

Статистическое имитационное моделирование в атмосферно-оптических и акустических приложениях*

В. В. БЕЛОВ¹, Ю. Б. БУРКАТОВСКАЯ^{2,3}, А. В. КОЖЕВНИКОВА¹,
М. В. ТАРАСЕНКОВ¹, Л. Г. ШАМАНАЕВА¹

¹Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Томский политехнический университет, Россия

³Томский государственный университет, Россия

e-mail: belov@iao.ru, tracey@tpu.ru, avk@iao.ru,
tmv@iao.ru, sima@iao.ru

Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Кожевникова А.В., Тарасенков М.В., Шаманаева Л.Г. Статистическое имитационное моделирование в атмосферно-оптических и акустических приложениях // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 57–75.

Приводятся наиболее значимые результаты применения метода Монте-Карло, полученные в Институте оптики атмосферы СО РАН, при решении задач исследования закономерностей формирования изображений объектов, атмосферной коррекции спутниковых данных, бистатистических атмосферно-оптических каналов связи и оценки энергетических характеристик акустического излучения.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, формирование изображения, атмосферная коррекция, бистатистическая оптическая связь, акустическое излучение.

Belov V.V., Burkatovskaya Yu.B., Kozhevnikova A.V., Tarasenkov M.V., Shamanaeva L.G. Statistical imitation modeling for atmospheric-optical and acoustic applications // Computational Technologies. 2014. Vol. 19, No. 3. P. 57–75.

Implementation of the Monte-Carlo method for various applications has a long history at the IAO SB USSR AS (at present IAO SB RAS). Initially it was triggered by atmospheric-optical problems applied for propagation of laser radiation in the atmosphere and sensing of its optical and microphysical characteristics. It continued by the vision theory applications in turbid media, etc.

In the development and application of the Monte Carlo method we followed two main directions. The first one was focused on application of this method for the solving optical radiation transfer problems through stochastic cloudiness. The second one was focused on adaptation and modification of known algorithms and their subsequent application to a solution of new problems in atmospheric optics and acoustics. We now briefly outline the main results obtained in these directions.

For investigations in the framework of the vision theory, we have developed a complex of Monte Carlo algorithms allowing us to account all the factors that influence formation of images of extended and small-size objects in the UV wavelength range.

Numerical statistical experiments were performed for a wide range of optical-geometrical conditions of observation of objects located on the Earth surface, in the atmosphere, and outside of it. It allowed us to determine, in particular, the reflection characteristics of objects in the atmosphere, conditions of solar illumination, and directions of sighting

*Работа выполнена при поддержке Госконтракта 14.515.11.0030, Президентской программы «Ведущих научных школ РФ» (грант № НШ-4714.2014.5) и Интеграционного проекта СО РАН № 131а.

to the object at which it becomes invisible. Some results on image formation in active vision systems with range gated receivers are also included in the work.

In 2011–2014 we have investigated bistatic (over-the-horizon) electro-optical communication system on scattered radiation. To perform this, a new algorithm of statistical simulation of pulsed transfer characteristics of these communication channels was developed. The algorithm was based on the double local estimation; it reduces computing time by orders of magnitude compared to the classical variant. Examples of parallel calculations by the Monte Carlo method are also given.

Results of application of the Monte-Carlo method for estimation of the energy characteristics of acoustic radiation that propagates in vibrant turbulent atmosphere are presented in the present work; we anticipate that the refraction effect is allowed.

Keywords: Monte Carlo method, imaging, atmospheric correction, bistatic optical communication, acoustic radiation.

Введение

Примерно с середины XX века в теории переноса коротковолнового излучения в рассеивающих и поглощающих средах с заметным ускорением стал применяться метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло. Вначале он был использован для решения проблем защиты ядерных реакторов, затем — в других областях, в том числе в атмосферной оптике. Развитие этого метода связано с Вычислительным центром СО АН СССР (г. Новосибирск) и с именами акад. Г.И. Марчука и его учеников, прежде всего — чл. корр. Г.А. Михайлова [1], научная школа которого и сегодня продолжает лидировать при создании новых эффективных модификаций метода и конкретных алгоритмов для решения стационарных и нестационарных задач, связанных с распространением оптического излучения в стратифицированной и стохастической атмосфере. В Институте оптики атмосферы СО АН СССР (затем СО РАН) метод Монте-Карло стал применяться для решения атмосферно-оптических задач с самого начала создания института, и руководителем этого направления исследований стал ученик новосибирской школы д.ф.-м.н. Г.М. Креков [2]. Он же приложил значительные усилия к разработке оптических моделей атмосферы, адаптированных для статистического моделирования распространения света в дисперсных средах [3].

Развитие и применение метода Монте-Карло в ИОА СО РАН в атмосферной оптике осуществляются по двум основным направлениям. Первое связано с созданием теории решения этим методом задач переноса оптического излучения через стохастическую облачность. Прогресс в решении данного класса задач методом статистических испытаний связан в том числе с именем научного сотрудника ИОА СО РАН д.ф.-м.н. Г.А. Титова [4]. Второе направление развития метода состоит в адаптации и модификации известных алгоритмов и их дальнейшем применении для решения новых задач атмосферной оптики.

Ещё одно направление использования метода Монте-Карло в ИОА СО РАН связано с теорией распространения акустического излучения в турбулентной атмосфере. В настоящее время в этом плане получен ряд результатов, примеры которых будут приведены ниже.

Метод Монте-Карло успешно применяется как в институтах СО РАН, так и в других научных центрах страны. В настоящей статье представлены результаты использования статистического имитационного моделирования, полученные в последнее время в ИОА СО РАН.

1. Моделирование методом Монте-Карло процесса переноса изображений в УФ-диапазоне

Проблеме влияния рассеивающих и поглощающих сред на качество изображения объектов, оценке дальности их обнаружения посвящено значительное число работ, в том числе монографии (см., например, [5, 6]), обобщающие результаты этих исследований. Общим для них является то, что в основном они выполнены для видимого или ИК диапазонов длин волн. Определённый интерес представляет исследование процесса формирования и переноса изображений в ультрафиолетовой области спектра. На сегодня существуют лишь единичные работы, касающиеся этой проблемы (например, [7–10]). Диапазон при длинах волн $\lambda > 0.33$ мкм практически так же перспективен для функционирования систем наблюдения, как и видимый, поскольку в нём в атмосфере отсутствуют интенсивные полосы поглощения. На длинах волн 0.28–0.33 мкм поглощение атмосферных газов существенно (в первую очередь в полосе поглощения озона [11]), что, с одной стороны, заметно снижает приходящий в оптическую систему сигнал, с другой — подавляет процесс рассеяния, что в свою очередь уменьшает влияние искажающих изображение факторов, связанных с данным процессом. Поэтому УФ-диапазону длин волн ещё предстоит занять свою нишу в ряду практических приложений.

Дальность видимости удалённых объектов при наблюдении через атмосферу в видимой и ультрафиолетовой областях спектра существенно зависит как от отражающих свойств поверхности предмета, так и от условий природного освещения, определяющих энергетическую освещённость обращённой к наблюдателю поверхности объекта, и энергетической яркости того фона, на котором эта поверхность позиционируется. По мере увеличения расстояния различие по яркости между объектом и фоном уменьшается за счёт вуалирующего действия рассеянного атмосферным аэрозолем света. Для оценки эффективности электронных систем наблюдения в УФ-области используется хорошо известное определение контраста, которое характеризует регистрируемое (видимое) относительное различие по энергетической яркости:

$$k = (I_o - I_\phi)/(I_o + I_\phi),$$

где I_o и I_ϕ — яркость объекта и фона соответственно. Авторами настоящей статьи исследовано влияние условий освещения, процессов рассеяния, поглощения, отражения и переотражения в оптическом диапазоне длин волн 0.2–14.0 мкм на характеристики изображений объектов на земной поверхности, в атмосфере и вне её. В частности, определены оптико-геометрические условия *невидимости* отражающих объектов на фоне неба в диапазоне 0.2–0.3 мкм (рис. 1).

В 2004 г. в ИОА СО РАН была проведена серия экспериментальных исследований влияния оптических условий в атмосфере на контраст изображений объект/небосвод. Результаты этих исследований побудили авторов настоящей статьи выполнить численные эксперименты методом Монте-Карло [12], имитирующие полевые измерения. На рис. 2, а приведены данные сравнения численных и полевых экспериментов по наблюдению малоразмерного удалённого объекта (шпиль телевизионной башни в г. Томске, рис. 2, б) на фоне небосвода.

Сравнение нормированного на максимальное значение контраста с тестом показывает, что результаты расчётов хорошо описывают поведение измеренного в полевых условиях нормированного контраста для длин волн $\lambda \sim 0.360$ мкм с изменением оптической длины трассы от наблюдателя до объекта. Из экспериментов и модельных

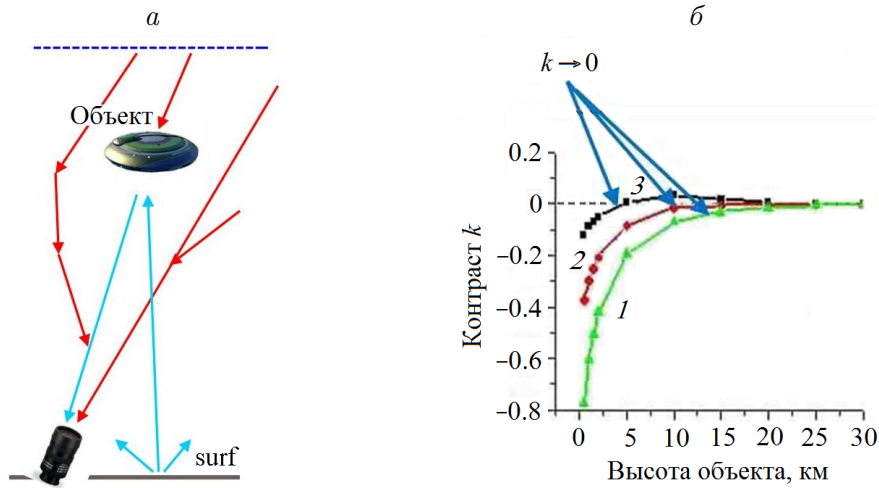


Рис. 1. Схема формирования изображения объект/небосвод (*a*) и зависимость контраста объекта k на фоне неба от высоты (*б*): $\lambda = 0.3$ мкм, коэффициент отражения земной поверхности $\rho_{\text{surf}} = 0.5$, кривые 1–3 соответствуют коэффициенту отражения объекта $\rho_o = 0, 0.5$ и 10

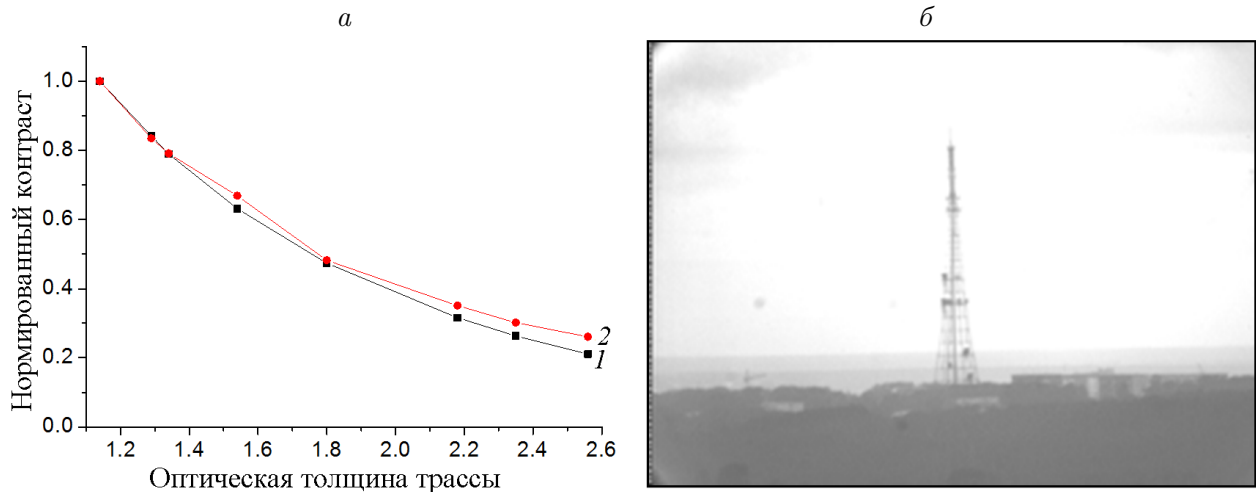


Рис. 2. Зависимость нормированного на максимальное значение контраста от оптической длины трассы от наблюдателя до объекта (*a*): период и время проведения полевого эксперимента с 16.07 по 05.08.2004 в 9:00 ч; 1 — экспериментальные значения контраста, 2 — расчётные значения контраста; изображение тестового объекта (*б*)

расчётов следует, что при наблюдении малоразмерных удалённых объектов на фоне неба при изменении оптической длины трассы в пределах $1 < \tau < 4$ коэффициент контраста изображения объект/фон уменьшается в 10 раз [12].

2. Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отражённых сферической земной поверхностью

Отражение земной поверхностью излучения — одна из составляющих процесса формирования изображения объектов, наблюдаемых через рассеивающие и поглощающие среды, включая атмосферу. Модель этого процесса включает следующие компоненты:

нерассеянное и рассеянное излучение от точки (пиксела) наблюдаемого объекта, солнечная (или аналогичная ей) световая дымка и боковой подсвет, или поверхностная дымка (т. е. излучение от других точек объекта или фоновой поверхности, влияющее на регистрируемые приёмником световые потоки). Последнюю компоненту наиболее сложно исследовать теоретически (экспериментальное её изучение практически не осуществимо).

В рамках теории линейных систем были созданы алгоритмы имитационного моделирования данного процесса в системе атмосфера—сферическая земная поверхность, что позволило оценить уровень его влияния на качество изображения [13].

На рис. 3 иллюстрируется физический смысл бокового подсвета (или поверхностной световой дымки). Задача состоит в оценке вклада в изображение точки A точек A' земной поверхности и размеров той области вокруг наблюдаемой точки A , в пределах которой этот учёт необходимо осуществлять. Такая оценка особенно сложна, если формирование бокового подсвета происходит в условиях многократного рассеяния излучения в атмосфере и переотражения световых потоков от земной поверхности.

Примеры результатов численных экспериментов, выполненных для оценки влияния расстояния между точками A и D D_h на интенсивность поверхностной дымки I_{surf} , иллюстрирует рис. 4. Расчёты приводят к следующим выводам. При малых значениях метеорологической дальности видимости $S_M = 1\text{--}2$ км с ростом параметра D_h интенсивность поверхностной дымки уменьшается (рис. 4, а), при $S_M = 15\text{--}25$ км — увеличивается (рис. 4, б). При промежуточных значениях S_M сначала с ростом D_h интенсивность I_{surf} может увеличиваться, а затем — уменьшаться (см., например, рис. 4, в). В результате имитационного моделирования это можно объяснить следующим образом. С ростом расстояния D_h увеличивается радиус бокового подсвета, т. е. излучение приходит с большей области поверхности. Одновременно возрастает оптическая толщина слоя между приёмником и точками поверхности. При малых значениях метеодальности видимости преобладающим является рост оптической толщины, при больших — рост радиуса бокового подсвета. В связи с этим при промежуточных значениях дальности сначала с ростом D_h может наблюдаться рост интенсивности поверхностной дымки, а затем — её уменьшение.

Представленный алгоритм расчёта позволяет рассчитать интенсивность излучения Солнца, отражённого от поверхности Земли при любом расположении Солнца и приёмника и любом направлении линии визирования. При небольших модификациях алгоритма можно проводить расчёты при разных осесимметричных законах отражения поверхности.

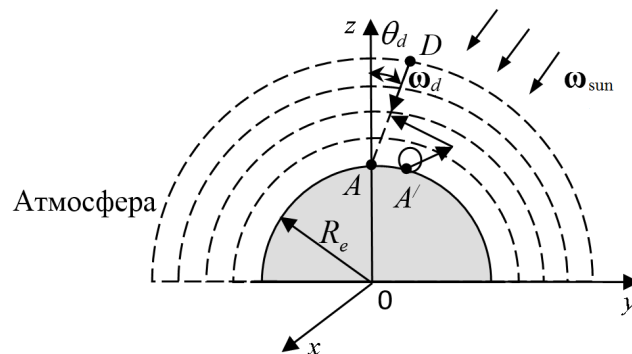


Рис. 3. Геометрическая схема численных экспериментов

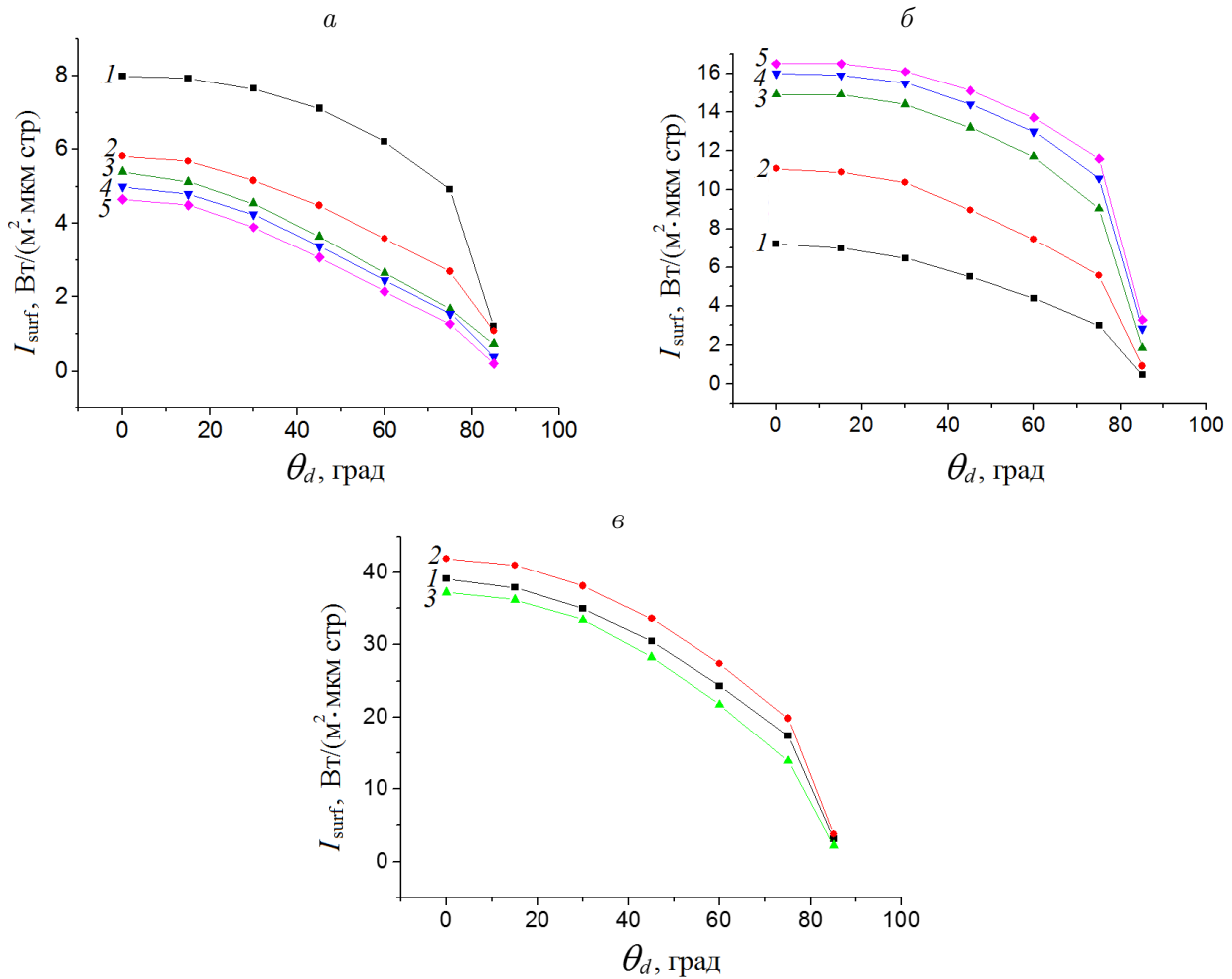


Рис. 4. Интенсивность I_{surf} поверхностной дымки при фиксированных расстояниях от наблюдателя до объекта. *a* — $\lambda = 0.4 \text{ мкм}$, $S_M = 1 \text{ км}$, $\theta_d = 60^\circ$; *б* — $\lambda = 0.8 \text{ мкм}$, $S_M = 25 \text{ км}$, $\theta_d = 60^\circ$; *в* — $\lambda = 0.4 \text{ мкм}$, $S_M = 5 \text{ км}$, $\theta_d = 60^\circ$. Обозн. на рис. 4, *a*, *б*: $D_h = 1 \text{ км}$ (1), 2 (2), 5 (3), 10 (4), 100 км (5). Обозн. на рис. 4, *в*: $D_h = 1 \text{ км}$ (1), 2 км (2), 100 км (3)

Исследование влияния неоднородности освещения Земли Солнцем на поверхностную дымку показало, что в условиях безоблачного неба оно имеет значение только для случаев, когда Солнце расположено близко к горизонту, приёмник значительно удалён от наблюдаемой на Земле точки (пикселя), а линия визирования близка к поверхности Земли.

3. Алгоритм статистического моделирования импульсных реакций и оценка границ изопланарных зон на их основе

Алгоритм моделирования импульсных реакций (иначе — функций размытия точки (ФРТ)) можно построить [14], используя алгоритм расчёта интенсивности отражённого от поверхности излучения для вышеупомянутого случая оптически однородной поверхности в сферической геометрии. Базируясь на результатах расчётов с помощью этого алгоритма, можно оценить размеры зон изопланарности изображений, в пределах которых достаточно использовать одну (но отличную от других) импульсную реакцию.

Чтобы проиллюстрировать целесообразность использования разработанного авторами критерия выделения изопланарных зон для построения изображений протяжённых объектов, рассмотрим следующий пример. Пусть $\lambda = 0.35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км (высота приёмника над земной поверхностью, ориентированного в надир), освещённость поверхности Земли $E_0 = 1$ Вт/(м²·мкм). Пусть распределение коэффициента отражения по поверхности имеет вид (рис. 5) (треугольный тестовый объект)

$$\rho(x_w, y_w) = \begin{cases} 1, & (y_w \leq |x_w|/2) \cap (x_w \geq 0) \cap (x_w \leq 200), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Требуется построить изображение объекта вдоль оси x_w (под изображением в данном случае будем понимать угловое распределение интенсивности излучения, падающего на центр входного зрачка оптической системы).

Искомое распределение интенсивности можно получить непосредственно (не привлекая теорию линейных систем), применяя модифицированную программу, основанную на алгоритме расчёта световой поверхностной дымки. Это было реализовано методом

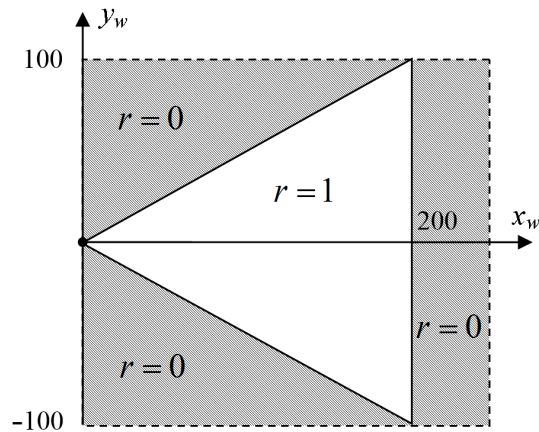


Рис. 5. Распределение коэффициента отражения по поверхности тест-объекта

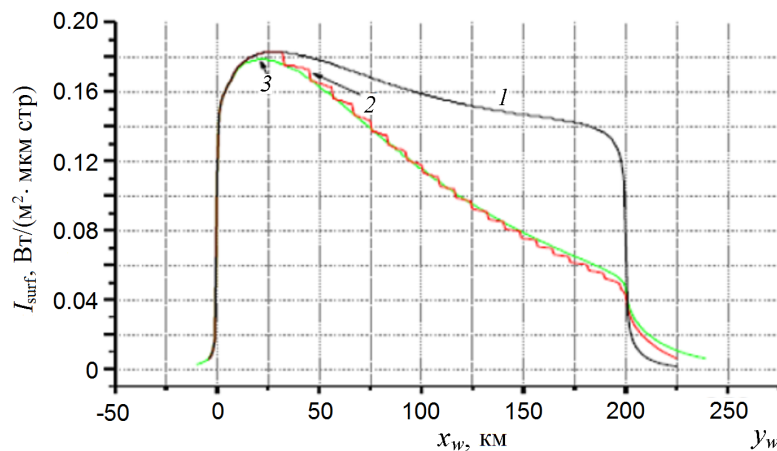


Рис. 6. Изображение тест-объекта вдоль оси x_w : 1 — восстановленное с помощью одной ФРТ ($\theta_d = 0^\circ$), 2 — восстановленное с помощью 21 ФРТ, 3 — рассчитанное с помощью программы прямого моделирования

Монте-Карло, и соответствующее угловое распределение интенсивности получено с шагом 1 км вдоль оси x_w .

Используя предложенный способ разбиения изображений на изопланарные зоны, были выделены области изопланарности. Методом Монте-Карло для каждой из зон рассчитаны ФРТ на внутренней границе зоны (в данном примере потребовалось рассчитать 21 импульсную реакцию),

На рис. 6 представлены результаты построения изображения тест-объекта вдоль оси x_w (см. рис. 5) с использованием функции размытия точки и программы прямого построения изображений объектов без применения теории линейных систем. Там же приведено изображение, которое получится, если использовать только одну осесимметричную ФРТ для случая зондирования в надира. Из рисунка следует, что выбранных по предложенному критерию 21 зон изопланарности достаточно для восстановления изображения тестового объекта с погрешностью в пределах 10% при $0 \leq x_w \leq 200$ км. Использование только одной осесимметричной ФРТ, что чаще всего и делается, приводит к существенно бóльшим (в пределах 140%) относительным погрешностям реконструкции изображений.

4. Статистическое моделирование активных ТВ-систем видения с селекцией фонов рассеяния. Теоретические предпосылки

Повышение безопасности движения современного автомобильного, авиационного, железнодорожного и водного транспорта в значительной степени определяется не только квалификацией и опытом управляющих ими специалистов, но и теми навигационными средствами, которые они могут использовать в своей работе. Наиболее распространённые из них можно разделить на активные (например, радары, работающие в радиодиапазоне) и пассивные (например, бинокли, приборы ночного видения, работающие в видимом и ИК диапазонах длин волн). Каждое из этих средств имеет свою область применения. Несмотря на расширение возможностей специалиста, управляющего тем или иным движущимся аппаратом, в плане ориентации в пространстве или принятия иных управляющих решений они не перекрывают всей области внешних условий, в которых осуществляется (или должна осуществляться) навигация, например, автомобильного или речного транспорта. К таким условиям можно отнести плотный туман, снегопад или дождь, особенно в тёмное время суток. В этих условиях имеющиеся штатные средства навигации, к примеру на речном транспорте (радар, прожектор, бинокли), не позволяют гарантировать безопасность движения судов. Радар не обеспечивает безопасность в силу того, что в зависимости от длины волны излучения на экране возможно появление помех отражения от метеосаждков в виде ряби; кроме того, он не позволяет обнаруживать на водной поверхности предметы или объекты, имеющие небольшие размеры (лодки, брёвна и т. п.). Применение оптических систем в сочетании с прожекторной подсветкой приводит к возникновению интенсивного отражённого от среды светового потока (называемого помехой обратного рассеяния), который, как световой экран, перекрывает всё находящееся за ним пространство от наблюдателя. Обычные системы ночного видения в сложных метеоусловиях имеют очень ограниченную по дальности область применения и реагируют только на излучающие (“теплые”) объекты.

Проблему ориентации в пространстве в таких внешних условиях может решить активно-импульсная стробируемая система навигации, сочетающая в себе свойства радара и оптических систем наблюдения. Академиком А.А. Лебедевым в 1936 г. [15] была сформулирована концепция создания таких оптико-электронных систем. Она состоит в том, что следует использовать импульсный источник света, а оптический приёмник необходимо “открывать” для формирования изображения только в момент времени, соответствующий той области пространства, которая необходима для контроля. Однако несмотря на очевидную простоту эта идея до последнего времени не была использована из-за сложностей в её технической реализации. Последнее связано прежде всего с необходимостью создания источников подсветки, характеризующихся требуемыми энергетическими и импульсными (частота повторения, длительность) свойствами и усилителями оптических сигналов. В настоящее время в ряде развитых стран ведутся интенсивные разработки, направленные на создание подобных средств навигации и наблюдения пространства в гражданских и специальных целях. Одна из проблем, долгое время препятствующая их развитию, заключается в трудности теоретического описания процесса формирования изображения в активных стробируемых системах видения.

В работе [16] нами впервые были выполнены теоретические исследования, в результате которых создана статистическая модель процесса формирования изображений в подобных системах, позволившая количественно оценить степень влияния различных факторов на характеристики изображений и сравнить их дальность действия с аналогичными параметрами систем, использующих постоянный источник подсветки и открытый приёмник.

Пусть требуется оценить качество изображения. Будем характеризовать его коэффициентами контраста. В рассматриваемом случае можно построить три таких коэффициента:

$$\begin{aligned} k_{TF} &= (I_{RT} - I_{RF}) / (I_{RT} + I_{RF}), \\ k_{TR} &= (I_{RT} - I_{RR}) / (I_{RT} + I_{RR}), \\ k_{RF} &= (I_{RR} - I_{RF}) / (I_{RR} + I_{RF}), \end{aligned}$$

где I_{RF} — яркость рассеянного фона, I_{RT} — яркость объекта (T), I_{RR} — яркость отражающей поверхности (R). Чтобы определить значения этих коэффициентов, необходимо знать следующие характеристики световых потоков, создаваемых источником или регистрируемых приёмником в строб-интервале:

1) освещённость, создаваемая на объекте импульсным источником подсветки $E_T = E_N + E_{DM} + E_{DR} + E_{NR}$, где E_N — нерассеянное излучение от источника, E_{DM} — подсветка диффузным фоном или рассеянным в среде излучением от источника, E_{NR} — подсветка объекта нерассеянным излучением, отражённым поверхностью R , E_{DR} — диффузная подсветка объекта отражённым поверхностью излучением, обусловленная рассеянием в среде;

2) интенсивность рассеянного в среде (но не испытывшего отражения от объекта) излучения в направлении на приёмник $I_{RD} = I_{DM} + I_{DR}$, где I_{DM} — интенсивность рассеянного в среде излучения, не отражённого от объекта, I_{DR} — интенсивность светового потока, рассеянного в среде после отражения от поверхности R , но не отражённого от объекта;

3) интенсивность светового потока, отражённого объектом $I_T = G(\omega)E_T$;

4) интенсивность рассеянного фона $I_{RF} = I_{RD} + I_{TRD} + I_{TDM}$, где I_{TDM} — интенсивность рассеянного в заданном направлении светового потока, отражённого объектом, но

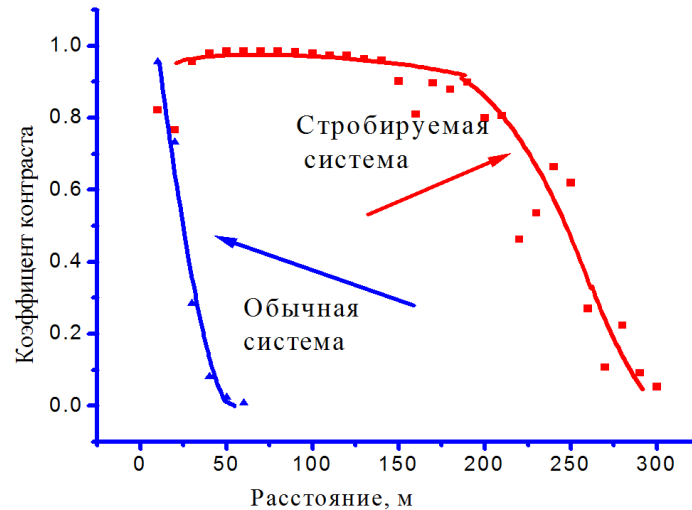


Рис. 7. Зависимость коэффициента контраста изображения объекта относительно рассеянного фона для обычной активной системы видения и системы со стробированием приёмника

не взаимодействующего с поверхностью R , I_{TRD} — интенсивность рассеянного в среде излучения, отражённого поверхностью R и распространяющегося от объекта;

5) интенсивность излучения в направлении объект—приёмник $I_{RT} = I_{TN} + I_{RF}$, где I_{TN} — интенсивность нерассеянного излучения, отражённого объектом;

6) интенсивность излучения, регистрируемого приёмником из области R : $I_{RR} = I_{IRN} + I_{TRN} + I_{RF}$, где I_{IRN} — нерассеянное излучение, отражённое поверхностью при её подсветке источником, I_{TRN} — нерассеянное излучение, отражённое поверхностью при подсветке объектом.

При этом необходимо включить в рассмотрение процессы многократного рассеяния и переотражения, если реализуются условия для их возникновения. Для статистической оценки искомых характеристик были построены программы моделирования методом Монте-Карло процесса распространения и регистрации оптического излучения в системе источник — среда — поверхность — объект наблюдения. Программы основаны на методе локальной оценки [1, 6].

Результаты исследований свелись к следующему. В принятой постановке задачи контраст изображения объекта относительно рассеянного фона и подстилающей поверхности, над которой проходит трасса наблюдения, до оптической толщины среды $\tau \approx 4$ превышает уровень 0.8, до $\tau \approx 5$ — более 0.4. Предельная оптическая толщина, при которой коэффициент контраста остается выше 0.05, находится в интервале $\tau \approx 5-6$. Контраст изображения подстилающей поверхности относительно рассеянного излучения в среде быстро уменьшается с удалением объекта от приёмника и равен примерно 0.05 в интервале $\tau \approx 1-2$.

Процесс многократного рассеяния в значительной степени определяет не только помеху обратного рассеяния, но и полезный сигнал, в том числе интенсивность нерассеянного излучения, отражённого объектом и регистрируемого приёмником.

Применение метода пространственной селекции в импульсных активных системах видения приводит к существенному повышению контраста изображения объекта, экранированного от наблюдателя слоем плотной рассеивающей среды, увеличивая дальность его видимости при одном и том же уровне контраста изображения объектов почти на порядок (рис. 7).

5. Исследование бистатических атмосферно-оптических каналов связи

Оптико-электронные системы связи (ОЭСС), содержащие атмосферный канал источник — приёмник, условно можно разделить на следующие [17]: а — системы связи в пределах прямой видимости (*line-of-sight*), б — системы связи, работающие на рассеянном и отражённом излучении, т. е. бистатические, или, как частный случай, загоризонтные (*over-the-horizon*). Говоря о бистатической связи, мы подчёркиваем, что она осуществляется вне прямой видимости источника излучения и при этом не обязательно приёмник размещается за горизонтом.

Современные, иногда называемые открытые, оптические системы связи (т. е. не использующие в качестве канала распространения оптическое волокно), построенные на лазерах, применяются для передачи информации именно в пределах прямой видимости передатчика приёмником. В замутнённом приземном слое атмосферы оптический сигнал может сильно затухать в силу влияния, например, дыма, пыли, тумана, снегопада и других атмосферных явлений. В слабо замутнённой атмосфере передача информации с помощью узкого лазерного пучка может быть затруднена турбулентностью. При прочих искажениях пучка даже на небольших трассах турбулентность приводит к “беганию” его по апертуре приёмника или даже выходу за пределы последней. Эти вопросы достаточно подробно рассмотрены в ряде работ и обобщены в монографии [18], где приведена обширная библиография, имеющая отношение к данной проблеме.

Теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении ведутся с целью развития двух типов ОЭСС — *line-of-sight* и *over-the-horizon* [19–29]. Так, в [19] методом статистического моделирования исследовано влияние отражающих свойств поверхности, над которой осуществляется связь, на импульсную переходную характеристику канала связи при условии существенной загруженности атмосферного канала аэрозолем. Для надёжного приёма сигнала в различных погодных условиях представлены, рассмотрены и применяется ряд перспективных предложений для систем связи, работающих по схеме *line-of-sight* (см., например, [29]).

Исследования в области загоризонтной связи выполнены в существенно меньшем объёме. В частности, в работе [30] дан анализ УФ-канала связи с рассеянием, в [31] рассмотрено влияние метеорологической дальности видимости и параметров приёмной системы на полосу пропускания внешнего канала связи, в [21] приведены результаты оценок дальности действия загоризонтных систем связи для набора длин волн излучения лазера и условий их функционирования (ночное, дневное время), в [22] дан анализ возможности осуществления связи по загоризонтной схеме в УФ-диапазоне длин волн. Там же приведены оценки предельной дальности осуществления связи, которая на длинах волн в области 0.290 мкм может достигать нескольких километров, и т. д.

Есть ли необходимость в продолжении соответствующих исследований и в создании бистатических ОЭСС, учитывая, что существуют и хорошо развиты системы связи в радиодиапазоне (в том числе спутниковые), которые в отличие от оптических обладают явным преимуществом — они всепогодны? Совершенно очевидно, что оптические системы связи не в состоянии их заменить, но они востребованы, если радиосвязь нежелательна, затруднена или невозможна. Различные аспекты исследования характеристик таких систем и возможности их создания рассмотрены в таких работах, как, например, [21, 22, 24, 30, 31]. Однако они не дают исчерпывающего ответа на вопросы, связанные с влиянием оптико-геометрических параметров и особенностей схем форми-

рования атмосферных каналов связи на характеристики, определяющие эффективность и дальность действия бистатических ОЭСС.

Основа бистатических оптических систем связи — это процесс взаимодействия (как правило, лазерного) излучения с атмосферной средой, которое сопровождается его рассеянием (первичным или вторичным) в направлении на оптический приёмник. Под первичным мы понимаем однократное, под вторичным — многократное рассеяние. Связь между интенсивностью (или мощностью) оптического излучения и оптическими характеристиками среды, как известно, устанавливается интегро-дифференциальным уравнением переноса излучения [1]. Данное уравнение линейно относительно интенсивности излучения (при условии, что на входе в атмосферу она не превышает критического уровня, приводящего к нелинейным эффектам). Это позволяет рассматривать атмосферный канал как некоторую линейную систему без обратной связи, описать которую можно полностью, определив её реакцию на один специальный сигнал, например, на $\delta(t)$ -импульс. Таким образом, с теоретической точки зрения влияние атмосферного канала на любые входные сигналы известно, если решено уравнение переноса излучения при $\delta(t)$ начальных и граничных условиях, соответствующих конкретной схеме оптической связи для заданных оптических характеристиках рассеивающей и поглощающей среды.

Рассмотрим схему бистатической оптической связи (рис. 8) при следующих условиях. Пусть определены оптические свойства модельной неоднородной плоскостратифицированной рассеивающей и поглощающей атмосферы, иными словами — заданы индикатрисы аэрозольного и молекулярного рассеяния g_a, g_m , коэффициенты аэрозольного, молекулярного рассеяния и ослабления $\sigma_{s,a}, \sigma_{s,m}, \sigma_{t,a}, \sigma_{t,m}$. Пусть из точки $(0, 0, 0)$ в декартовой системе координат излучается лазерный $\delta(t)$ -импульс с угловой расходимостью ν_0 . Оптическая ось пучка лежит в плоскости yOz и задаётся углом θ_0 . На некотором расстоянии y_N (называемом базой) от источника располагается приёмная оптическая система, оптическая ось которой также находится в плоскости yOz , ориентированная в направлении θ_d и детектирующая излучение в пределах угла ν_d . Требуется определить характеристику $h(t)$, оценить факторы, влияющие на искажение исходного сигнала, и выяснить условия, при которых возможна оптическая связь.

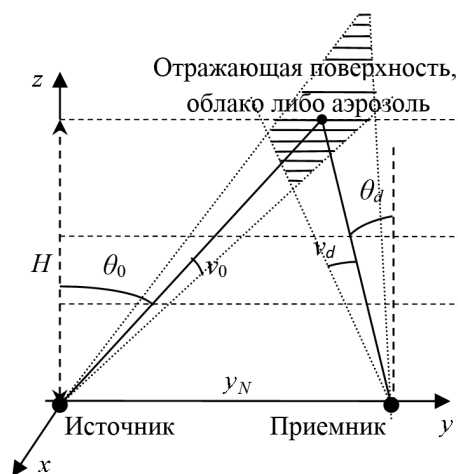


Рис. 8. Геометрическая схема бистатической системы оптической связи (область пересечения конуса поля зрения приёмника и нерассеянного лазерного пучка заштрихована)

Особенность бистатических схем связи состоит в том, что, с одной стороны, геометрический объём пересечения расходящегося лазерного пучка с конусом поля зрения приёмной системы (заштрихованная область на рис. 8) может быть достаточно мал и велика вероятность того, что рассеянное излучение, исходящее из него в направлении на приёмник, будет однократно рассеянным (здесь мы не учитываем предысторию рассеянного излучения, вошедшего в этот объём). Вместе с тем очевидно, что как передний, так и задний фронт функции $h(t)$ формируется рассеянным излучением более высоких, чем первая, кратностей. Это, с нашей точки зрения, предопределяет выбор метода решения УПИ в пользу метода Монте-Карло, учитывая, что последний свободен от ограничений на кратность рассеяния, форму индикатрис рассеяния, многокомпонентность состава атмосферы и неоднородность её оптических свойств. Заметим, что малоугловое приближение, часто используемое, например, в теории решения прямых и обратных задач оптического зондирования атмосферы, также не может быть использовано, принимая во внимание то, что база y_N (см. рис. 8) в бистатических системах связи (в отличие от бистатических схем зондирования) достаточно велика.

Алгоритмы локальных оценок для решения задач атмосферной оптики, предложенные в [1], могут быть использованы и для решения рассмотренной выше задачи. Эти алгоритмы были применены для оценки возможностей использования метода Монте-Карло для проведения подобных исследований. Некоторые результаты таких исследований опубликованы в работе [32]. Первые тестовые результаты приведены в [33].

На рис. 9 представлен один из примеров статистического моделирования импульсных переходных характеристик атмосферного канала ОЭСС, содержащего отражающую поверхность и слой облачности. Результаты, приведённые на рис. 9, *а*, получены при следующих условиях: $\lambda = 510$ нм, $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_d = 45^\circ$, $\nu_0 = 0.0034^\circ$, $y_N = 2$ км, $H = 1$ км, $r_{\text{surf}} = 1$, метеорологическая дальность видимости $S_M = 2$ км, континентальный аэрозоль, безоблачно, лето средних широт, на рис. 9, *б* — соответственно $\lambda = 510$ нм, $S_M = 50$ км, сплошная облачность CO1 (расположение облака от 0.33 до 3.5 км), оптическая толщина облака $\tau = 4$, $\theta_0 = 56.780$, $\theta_d = 56.780$, $\nu_0 = 0.0034^\circ$, $y_N = 1$ км, $H = 0.33$ км, континентальный аэрозоль, лето средних широт. Из рисунка видно, что при высокой мутности среды форма приходящего сигнала сохраняется.

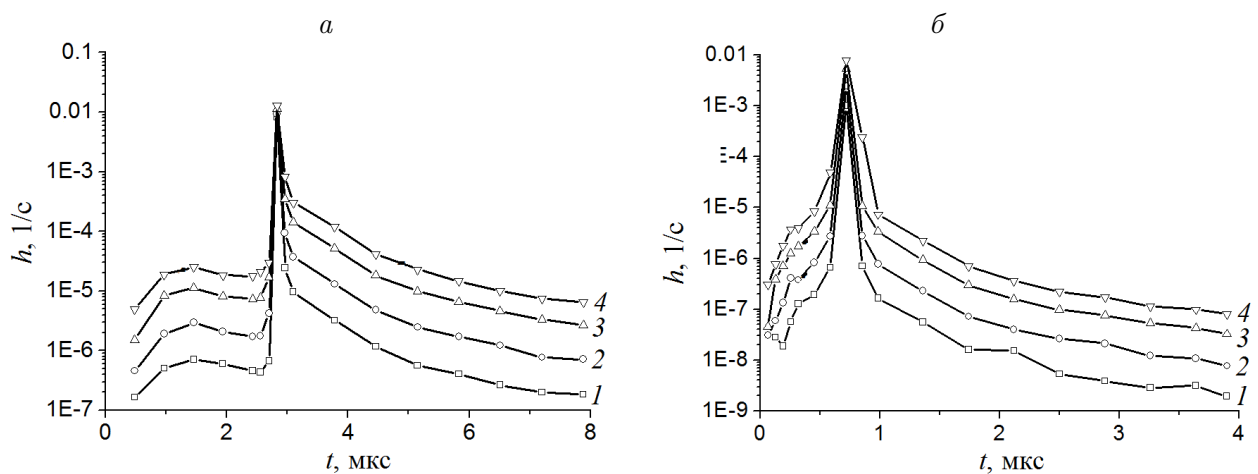


Рис. 9. Результаты расчётов характеристик $h(t)$: *а* — безоблачная, *б* — облачная атмосфера; $\nu_d = 0.5^\circ$ (1), 1° (2), 2° (3), 3° (4)

Оптические параметры задавались генератором оптических моделей LOWTRAN-7 [34]. По горизонтальной оси отложено время, которое проходят фотоны за вычетом минимального времени, необходимого излучению для преодоления базового расстояния y_N .

Как и следовало ожидать, характеристика $h(t)$ начиная с момента времени, соответствующего расстоянию от источника до приёмника через отражающую поверхность или облачный слой, является монотонно убывающей функцией. Один из неожиданных результатов моделирования состоит в том, что при малых углах поля зрения приёмника и малых метеорологических дальностях видимости атмосферы наблюдается выраженный максимум рассеянного излучения на переднем фронте $h(t)$ (см. первый максимум слева на кривых на рис 9, а). При прозрачной атмосфере этот максимум не выражен.

Отметим, что вклад однократно рассеянного излучения при уменьшении S_M убывает и это приводит к тому, что изменение функции $h(t)$ происходит медленнее, чем в случае более прозрачной атмосферы.

6. Статистическое моделирование распространения акустического излучения в движущейся турбулентной атмосфере с учётом рефракции

Трудности аналитического подхода к решению задачи о распространении звука в пограничном слое атмосферы обуславливают необходимость привлечения численных методов. В работах [35–41] методом статистических испытаний (Монте-Карло) была решена задача о распространении акустического излучения в плоскостратифицированной неподвижной турбулентной атмосфере и получены количественные оценки вклада многократно рассеянного излучения в интенсивность прошедшего излучения.

Следующий этап развития модификации алгоритма был связан со статистическим моделированием процесса переноса акустического излучения в движущейся атмосфере с учётом рефракции. Рефракция звука происходит на градиентах атмосферной температуры и скорости ветра и приводит к ветровому сносу звуковой волны и появлению дополнительного ослабления звука за счёт искривления траектории распространения акустического излучения [42, 43]. Для реализации этого алгоритма потребовалось уточнить акустическую модель движущейся атмосферы, учесть высотный профиль скорости ветра, определить высотные профили коэффициентов классического и молекулярного поглощения и т. д.

Пример расчётов интенсивности прошедшего и многократно рассеянного акустического излучения на тестовой трассе иллюстрирует рис. 10 из работы [44]. Значения интенсивности, приведённые на этом рисунке, даны в зависимости от расстояния от оси излучаемого звукового потока вдоль верхней границы 500-метрового плоскостратифицированного приземного слоя атмосферы в наветренном ($H > 0$) и подветренном ($H < 0$) направлении. Расчёты выполнены для источника акустической мощностью 1 Вт с круговой апертурой диаметром 1 м и гауссовым распределением излучения для звуковых частот $F = 1000$ Гц, угла расходимости источника $\phi = 2.5^\circ$. На рисунке указаны значения скорости ветра на высоте $z = 10$ м, для которых осуществлялись численные эксперименты. Здесь же приведены соответствующие распределения интенсивности излучения без учёта рефракции.

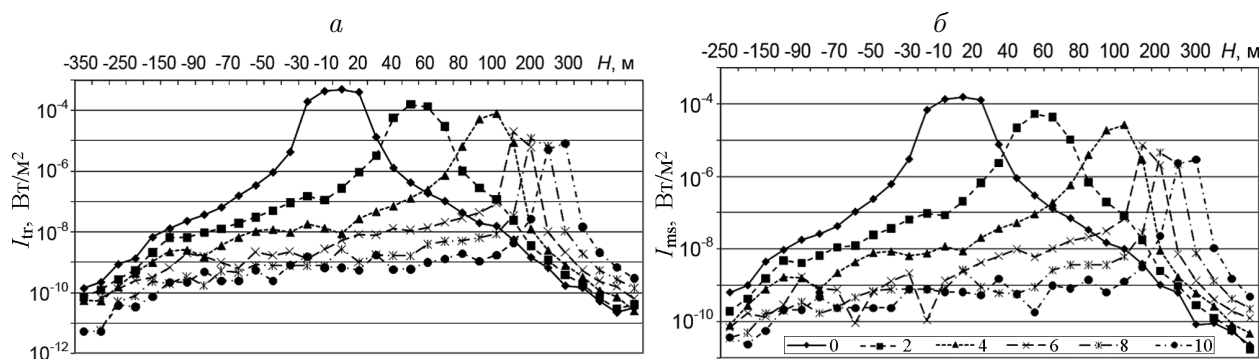


Рис. 10. Распределение интенсивности прошедшего (а) и многократно рассеянного (б) акустического излучения по зонам детектора с учётом рефракции в зависимости от расстояния H для $F = 1000$ Гц, угла расходимости источника $\phi = 2.5^\circ$ и скорости ветра на высоте $z = 10$ м, составляющей 0, 2, 4, 6, 8 и 10 м/с

Численные эксперименты показали, что для рассмотренной геометрии распространения акустического излучения рефракция приводит к перемещению максимума прошедшего излучения вдоль направления ветра, величина которого пропорциональна градиенту скорости ветра, при этом ширина максимума уменьшается с увеличением скорости ветра, а его дополнительное ослабление может достигать 2.7–3 раза. Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях невозможно выделить влияние рефракции, поскольку все рассмотренные выше процессы на распространение звука влияют одновременно, а также нельзя оценить вклад многократного рассеяния в измеряемые величины (из рис. 10 видно, что этот вклад в регистрируемом излучении может быть существенным). Метод Монте-Карло позволяет решать подобные проблемы для реалистичных моделей атмосферы и конкретных геометрий экспериментов.

7. Параллельные вычисления методом Монте-Карло

Одним из недостатков метода Монте-Карло является его высокая трудоёмкость: при решении задач для достижения цели при заданной точности решений требуются достаточно большие затраты времени ЭВМ. Напомним, что этот метод является единственным, который позволяет получать решения с контролируемой точностью. В связи с развитием вычислительной техники указанный недостаток становится все более несущественным при решении типичных задач оптики и акустики атмосферы. В то же время повышение производительности вычислительной техники позволяет осуществлять новые, более сложные фундаментальные и прикладные исследования. Однако обычный (последовательный) расчёт, например, импульсной переходной характеристики бистатических атмосферно-оптических каналов (см. раздел 5, рис. 9) требует более 20 ч временных затрат на персональном компьютере со средней производительностью 19.5 ГФлопс.

Повысить вычислительную способность метода можно двумя способами. Первый — создавать новые, более эффективные алгоритмы метода (эта проблема в настоящей работе решается, и, в частности, для приведённого выше примера временные затраты удалось снизить до нескольких минут или десятков минут). Второй способ — перейти на параллельную технологию расчётов. Попытки осуществить этот способ предприни-

Сравнение времён работы последовательного $T_{\text{посл}}$ и параллельного $T_{\text{пар}}$ алгоритмов

| Величина | $T_{\text{посл}}$, с | $T_{\text{пар}}$, с | Ускорение |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| I_{sun} | 2410.2 | 82.6 | 29.2 |
| I_{surf} | 4436.2 | 147.8 | 29.9 |
| r_{surf} | 6855.6 | 236.1 | 29 |

мались ещё в конце прошлого века. Так, на отечественной ЭВМ ПС-2000 при параллельной загрузке 32 процессоров методом Монте-Карло была рассчитана интегральная дополнительная освещённость земной поверхности отражённым от неё излучением [6, с. 216]. Оказалось, что преимущество параллельного счёта перед последовательным составило менее 10 раз. Распараллеливание было осуществлено по “пачкам” траекторий (т. е. каждый процессор моделировал движение в среде “пачки” фотонов).

В 2012–2013 гг. эта же идея распараллеливания реализована при решении задачи атмосферной коррекции спутниковых изображений. На кластере ТГУ СКИФ SIBERIA [45] выполнены расчёты без использования технологий параллельных вычислений и алгоритмом с распараллеливанием по пачкам траекторий с применением технологий MPI на 30 процессорах. Результаты сравнения времени атмосферной коррекции изображений приведены в таблице, из которой видно, что ускорение работы при использовании 30 процессоров составляет 29 раз.

Заключение

Метод статистических испытаний является эффективным средством выполнения фундаментальных и прикладных исследований по широкому кругу проблем атмосферной оптики и акустики. За пределами настоящей работы остались и другие направления исследований, в которых применяется метод Монте-Карло в данной области наук. Среди них — изучение влияния атмосферы (включая облачность) на радиационный режим в атмосфере, лазерное зондирование земной поверхности и атмосферы из космоса, учёт поляризации оптического излучения при его распространении в дисперсных средах, лазерное зондирование растительности (работы по данной тематике активно ведутся в ИОА СО РАН), распространение оптического излучения в турбулентной атмосфере (эти работы ведутся, например, в МГУ и в ИВМиМГ СО РАН) и т. д.

Появление мощных параллельных вычислительных средств существенно расширяет горизонты применения метода статистического моделирования. Наконец, численные эксперименты существенно дешевле, проще и эффективнее лабораторных или полевых, если, конечно, используемые в них модели адекватно отражают действительность. Поэтому, чтобы подтвердить достоверность результатов имитационного моделирования, необходимо в некоторых реперных точках осуществлять сравнение результатов численных расчётов с данными реальных экспериментов.

Список литературы

- [1] МЕТОД Монте-Карло в атмосферной оптике / Г.И. Марчук, Г.А. Михайлов, М.А. Назаралиев, Р.А. Дарбинян, Б.А. Каргин, Б.С. Елепов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 284 с.

- [2] ИМИТАЦИОННОЕ моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования / Г.М. Креков, В.М. Орлов, В.В. Белов, М.Л. Белов, А.В. Белохвостиков, И.В. Мишин, Р.Г. Сафин. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 168 с.
- [3] ЗУЕВ В.Е., КРЕКОВ Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
- [4] ЗУЕВ В.Е., ТИТОВ Г.А. Оптика атмосферы и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1996. 272 с.
- [5] ЗЕГЕ Э.П., ИВАНОВ А.П., КАЦЕВ И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
- [6] ЗУЕВ В.Е., БЕЛОВ В.В., ВЕРЕТЕННИКОВ В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Спектр. ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
- [7] ARUGA T., HEATH D.F. Backscattered UV radiation: Effects of multiple scattering and the lower boundary of the atmosphere // *Appl. Optics*. 1982. Vol. 21, No. 16. P. 3038–3045.
- [8] LENOBLE J. Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky // *Ibid.* 1998. Vol. 37, No. 12. P. 2441–2447.
- [9] LENOBLE J. Influence of the environment reflectance on the ultraviolet zenith radiance for cloudless sky // *Ibid.* 2000. Vol. 39, No. 24. P. 4247–4254.
- [10] LAVIGNE C., ROBLIN A., CHERVET P., CHAZETTE P. Experimental and theoretical studies of the aureole about a point source that is due to atmospheric scattering in the middle ultraviolet // *Ibid.* 2005. Vol. 44, No. 7. P. 1250–1262.
- [11] ГЕРЦБЕРГ Г. Спектры и строение двухатомных молекул: Пер. с англ. М.: ИЛ, 1949. 413 с.
- [12] БЕЛОВ В.В., БОРИСОВ Б.Д., ТАРАСЕНКОВ М.В., ШЛИШЕВСКИЙ В.Б. Исследование зависимости контраста объект/фон от условий наблюдения в УФ-диапазоне длин волн // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24, № 3. С. 171–176.
- [13] БЕЛОВ В.В., ТАРАСЕНКОВ М.В. Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отражённых сферической земной поверхностью // *Там же*. 2010. Т. 23, № 1. С. 14–20.
- [14] БЕЛОВ В.В., ТАРАСЕНКОВ М.В. Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений // *Там же*. 2010. Т. 23, № 5. С. 371–377.
- [15] АКАДЕМИК Александр Алексеевич Лебедев (к 70-летию со дня рождения) // *Оптико-механическая промышленность*. 1963. № 10. С. 5–6.
- [16] BELOV V.V. Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // *Appl. Phys.* 2002. Vol. 75, No. 4-5. P. 571–576.
- [17] УКРАИНЦЕВ Ю.Д., ЦВЕТОВ М.А. История связи и перспективы развития телекоммуникаций. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 128 с.
- [18] МИЛЮТИН Е.Р., ГУМБИНАС А.Ю. Статистическая теория атмосферного канала оптических информационных систем. М.: Радио и связь, 2002. 256 с.
- [19] БЕЛОВ В.В., БОРИСОВ Б.Д., СЕРЕБРЕННИКОВ А.Б. Передаточные свойства оптических каналов связи над отражающей поверхностью // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12, № 8. С. 669–673.
- [20] КЕННЕДИ Р.С. Введение в теорию передачи сообщений по оптическим каналам с рассеянием // *Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике*. 1970. Т. 58, № 10. С. 264–278.
- [21] ПОЖИДАЕВ В.Н. Выбор длины волны для систем загоризонтной связи в оптическом диапазоне // *Радиотехника и электроника*. 1977. Т. 22, № 11. С. 2265–2271.

- [22] Пожидаев В.Н. Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // Там же. 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.
- [23] MOORADIAN G.C., GELLER M., STOTTS L.B. ET AL. Blue-green pulsed propagation through fog // Appl. Optics. 1979. Vol. 18, No. 4. P. 429–441.
- [24] MOORADIAN G.C., GELLER M., LEVINE P.H. ET AL. Over-the-horizon optical propagation in a maritime environment // Ibid. 1980. Vol. 19, No. 1. P. 11–30.
- [25] MOORADIAN G.C., GELLER M. Temporal and angular spreading of blue-green pulses in clouds // Ibid. 1982. Vol. 21, No. 9. P. 1572–1577.
- [26] WU B., HAJJARIAN Z., KAVENRAD M. Free space optical communications through clouds: Analysis of signal characteristics // Ibid. 2008. Vol. 47, No. 17. P. 3168–3176.
- [27] Кузяков Б.А. Анализ эффективности открытых систем связи ближнего и среднего ИК-диапазонов в гражданской авиации // Материалы VII Междунар. научно-техн. конф. INTERMATIC. М.: Энергоатомиздат, 2009. Ч. 4. С. 211–214.
- [28] HAJJARIAN Z., FADULLAN J. MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere // J. of Communicat. 2009. Vol. 4, No. 8. P. 524–532.
- [29] Мирошниченко И., Сизов В. Атмосферные оптические средства для передачи и приема информации // Фотоника. 2009. Т 16, № 4. С. 22–24.
- [30] Поллер Б.В., Щетинин Ю.И. Телекоммуникационные технологии на основе ультрафиолетового канала связи с рассеянием // Докл. 9-й Междунар. научно-техн. конф. “Проблемы функционирования информационных сетей”. Новосибирск, 2006. С. 229–233.
- [31] Милютин Е.Р. Влияние среды распространения на полосу частот в загоризонтной оптической системе передачи информации // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 6. С. 673–675.
- [32] Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н. и др. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267.
- [33] Тарасенков М.В., Белов В.В., Абрамочкин В.Н. Моделирование импульсных передаточных характеристик оптических каналов связи с рассеянием и отражением // Материалы II Всеросс. научно-техн. конф. “Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана”. Новосибирск: Инфосфера, 2012. С. 174–177.
- [34] USER Guide to LOWTRAN-7 / F.X. Kneizys, E.P. Shettle, G.P. Anderson, L.W. Abreu, J.H. Chetwynd, J.E.A. Selby, S.A. Clough, W.O. Gallery. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hansom AFB. MA 01731. 1988. 137 p.
- [35] Байкалова Р.А., Креков Г.М., Шаманаева Л.Г. Статистические оценки вклада многократного рассеяния при распространении звука в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1, № 5. С. 25–30.
- [36] Шаманаева Л.Г., Буркатовская Ю.Б. Статистические оценки вклада многократного рассеяния в интенсивность акустического излучения, прошедшего нижний 500-м слой атмосферы // Изв. вузов. Физика. 2004. № 12. С. 71–76.
- [37] SHAMANAIEVA L.G., BURKATOVSKAYA YU.B. Study of multiple scattering effects on the acoustic wave propagation through a turbulent atmosphere // Proc. 12th Intern. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans / Eds. P. Anderson, S. Bradley, S. von Hunerbein. Cambridge, UK, 2004. P. 145–148.

- [38] SHAMANAIEVA L.G., BURKATOVSKAYA YU.B. Statistical estimates of the multiple scattering contribution to the transmitted acoustic radiation intensity // Intern. Symp. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. Extended Abstracts / Ed. S. Emeis. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006. P. 14–16.
- [39] БЕЛОВ В.В., БУРКАТОВСКАЯ Ю.Б., КРАСНЕНКО Н.П., ШАМАНАЕВА Л.Г. Статистические оценки влияния угла расходимости источника на характеристики прошедшего акустического излучения // Изв. вузов. Физика. 2009. № 12. С. 14–19.
- [40] BELOV V.V., BURKATOVSKAYA YU.B., KRASNENKO N.P., SHAMANAIEVA L.G. Statistical estimates of influence of the angular beam divergence on the characteristics of acoustic radiation transmitted through the atmosphere // 15th Intern. Symp. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. Paris, France, 2010. P. P-RET/01-1-P-RET/01-4. <http://www.isars2010.uvsq.fr>
- [41] БЕЛОВ В.В., БУРКАТОВСКАЯ Ю.Б., КРАСНЕНКО Н.П., ШАМАНАЕВА Л.Г. Применение метода Монте-Карло в атмосферной акустике // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1072–1077.
- [42] ATTENBOROUGH K., LI K. M., HOROSHENKOV K. Predicting Outdoor Sound. London, New York: Taylor & Francis, 2007. 441 p.
- [43] SALOMONS E.M. Computational Atmospheric Acoustics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ. 2001. 335 p.
- [44] БЕЛОВ В.В., БУРКАТОВСКАЯ Ю.Б., КРАСНЕНКО Н.П. и др. Статистические оценки вклада многократного рассеяния при распространении акустического излучения в плоско-стратифицированной движущейся турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Физика. 2011. № 11. С. 100–107.
- [45] МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ супервычислительный центр ТГУ [Электронный ресурс]. Томский гос. ун-т, 2007. URL: <http://skif.tsu.ru/>

Поступила в редакцию 28 июня 2013 г.