|x - \mu_x|^{\rho} + |y - \mu_y|^{\rho}}{|A(\rho, \sigma)|^{\rho}}\right]}{4\Gamma^2(1 + 1/\rho)A(\rho, \sigma)^2}$, $x, y \in \mathbb{R}$; Γ – гамма-функция, т.е. $\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t}t^{z-1} dt$, z > 0; $A(\rho, \sigma) = \left|\sigma^2 \Gamma(1/\rho) / \Gamma(3/\rho)\right|^{1/2}$ – параметр масштаба;

x, y — произвольные координаты; μ_x, μ_y — координаты источника излучения; ρ и σ — параметры, отвечающие за скорость убывания яркости с расстоянием от источника.

Параметр ρ пропорционален оптической плотности атмосферы ($\rho = kT$), в то время как параметр о связан с размером аэрозольных частиц.

На рис. 1 (см. с. 253) представлены графики зависимости размытия яркости точечного источника на сенсоре от угла падения луча при двух различных значениях оптической плотности атмосферы, а на *рис. 2* (см. с. 253) — их моделируемое приближение функцией GGD. Значения параметра q определяют размер аэрозольных частиц и соответствуют различным погодным условиям. Согласно (Metari, Deschenes, 2007) значения о и q могут быть связаны формулой $\sigma = (1 - q)/q$.

Однако данная модель учитывает только многократно рассеянный свет, но не прямое излучение. Чтобы добавить прямое излучение, мы использовали модель, предложенную в работе (Narasimhan, Nayar, 2003b):

$$I = I_0 \cdot e^{-T} + I_{sky}(1 - e^{-T}),$$

где I_0 — яркость источника излучения; I — яркость, фиксируемая на сенсоре; T — оптическая плотность атмосферы; I_{sky} — фоновая яркость неба.

Объединяя обе эти модели и пренебрегая фоновой яркостью неба, при этом полагая, что спутниковые снимки делаются ночью в условиях отсутствия внешней засветки, получаем:

$$I_{R}(x, y) = I_{0} \cdot e^{-I} \delta(x - x_{0}, y - y_{0}) + I_{0} \cdot GDD(x, y, \sigma, \rho),$$
(1)

где δ — дельта-функция.



Рис. 1. Зависимость размытия яркости точечного источника на сенсоре от угла падения луча: *слева* — для случая слабоактивной атмосферы с низкой оптической плотностью; *справа* — для случая плотной атмосферы с высокой оптической плотностью (Metari, Deschenes, 2007)



Рис. 2. Моделируемое приближение графиков на *рис. 1* обобщённым нормальным распределением (Metari, Deschenes, 2007)

Адаптация модели рассеивания света атмосферой для работы со спутниковыми данными

На ночном изображении, полученном со спутника, известным значением в формуле (1) является только $I_R(x, y)$, которое можно интерпретировать как значение, зафиксированное сенсором в точке растра с координатами x и y. Здесь мы говорим про растр, так как цифровая камера на спутнике имеет ограниченное разрешение. При этом неизвестными параметрами являются: ρ , σ , μ_x , μ_y , I_0 , T. Следуя (Metari, Deschenes, 2007), можно считать, что величина ρ пропорциональна оптической плотности атмосферы T ($\rho = kT$). Экспериментальным путём мы подобрали значение k = 0,5.

Мы относим координаты источника излучения также к неизвестным параметрам по причине дискретности получаемого изображения: если источник не попадает в узлы растровой сетки, то его излучение распределится между соседними пикселями. Можно принять в качестве координат источника координаты пикселя, в котором величина яркости имеет наибольшее значение, но это нарушит симметричность модели.

Чтобы найти неизвестные параметры, мы можем получить систему уравнений для пикселей полученного спутникового изображения, лежащих вблизи предполагаемого источника. Например, можно взять самый яркий пиксель в этой области и все пиксели в некотором радиусе. Для изолированных источников мы используем радиус 3. Применяя нелинейную регрессию и приближая наблюдённые значения модельными, можно подобрать наилучшую комбинацию неизвестных параметров.

В работе анализируются только изолированные точечные источники в видимом диапазоне и не предполагается возможность смешения излучения от разных источников. Это приемлемо, например, для детектирования бортовых огней рыболовных судов или газовых факелов.

Алгоритм

Ниже приведён алгоритм вычисления значения оптической плотности атмосферы по ночным снимкам в видимом диапазоне спектра, состоящий из пяти шагов.

- 1. Перепроецировать спутниковые данные в видимом диапазоне из системы координат спутника на географическую регулярную сетку.
- 2. Используя алгоритм детектирования источников излучения, составить список источников излучения и их положение на спутниковом снимке (координата пиксела).
- 3. Для исследуемого источника взять на спутниковом снимке значение в заданном пикселе и во всех пикселах изображения, отстоящих от данного не более чем на 3.
- Используя полученные значения, найти параметры ρ, σ, μ_x, μ_y, I₀, максимально приближающие наблюдаемые значения (полученные на шаге 3) модельными значениями, полученными с использованием модели (1). В качестве функции оценки ошибки используется сумма квадратов разностей.
- 5. Вычислить значение *T* из соотношения $\rho = kT$, где k = 0,5.

Реализация алгоритма

Представленный выше алгоритм был реализован на языке программирования MATLAB. Для реализации шага 4 применяется функция fminsearch, использующая метод симплексного поиска (Lagarias et al., 1998) со стартом в некоторой начальной точке для нахождения минимума скалярной функции нескольких переменных. В качестве скалярной функции используется функция оценки ошибки между реальными значениями и моделируемыми с заданным набором параметров. Оптимизация ведётся по параметрам ρ , σ , μ_x , μ_y , I_0 , причём параметры ρ , σ , μ_x , μ_y перебираются в некотором пространстве, а значение параметра $I_0(\rho, \sigma, \mu_x, \mu_y)$ находится из условия минимизации ошибки между модельными значениями и реальными.

Валидация модели и алгоритма

Для валидации модели и реализованного на её основе алгоритма мы использовали данные, полученные в видимом диапазоне в ночное время радиометром VIIRS, установленном на спутнике Suomi NPP. В качестве источников излучения были выбраны бортовые огни судов. Чтобы обнаружить бортовые огни судов на спутниковых изображениях, использовалась автоматическая система детектирования ночных судовых огней по данным VIIRS (Жижин и др., 2018; Elvidge et al., 2015). Причина выбора источников именно этого типа объясняется возможностью использования изолированных точечных источников излучения на фоне океана, для которых в радиусе нескольких пикселов не будет других огней. Использовались снимки Японского моря, так как в этом регионе наблюдается много рыболовных судов.

Для эксперимента были взяты пять снимков, полученных в 2016—2017 гг. Эталонные источники были отобраны вручную. При этом:

- отбирались изолированные единичные источники в радиусе трёх пикселей;
- отбирались источники с размытием и без размытия изображения (размытие изображения свидетельствует о наличии облачности или других погодных условий, вызывающих частичное рассеивание сигнала);
- выбирались наиболее яркие источники.

На *рис. 3* (см. с. 255) приведён пример одного из пяти изображений, применявшихся для валидации модели. Маркерами выделены источники, использовавшиеся для эксперимента. На изображении видны чёткие и размытые области. Размытые области соответствуют облачности, недостаточно плотной, чтобы полностью экранировать сигнал от источника, но достаточной для его размытия.



Рис. 3. Пример одного из пяти спутниковых изображений, используемых для валидации модели. Зелёными маркерами выделены точки, используемые для тестирования



Рис. 4. Пример точечных источников излучения: часть спутникового изображения в области источника (*в центре*); вертикальный и горизонтальные профили яркости (*слева и справа* синим цветом); моделируемое приближение (*слева и справа* красным цветом)

На *рис.* 4 приведён пример нескольких точек, вертикальный и горизонтальные профили яркости вокруг этих точек и моделируемое многократное рассеяние.



Рис. 5. Диаграмма рассеяния для выбранных источников излучения: по горизонтальной оси — вычисленная на основании модели оптическая плотность атмосферы; по вертикальной оси — значения в ИК-канале. Горизонтальная и вертикальная линии делят пространство на четыре квадранта. Согласно ожиданиям большинство точек графика должно приходиться на левый верхний и правый нижний квадранты



Рис. 6. Диаграмма рассеяния для выбранных источников излучения: по горизонтальной оси — вычисленная на основании модели оптическая плотность атмосферы; по вертикальной оси — значения SI-индекса. Горизонтальная и вертикальная линии делят пространство на четыре квадранта. Согласно ожиданиям большинство точек графика должно приходиться на левый верхний и правый нижний квадранты

Для проверки мы сравнили восстановленные значения оптической плотности атмосферы с данными по инфракрасному каналу. Ожидается, что эти два набора данных должны коррелировать с обратным знаком при наличии облачности: если небо ясное, то толщина атмосферы уменьшается, а значения в инфракрасном канале увеличиваются (так как температура поверхности Земли более тёплая, чем облаков); и наоборот — если небо облачное, то толщина атмосферы увеличивается, а значения в инфракрасном канале уменьшаются.

На *рис. 5* представлен график рассеяния между оптической плотностью атмосферы и значениями в ИК-канале для всех выбранных точек. Для проведения анализа всё множество точек на графике было разбито на четыре квадранта, образованных вертикальной линией, проведённой на уровне 0,5 значения толщины атмосферы, и горизонтальной линией, проведённой на уровне 0,3 значения яркости в инфракрасном канале. Левый верхний квадрант соответствует низкой оптической плотности атмосферы и высокому значению яркости в инфракрасном канале (т.е. чистому небу). Правый нижний квадрант соответствует высокой оптической плотности атмосферы и низкому значению яркости в инфракрасном канале (т.е. облачному небу).

Как видно из приведённого графика, более 76% всех тестовых точек попали либо в левый верхний, либо в правый нижний квадрант, что соответствует ожидаемому результату. Значения, не попавшие в эти два квадранта, в большинстве случаев соответствуют ошибкам алгоритма, проявляющимся, когда источник попадает на стык двух соседних пикселей (правый верхний квадрант).

В следующем эксперименте было проведено сравнение восстановленных значений оптической плотности атмосферы в выбранных точках со значениями SI-индекса, рассчитанного для тех же точек. SI-индекс (Sharpness Index) — мера локальной резкости ночного космоснимка в заданной точке, рассчитываемая автоматической системой детектирования ночных судовых огней по данным VIIRS (Жижин и др., 2018). Значения, близкие к 1, соответствуют высокой резкости изображения, а значит, безоблачным участкам неба, так как облачность размывает сигнал. На рис. 6 (см. с. 256) представлены результаты проведённого сравнения. Вертикальная линия, как и в предыдущем эксперименте, предназначена для условного разделения облачных и безоблачных наблюдений по версии восстановленных значений оптической плотности и проведена по значению 0,5, в то время как горизонтальная линия условно разделяет облачные и безоблачные наблюдения по версии SI-индекса и проведена на уровне 0,85. В соответствии с ожиданиями облачные и безоблачные наблюдения, разделённые как при помощи SI-индекса, так и при помощи разработанного метода, должны соответствовать друг другу, а значит, все точки на графике должны распределиться между левым верхним квадрантом (который соответствует безоблачному случаю в обоих вариантах) и правым нижним (который соответствует облачному случаю в обоих вариантах). Как видно на рисунке, более 80% точек распределились в соответствии с ожиданиями.

Заключение

Новый метод локальной оценки атмосферных искажений на спутниковых снимках позволяет выделять на мультиспектральных изображениях области малых атмосферных искажений, размытые или полностью закрытые облаками. Это даёт возможность частично видеть «сквозь облака» с помощью восстановления (деконволюции) размытых и спектрально искажённых данных ДЗЗ с учётом локальных метеорологических условий, повышая надёжность детектирования и точность оценки параметров источников видимого и ИК-излучения на ночной стороне Земли (яркость, повторяемость, температура, субпиксельный размер, оптическая толща атмосферы, размер аэрозольных частиц).

В качестве направлений дальнейших исследований видятся:

- оценка качества деконволюции размытых и спектрально искажённых данных ДЗЗ, проводимой на основе разработанного метода;
- калибровка разработанного метода на источниках излучения с постоянной мощностью, в качестве которых могут быть использованы, например, морские платформы с постоянным уровнем освещения или большие морские суда, стоящие на рейде в удалении от других источников освещения и т.п. (Сао, Bai, 2014);
- калибровка разработанного метода с использованием результатов наземной сверки, для чего могут быть использованы, например, экспериментальные маяки с заранее известной мощностью излучения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-07710 «Исследование влияния метеорологических условий на оптические свойства атмосферы в видимом и ИК-диапазонах при дистанционном зондировании Земли в ночное время».

Литература

- 1. Жижин М. Н., Пойда А.А., Тютляева Е.О., Коноплев В.В., Элвидж К. Мониторинг ночных судовых огней по данным VIIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 101–119.
- 2. *Cao C., Bai Y.* Quantitative Analysis of VIIRS DNB Nightlight Point Source for Light Power Estimation and Stability Monitoring // Remote Sens. 2014. V. 6. P. 11915–11935.
- 3. *Elvidge C. D., Baugh K. E., Zhizhin M., Hsu F.*C. Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data // Remote Sens. 2015. V. 7(3). P. 3020–3036.
- 4. *Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E.* Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions // SIAM J. Optimization. 1998. V. 9. No. 1. P. 112–147.
- 5. *McHardy T. M., Zhang J., Reid J. S., Miller S. D., Hyer E. J., Kuehn R. E.* An improved method for retrieving nighttime aerosol optical thickness from the VIIRS Day/Night Band // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. Iss. 11. P. 4773–4783.
- 6. *Metari S., Deschenes F.* A new convolution kernel for atmospheric point spread function applied to computer vision // Proc. IEEE 11th Intern. Conf. Computer Vision (ICCV, 2007). Rio de Janeiro, Brazil, 2007. P. 1–8.
- 7. *Narasimhan S. G., Nayar S. K.* (2003a) Shedding light on the weather // Proc. 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03). 2003. P. 665–672.
- 8. *Narasimhan S. G., Nayar S. K.* (2003b) Interactive (De) weathering of an image using physical models // IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (In Conjunction with ICCV). Nice, France, 2003. P. 528–535.

Weather defined optical properties of atmosphere in the nighttime visible and infrared remote sensing

A.A. Poyda¹, M.N. Zhizhin², A.V. Andreev²

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow 123098, Russia E-mail: poyda_aa@nrcki.ru ² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: and@iki.rssi.ru

Multispectral nighttime remote sensing of the Earth allows detecting and evaluating various parameters of visible and infrared sources, including radiance, temperature, area, etc. One of the key difficulties in this case is the local variation of the optical properties of the atmosphere due to the absorption and scattering of radiation from the ground sources in clouds, fog, aerosols and precipitation. The article presents a new method of local estimation and correction of atmospheric distortions on nighttime satellite images. The method is based on models of multiple scattering of light rays in the atmosphere, allowing to consider its optical density and the average size of aerosol particles (fog, rain). Unlike previous works, which were primarily aimed at computer synthesis and evaluation of the effect of weather conditions on night photographs and computer games, this work is aimed at analyzing satellite images of the Earth's night surface and determining the true parameters of the light sources (electric lights, gas flares) and local atmospheric and meteorological conditions on multispectral images, as well as to restore blurred and spectrally distorted remote sensing data for local meteorological conditions.

Keywords: nighttime remote sensing, optical properties of atmosphere, correction of atmospheric distortions

Accepted: 20.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-251-259

References

- 1. Zhizhin M. N., Poyda A. A., Tyutlyaeva E. O., Konoplev V. V., Elvidge C. D., Monitoring nochnykh sudovykh ognei po dannym VIIRS (Monitoring of night fishing boat lights with VIIRS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 101–119.
- 2. Cao C., Bai Y., Quantitative Analysis of VIIRS DNB Nightlight Point Source for Light Power Estimation and Stability Monitoring, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, pp. 11915–11935.
- 3. Elvidge C. D., Baugh K. E., Zhizhin M., Hsu F. C., Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data, *Remote Sens.*, 2015, Vol. 7, No. 3, pp. 3020–3036, DOI: 10.3390/rs70303020.
- 4. Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E., Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM J. Optimization*, 1998, Vol. 9, No. 1, pp. 112–147.
- McHardy T. M., Zhang J., Reid J. S., Miller S. D., Hyer E. J., Kuehn R. E., An improved method for retrieving nighttime aerosol optical thickness from the VIIRS Day/Night Band, *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, Vol. 8, Issue 11, pp. 4773–4783.
- 6. Metari S., Deschenes F., A new convolution kernel for atmospheric point spread function applied to computer vision, In: *Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Computer Vision (ICCV, 2007)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2007, pp. 1–8.
- 7. Narasimhan S. G., Nayar S. K., (2033a) Shedding light on the weather, In: *Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03)*, 2003, pp. 665–672.
- 8. Narasimhan G., Nayar S. K., (2003b) Interactive (De) weathering of an image using physical models, *IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (In Conjunction with ICCV)*, Nice, France, 2003, pp. 528–535.