

НЕБЕСНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

СТАТИСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Атмосфера является сложной «мутной» средой. Так, солнечное излучение, принимаемое спутниковыми приборами в видимой части спектра, состоит не только из излучения, отраженного от наблюдаемого участка земной поверхности, но и от рассеянного в атмосфере, а также отраженного другими участками земной поверхности. Как результат – атмосфера накладывает свой отпечаток на принимаемое излучение. Процесс переноса излучения в атмосферной среде описывает уравнение, не имеющее в общем случае аналитического решения, поэтому на протяжении многих десятилетий развиваются численные методы его решения

Кадр видеозаписи информационного лазерного луча, рассеянного над Томском в экспериментах с оптической загоризонтной связью

Н а сегодня существует много методов решения уравнения переноса излучения в атмосфере, однако большинство из них имеют свои ограничения на начальные или граничные условия либо на оптические характеристики молекулярно-газовых составляющих атмосферы. Этих недостатков лишен *метод Монте-Карло* или, другими словами, *метод статистического моделирования*. Он подходит для практически любых задач атмосферной оптики, а для многих из них является единственным на настоящий момент эффективным способом решения.

Хотя метод Монте-Карло сегодня широко применяется в атмосферной оптике, ниже мы остановимся только на двух направлениях его использования, которые развиваются в лаборатории распространения оптических сигналов томского Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН. Речь идет об атмосферной коррекции спутниковых изображений и лазерной оптической связи с использованием рассеянного в атмосфере излучения.

Сверху видно все

Современный мир немыслим без самой разнообразной спутниковой информации, которую можно получить буквально для любой точки земной поверхности. Однако использование таких данных имеет свою специфику: для устранения атмосферного влияния спутниковым изображениям требуется математическая обработка – *атмосферная коррекция*.

Эта задача существует уже десятилетия, однако все разработанные методы ее решения имели ограниченную применимость из-за огромного объема спутниковой информации, ведь провести необходимый учет всех основных факторов, влияющих на перенос излучения, очень затруднительно за небольшое время. Поэтому автор, совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. В. В. Беловым, разработал новый алгоритм атмосферной коррекции, который объединил ряд приемов, позволивших значительно сократить время расчетов (Белов, Тарасенков, 2012).

В основу алгоритма положена теория линейных систем, согласно которой процесс формирования изображения характеризуется операторами действия атмосферы как линейной системы. Каждый подпроцесс формирования изображения можно связать с универсальной характеристикой, которая описывает, как излучение взаимодействует с атмосферой. От одного участка земной поверхности к другому эти функции меняются, но для соседних участков это изменение незначительно.

В результате был разработан ряд критериев и приближенных формул, которые при заданной точности расчета позволяют не выполнять повторные расчеты для областей параметров, где эти характеристики меняются незначительно. В свою очередь для расчета каждой величины, определяющей перенос, разработан свой алгоритм метода Монте-Карло. Как показали тестовые расчеты, использование всех этих приемов позволяет сократить время расчетов более чем в шесть раз.

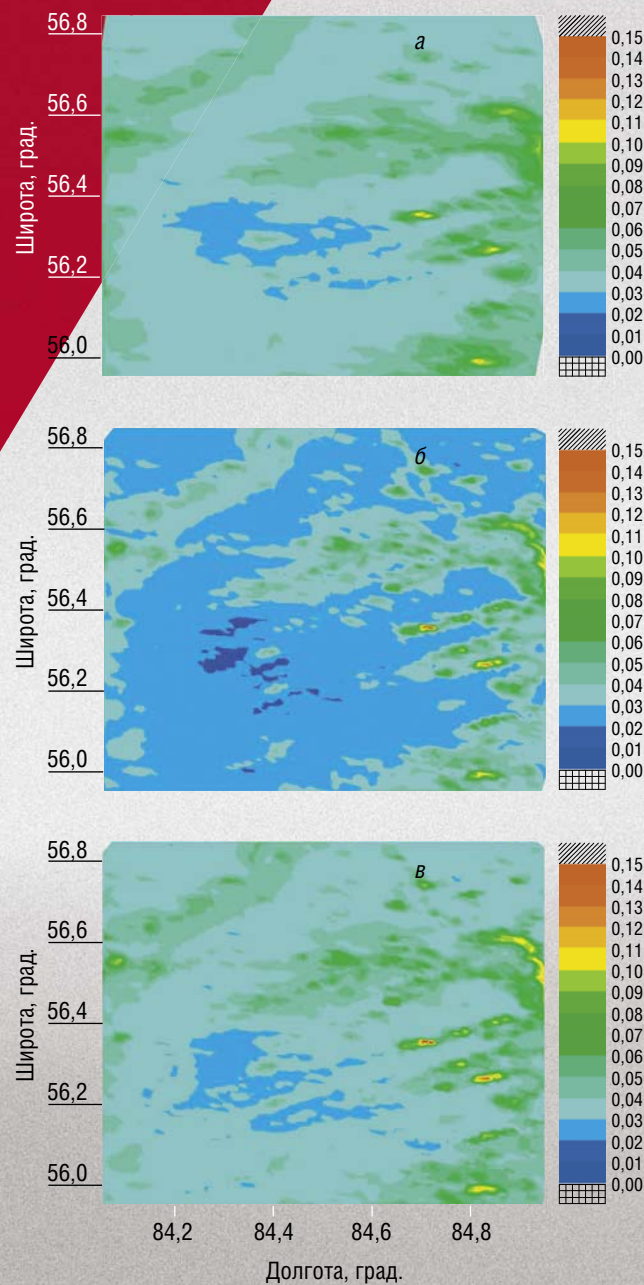


ТАРАСЕНКОВ Михаил Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН (Томск). Автор и соавтор 46 научных работ

Ключевые слова: метод Монте-Карло, уравнение переноса излучения, атмосферная коррекция, оптико-электронная загоризонтная (бистатическая) связь.

Key words: Monte Carlo method, radiative transfer equation, atmospheric correction, over-the-horizon (bistatic) optoelectronic communication

© М. В. Тарасенков, 2014



В качестве примера работы комплекса программ на основе метода Монте-Карло рассмотрим атмосферную коррекцию для прибора MODIS спутников TERRA/AQUA, выполненную для изображений участка Томской области, сделанных 14 и 15 июля 2013 г. на длине волны 0,645 мкм с пространственным разрешением 500 м.

В первую очередь нужно выбрать оптическую модель атмосферы. Для этого на основе наземных данных станции «Aeronet» определяется аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы – величина, характеризующая содержание частиц аэрозоля. Из осредненных моделей атмосферы выбирается та, которая наиболее близка по значению АОТ. Данные спутниковых измерений MODIS и оптическая модель являются исходными для расчета величин, определяющих перенос излучения, с помощью алгоритмов метода Монте-Карло.

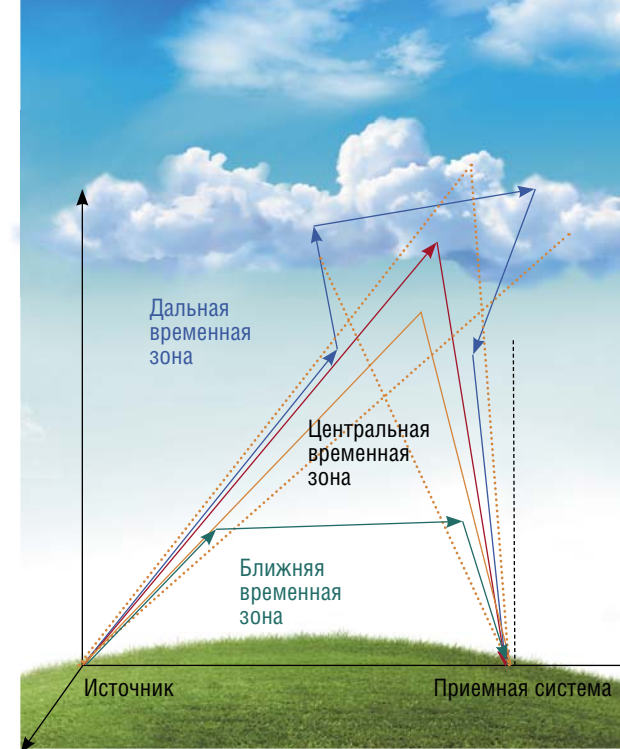
Полученные величины вносятся в систему нелинейных уравнений, которые решаются численно. Результатом работы программы являются значения коэффициентов отражения земной поверхности на длине волны 0,645 мкм с учетом влияния атмосферных искажений. Полученные значения на 15 июля в среднем на 0,0088 меньше значений 14 июля. И действительно: изображение, полученное при добавлении этой величины к коэффициентам отражения 15 июля, будет практически идентично изображению, полученному 14 июля.

Летом в течение суток в отсутствии осадков отражательные свойства поверхности в среднем меняются незначительно. В целом предложенный комплекс программ дает адекватные результаты для ситуаций с низким количеством аэрозоля в атмосфере, но требует использования более близких к реальным ситуациям атмосферных оптических моделей.

Результаты расчета коэффициентов отражения участка Томской области на основе данных, полученных 14.07.2013 г. (а) и 15.07.2013 г. (б); модифицированные значения коэффициентов отражения на 15.07.2013 г. после коррекции (в)

дится в излучение лазерного источника. Пройдя через атмосферу, это излучение регистрируется приемным прибором и декодируется. Однако для работы современных систем лазерной оптической связи необходимо, чтобы источник и приемная система находились в прямой видимости и не экранировались посторонними объектами.

Этого недостатка лишена лазерная оптическая связь на рассеянном в атмосфере излучении (частный случай – загоризонтная оптическая связь). Суть этого спо-



Учет многократного рассеяния лазерного излучения в случае, когда источник и приемная оптическая система расположены вне зоны прямой видимости, возможен только с использованием метода Монте-Карло

соба состоит в том, что посылаемое лазерной системой излучение рассеивается в атмосфере на взвешенных частицах, аэрозоле или облачности; в свою очередь, рассеянное излучение, содержащее передаваемую информацию, принимается оптическим прибором. Идея данного типа связи появилась довольно давно (например, Пожидаев, 1977), но ее практической реализации мешало отсутствие подходящих лазерных источников и достаточно чувствительных приемных приборов.

Исследователи из ИОА СО РАН с 2011 г. начали проводить полевые эксперименты по оптической связи на рассеянном излучении. В них использовалось импульсное лазерное излучение на длине волны 510 нм, а информация кодировалась задержкой между опорным и информационным импульсом: 67 мкс соответствовала «0», а 65 мкс – «1».

Эксперименты показали реальную возможность осуществления устойчивой оптической связи на основе излучения, рассеянного облачностью или приземным аэрозолем. Остается открытым вопрос об оптимальных схемах связи и их дальности действия. Для решения этой задачи проводятся теоретические исследования.

Так, действие атмосферы на произвольный по времени импульс можно определить, зная реакцию атмосферного канала на импульс нулевой длительности и единичной мощности. Сложность определения этой реакции состоит в том, что учет многократного рассеяния для такой схемы расположения источника и прием-

ной системы возможен только методом Монте-Карло. В силу того что угол расходимости лазерного излучения и угол поля зрения малы, область пересечения этих углов также мала.

Как показал анализ, ранее известные алгоритмы метода Монте-Карло для решения подобных задач имеют низкую эффективность в ближней и дальней временных зонах импульсных реакций. В связи с этим был разработан новый алгоритм, который позволил значительно повысить эффективность статистического моделирования, уменьшив время расчетов для получения той же погрешности не менее чем в 6 раз, а в отдельных случаях – даже в 90 раз.

Проведенные расчеты пока не дают ответа, какие схемы связи на рассеянном излучении являются оптимальными, однако можно утверждать, что наличие облачности в центральной временной зоне усиливает принимаемый сигнал, а интенсивных рассеивающих слоев в ближней временной зоне – снижает качество связи и уменьшает потенциальный объем передаваемой информации.

Работы томских оптиков доказали, что метод Монте-Карло (метод статистического моделирования) является на сегодня мощным инструментом для решения самых разных задач атмосферной оптики: от переноса солнечного излучения до распространения лазерного излучения. А с учетом дальнейшего роста производительности вычислительной техники можно утверждать, что роль этого метода в будущем будет только возрастать.

Литература

Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстродействию RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26, № 07. С. 564–571.

Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н. и др. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Ч. 1. Методы исследования // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26, № 04. С. 261–267.

Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы счета / Ред. Ж. Ленобль; пер. Ж.К. Золотовой. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 263 с.

Послание за горизонт

История оптической связи началась с сообщений, передаваемых с помощью костров, а позднее – семафорной азбуки. Во второй половине XX в. появилась возможность построения лазерных систем оптической связи, способных передавать не только телефонные, но и телевизионные и компьютерные сигналы.

Принцип работы таких систем состоит в том, что передаваемая информация некоторым способом вво-