

Применение методов численного моделирования результатов дистанционного зондирования при исследовании процессов атмосферы и подстилающей поверхности

А.Н. Красовский, А.Г. Светашев, Е.И. Сидоркина, Н.В. Дорошко

*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,
Республика Беларусь, 220045, г. Минск, ул. Курчатова 7
E-mail: natashka_d10.05@mail.ru*

Дистанционное зондирование природных объектов электромагнитным излучением выполняется посредством различных инструментов: спутниковых систем, лидаров, радаров и т.д. Комплексность исследований подобного рода дает возможность детально анализировать различные районы подстилающей поверхности, а также характеристики слоев атмосферы. Точность выбора соответствующего инструмента и оперативная обработка получаемых данных, с применением методов численного моделирования процессов переноса излучения, позволяет улучшить качество исследования и прогноза атмосферных явлений на различных территориях. В работе представлены результаты численного моделирования процессов распространения лазерных импульсов фемтосекундной длительности в гетерогенной атмосфере.

Ключевые слова: дистанционные методы, численное моделирование, лазерные импульсы, зондирование атмосферы

Application of Numerical Simulation Methods for Remote Sensing Results in the Study of Atmospheric and Underlying Surface Processes

A.N. Krasouski, A.G. Svetashev, E.I. Sydorkina, N.V. Dorozko

National ozone monitoring research center of BSU

Remote sensing of natural objects by electromagnetic radiation is carried out by means of various instruments: satellite systems, lidars, radars, etc. The complexity of such studies makes it possible to analyze in detail various areas of the underlying surface, as well as the characteristics of the atmospheric layers. The accuracy of the selection of the appropriate tool and the prompt processing of the data obtained, using methods of numerical modeling of radiation transfer processes, allows improving the quality of research and forecasting of atmospheric phenomena in various territories. The paper presents the results of numerical simulation of the propagation of femtosecond laser pulses in a heterogeneous atmosphere.

Keywords: remote sensing, numerical simulation, laser pulses, atmospheric sounding

Введение

Дистанционное зондирование – процесс сбора информации об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ними. К дистанционному зондированию относят все виды неконтактных съемок, которые проводятся с различных измерительных платформ: летательных воздушных и космических аппаратов (самолетов, вертолетов, космических кораблей, спутников и т. д.), судов и подводных лодок, наземных станций. При этом снимок определяется как двумерное метрическое изображение конкретных объектов, получаемое целенаправленно в результате дистанционной регистрации и (или) измерения собственного или отраженного излучения, и представляет собой наиболее целесообразную форму измерения, регистрации и визуализации излучения, несущего географическую информацию об исследуемых объектах. За последние десятилетия

существенно возросли объем, разнообразие и качество материалов дистанционного зондирования. К настоящему времени накоплен огромный фонд (более 100 млн.) аэрокосмических снимков, полностью покрывающих всю поверхность Земли, а для значительной части районов – с многократным перекрытием [1].

Дистанционное зондирование является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с данным объектом.

Методы и методика

Методы зондирования могут быть:

- 1) пассивные – с использованием естественного отраженного или вторичного теплового излучения объектов, обусловленного солнечной активностью,
- 2) активные – использующие вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия.

Одним из примеров систем, использующих пассивные методы дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли, являются искусственные спутники (ИСЗ). Среди параметров физического состояния подстилающей поверхности, таких как: соленость, степень волнения, состояние ледяного покрова (для водной поверхности) и влажность, степень шероховатости, наличие и состояние растительного покрова (для поверхности суши) в настоящее время наибольший прогресс достигнут при дистанционном измерении температуры подстилающей поверхности.

Определение температуры подстилающей поверхности основано на измерении общего уходящего излучения в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм, выделении из него вклада конкретной излучающей поверхности, на оценке влияния промежуточной толщи атмосферы (между излучающей поверхностью и ИСЗ) и введении при необходимости поправок, на определении радиационной температуры излучающей поверхности с последующим переходом к термодинамической (физической) температуре. При этом, точность дистанционного определения температуры поверхности моря по данным спутниковых наблюдений составляет в среднем 1 К, и в поле этой температуры хорошо прослеживаются поверхностные фронты, зоны апвеллинга, мезомасштабные циркуляции (вихри), течения, что позволяет более детально анализировать атмосферу и составлять прогнозы погоды и климата различных масштабов.

Примерами активных сенсоров дистанционного зондирования являются радар и лидар, которыми измеряется задержка во времени между излучением и регистрацией возвращенного сигнала, таким образом, определяя размещение, скорость и направление движения объекта. Методы радиолокации (зондирования в радиодиапазоне) ограничены измерениями интенсивности осадков и количества влаги в атмосфере, в то время как состав самой атмосферы определить уже нельзя – газы поглощают радиоволны в тысячу раз слабее, чем водяной пар.

Применение дистанционных лазерных (лидарных) измерений системами орбитального и наземного базирования дает возможность определить выбранную характеристику воздушной среды на любом направлении лазерного луча и получить самые разнообразные сведения о свойствах атмосферы на различных высотах, а также реализовать хорошее пространственно-временное разрешение зондируемых объектов (облачности, слоя атмосферы и т.п.), связанное с малой длительностью и высокой частотой повторения зондирующих импульсов. Эти возможности обуславливают интенсивное развитие лидарных методов.

Методы лазерного зондирования обеспечивают получение профилей или полей различных параметров атмосферы (облачность, аэрозоль, газовые составляющие, температура, влажность, турбулентность, скорость ветра) с исключительно высоким

временным и пространственным разрешением, обладая при этом рекордными концентрационными чувствительностями химического состава. Наблюдение указанных компонент базируется на использовании различных физических механизмов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой как гетерофазной динамической средой. К настоящему времени разработаны эффективные методы и технологии, основанные на механизмах упругого (молекулярное рассеяние и рассеяние Ми на частицах аэрозоля, резонансное поглощение) и неупругого (комбинационное рассеяние и флуоресценция атмосферных газов и аэрозолей) взаимодействия [2-3].

Результаты и их анализ

При использовании эффектов упругого взаимодействия излучения с атмосферной средой приемная система лидара настраивается на длину волны излучения передатчика. Принимаемый монохроматический сигнал несет информацию о высоте нижней кромки облачности и фазовом состоянии облаков. В условиях безоблачной атмосферы высотный потолок зондирования может достигать 100 – 120 км, при этом открывается возможность получения количественной информации о вертикальной стратификации аэрозоля, перистых и полярных облаков верхнего яруса.

Для решения более сложных задач, например для определения спектра размеров частиц аэрозоля, зондирование производится на нескольких длинах волн. Длины волн и их количество выбираются таким образом, чтобы исключить влияние эффектов поглощения газовыми компонентами воздуха и обеспечить наибольшую информативность измерений относительно спектра размеров частиц. Для этого зондирование ведется в окнах прозрачности атмосферы, а длины волн должны быть сравнимыми с размерами частиц аэрозоля [4].

Масштабы использования явления неупругого взаимодействия (спонтанное комбинационное рассеяние (СКР), спонтанная флуоресценция) в настоящее время непрерывно расширяются, поскольку информативность их по отношению к параметрам аэрозольно-газовой атмосферы существенно выше, несмотря на более низкие показатели оптического взаимодействия. Вид спектра СКР определяется комбинацией разрешенных переходов между возможными вращательными и колебательно-вращательными состояниями и является уникальным для каждой молекулы, что позволяет проводить дистанционное определение состава атмосферы на основе анализа оптического спектра лидарного отклика [5].

Лидарные дистанционные измерения концентраций аэрозолей и малых газовых примесей, загрязняющих воздушный бассейн промышленных центров, позволили обойтись без использования контактных датчиков, работавших в основном только в пределах десятков метров от земной поверхности, и дистанционно определять стратификацию, пространственную протяжённость, динамику развития, распространение и распределение аэрозольных слоёв и газовых примесей техногенного происхождения, а также оценивать их концентрацию. Наибольшее распространение получили надежные в эксплуатации твердотельные лазеры на стекле с неодимом (Nd: YAG) [5]. Их характеристики обеспечивают измерения стратосферного аэрозоля (10—30 км), температуры и плотности атмосферы на высотах 30—100 км, при этом используется соответственно аэрозольное или молекулярное рассеяние. На длине волны 532 нм по доплеровскому сдвигу можно определять высотный профиль ветра на высотах 10 – 50 км путем зондирования вертикальным и двумя наклонными лучами.

В качестве источников излучения в лидарных системах дистанционного зондирования необходимы лазеры, генерирующие короткие мощные импульсы излучения с малой угловой расходимостью. Для зондирования тропосферного аэрозоля и малых газовых компонентов пограничного слоя атмосферы эффективны

твердотельные лазеры на Ti:Sapphire [6]. Лидар предназначен для получения карт распределения контролируемого параметра с борта самолета или орбитальной платформы, при этом необходима высокая частота повторения импульсов. По типу активной среды лазеры, используемые для зондирования атмосферы, условно подразделяются на несколько классов: твердотельные, газовые, жидкостные, полупроводниковые, эксимерные и лазеры на свободных электронах [6-7]. Эксимерный лазер (XeC1) позволяет измерять на основе метода дифференциального поглощения высотные профили озона на высотах 10—50 км [8]. Используя лазеры, излучающие на И2-линии натрия (589 нм), можно определять высотное распределение концентрации мезосферного натрия, температуру и ветер в атмосфере на высотах 80—100 км, а также параметры внутренних гравитационных волн.

В настоящей работе для численного моделирования импульсов излучения, широко применяемого в системах лазерного зондирования атмосферы титан-сапфирового лазера, использовалось выражение (1) импульса с гауссовой огибающей, несущей частотой и положительным чирпом:

$$E(z, t) = \exp\left(-2 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right) * \sin(\omega t - kz + \varphi) \quad (1)$$

где E - вектор напряженности электрического поля;

z - расстояние;

t - время;

ω - частота излучения импульса (несущая);

k - волновой вектор;

φ - чирп;

τ - полуширина гауссовского контура огибающей импульса, которую можно считать длительностью.

На рис.1 показан пример численного моделирования динамики поля (А) и спектра (В) ультракороткого лазерного импульса при рассеянии на кислороде в режиме вынужденного комбинационного рассеяния.

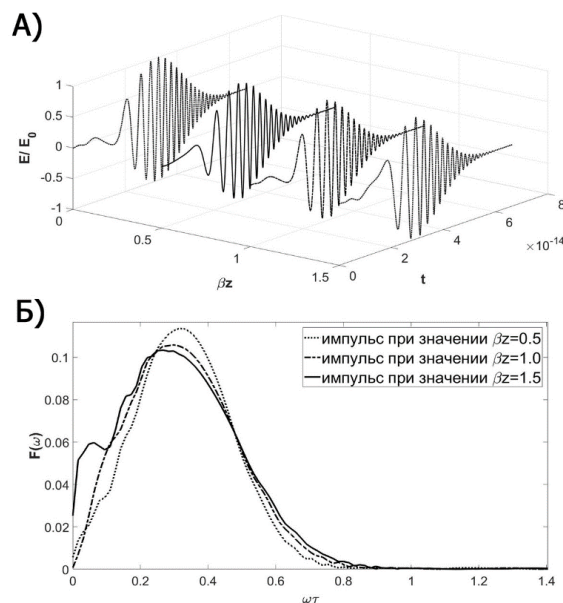


Рис. 1. Пример динамики поля (А) и спектра (В) 2π-импульса при рассеянии на кислороде

Моделирование распространения волны проводилось как с волновым уравнением второго порядка, так и с редуцированной его версией.

С целью дистанционного зондирования слоев атмосферы была разработана специализированная программа. Она описывает динамику и взаимодействие ультракороткого лазерного импульса со средой в условиях проявления эффектов когерентного комбинационного рассеяния, где представлены три основные модели вещества и его взаимодействия с излучением. Материальные уравнения среды описывают нелинейный осциллятор с нормальной координатой, приведенной массой, частотой и феноменологическими временами релаксации, который возбуждается вынуждающей силой, пропорциональной произведению квадрата поля на разность населенностей уровней. Так как при определенных условиях во время распространения импульса может возникать явление филаментации – формирование стабильной небольшой структуры, называемой филаментом – произведена оценка необходимых входных параметров лазера и зондирующего импульса для образования филамента.

Выводы

Применение методов дистанционного зондирования атмосферы позволяет также валидировать данные численного моделирования атмосферы и климата с использованием показателей орбитальных, радарных и лидарных систем. Такая система мониторинга характеристик атмосферы является важнейшей составляющей глобальной системы наблюдений. Особое значение следует отметить при использовании методов дистанционного зондирования для восстановления данных метеовеличин и получении информации о погоде и климате с труднодоступных мест (к примеру, территории океанов и морей). Это позволяет восполнить недостающий банк данных для дальнейшего исследования. Для выполнения работы использовались снимки метеоэлементов со спутниковых (Eumetsat, NASA) и радарных (метеорадар) систем, что позволило точно оценить состояние атмосферы над конкретной территорией. Перспективным представляется создание нейронных сетей глубокого обучения для распознавания барических образований с целью определения опасных метеорологических явлений с применением метод дистанционного зондирования атмосферы, что будет выполнено в дальнейшем.

Комплексность использования методов численного дистанционного зондирования верхних и нижних слоев атмосферы позволяет более точно собирать, анализировать, распознавать всю необходимую информацию для составления прогноза погоды и климата на территориях различного масштаба. Результаты данных численного моделирования дистанционного зондирования могут быть применены для создания нейронных сетей с целью распознавания опасных метеорологических явлений на конкретной территории, что выражает практическую значимость исследований подобного рода.

Литература

1. Сутыркина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли. Иркутск: издательство ИГУ, учебное пособие, 2013 – 167 с.
2. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы. //Оптика атмосферы и океана, – 2010 –23, 10.
3. Матвиенко Г.Г., Веретенников В.В., Креков Г.М., Крекова М.М. Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей с использованием фемтосекундного лидара белого света // Оптика атмосферы и океана, – 2003 –16,12.
4. Иванов А.П., Малевич И.А., Чайковский А.П. Многофункциональные лидарные системы. Минск: Изд-во Университетское, 1986. – 286 с.

5. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere / Claus Weitkamp, editor; foreword by Herbert Walther // Springer series in optical sciences, 2006.V.102. - 456 p.
6. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / Под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана, 2002. – 527 с.
7. Handbook of Laser and Optics / Ed. by F. Trager. N. Y.: Springer Science + Business Media, 2007 – 1320 p.
8. Зуев В.В. Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. – 306 с.