

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 621.391.63; 535.361

**Три алгоритма статистического моделирования
в задачах оптической связи на рассеянном излучении
и бистатистического зондирования**

В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 15.01.2016 г.

Рассматриваются три алгоритма метода Монте-Карло для расчета импульсной реакции в каналах лазерного зондирования и связи: алгоритм локальной оценки, двойной локальной оценки и предлагаемый модифицированный алгоритм двойной локальной оценки. Показаны результаты тестирования алгоритмов и их сравнения. Для случая однородной среды проведено сравнение трудоемкостей алгоритмов, показывающее, для каких условий предлагаемый алгоритм имеет преимущество по сравнению с алгоритмом двойной локальной оценки. Выполнена оценка вклада двукратного рассеяния и рассеяния третьей и выше кратности. Высокий вклад многократного рассеяния обосновывает целесообразность применения метода Монте-Карло для решения подобных задач.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, многократное рассеяние, оптическая связь, бистатистическое зондирование, импульсная реакция; method of Monte Carlo, repeated dispersion, optical communication, bistatic sensing, pulse reaction.

Введение

В задачах лазерного зондирования и связи при невысоких мощностях источника лазерного излучения (когда нелинейные эффекты пренебрежимо малы) атмосферный канал, как правило, рассматривают как линейную систему. В этом случае передаточные свойства канала определены, если известна реакция $h(t)$ системы на δ -импульс, называемая далее импульсной реакцией (ИР).

При лазерном зондировании оптически плотных сред (или оптико-электронной связи в этих же условиях) доля многократного рассеяния в принимаемом сигнале может быть велика. Особенность бистатистических схем лидарного зондирования состоит в том, что существуют два интервала значений времени $[0, t_1]$ и $[t_2, \infty)$, $t_1 < t_2$, при которых реакция $h(t)$ формируется только за счет многократного рассеяния, т.е. кратностью рассеяния выше первой. Характеристику $h(t)$ можно найти, решив нестационарное уравнение переноса излучения (УПИ).

В задачах бистатистического зондирования (например, [1–10]) учет многократного рассеяния необходим для корректного решения обратных задач для интервала времени $[t_1, t_2]$.

В теории оптико-электронной связи на рассеянном излучении [11–18] учет многократного рассеяния необходим для корректной оценки качества связи, поскольку важно знать не только интегральные характеристики ИР (например, энергию, регистрируемую приемником), но и форму ИР на всем значимом интервале времен, так как вероятность ошибок связи зависит в том числе и от этих двух характеристик. Знание только одной из них необходимо, но недостаточно, поэтому приближение однократного рассеяния при решении УПИ не может быть использовано, так как оно не позволяет описать функцию $h(t)$ при $t \leq t_1$ и $t \geq t_2$. Двукратное рассеяние позволяет это сделать, но точность такого решения, как правило, неизвестна.

Все эти моменты предопределяют, с нашей точки зрения, выбор метода решения УПИ в пользу метода Монте-Карло, с учетом того, что он свободен от ограничений на кратность рассеяния, форму индикатрис рассеяния, многокомпонентность состава среды, неоднородность ее оптических свойств.

Для статистического моделирования функции $h(t)$ в большинстве работ применяются алгоритмы локальной оценки либо прямого моделирования. Исключение составляют такие публикации, как [6–8], где применяются модификации алгоритма двойной локальной оценки, и [19, 20], где используется комбинированная оценка. В настоящей статье

* Владимир Васильевич Белов (Belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru).

предпринята попытка создания еще одной модификации метода двойной локальной оценки, предложенного в [21]. На серии тестовых примеров показана область оптико-геометрических условий, при которых предлагаемый алгоритм модифицированной двойной локальной оценки имеет преимущества по сравнению с алгоритмами локальной и двойной локальной оценки.

Постановка задачи

Задача моделирования реакции атмосферного канала на δ -импульс решается в следующей постановке (рис. 1).

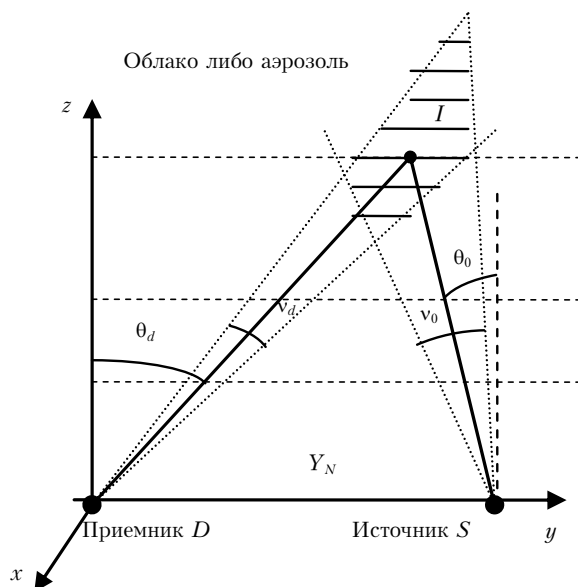


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи

Пусть определены оптические свойства модельной рассеивающей и поглощающей среды. Заданы индикатрисы рассеяния g , коэффициенты рассеяния и ослабления σ_s, σ_t . Учет поляризационных эффектов для упрощения анализа результатов пренебрегаем, по этой же причине не рассматриваем неколлинеарные каналы приемник–источник излучения. Пусть в точке $(0, 0, 0)$ в декартовой системе координат располагается приемная оптическая система, ось которой ориентирована в направлении зенитного угла θ_d в плоскости YOZ , и регистрирует излучение в пределах угла поля зрения ν_d , а на расстоянии Y_N от источника в точке $(0, Y_N, 0)$ расположен лазерный источник, излучающий $\delta(t)$ -импульс с угловой расходимостью ν_0 , оптическая ось пучка лежит в плоскости YOZ , и ее положение задается углом θ_0 . Пусть начало отсчета по времени определено моментом $t_0 = Y_N/c$ (c – скорость света), а ИР должна быть определена на интервале $[0, t_{\max}]$, где $t_{\max} = l_{\max}/c$. Разделим время ближней временной зоны (передний фронт ИР) на N_1 , центральную зону на N_2 и дальнюю

(задний фронт ИР) на N_3 одинаковых интервалов (но разных по длительности в каждом из них).

Алгоритмы моделирования ИР методом Монте-Карло

Для статистического моделирования ИР нами реализованы три алгоритма: 1) алгоритм локальной оценки, основанный на [21, с. 38]; 2) алгоритм двойной локальной оценки (далее называемый нами «классическим»), основанный на [21, с. 39]; 3) новый разработанный нами алгоритм, в котором используется двойная локальная оценка, но она осуществляется в каждой точке столкновения и, что отличает ее от классической, в каждый возможный временной интервал.

Алгоритм локальной оценки

Этот алгоритм метода Монте-Карло строится на моделировании траекторий движения «фотонов» в среде [21, с. 10]. В каждой k -й точке столкновения M j -й фотонной траектории, если точка M лежит в пределах угла поля зрения ν_d , в соответствующий временной интервал i делается локальная оценка вида

$$I_{i,j,k} = \omega_k \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_M)g(\mathbf{r}_M, \cos\gamma_M)}{2\pi\sigma_t(\mathbf{r}_M)r_{MD}^2} \exp(-\tau_{MD}), \quad (1)$$

где $I_{i,j,k}$ – оценка интенсивности излучения, принимаемой из k -й точки столкновения M j -й траектории в i -й временной интервал; ω_k – «вес» фотона в k -й точке столкновения M ; \mathbf{r}_M – радиус-вектор точки M ; γ_M – угол рассеяния от направления траектории перед столкновением в точке M в направлении \mathbf{MD} ; g – значение индикатрисы рассеяния в заданной точке столкновения и для заданного угла рассеяния; r_{MD} – расстояние от точки столкновения M и до приемной системы D ; τ_{MD} – оптическая длина отрезка MD .

Локальная оценка (1) в знаменателе содержит член r_{MD}^2 . В случае совпадения точки столкновения M с точкой приема D оценка становится бесконечной, поэтому, как правило, в малой области вокруг точки «приема» локальная оценка не осуществляется.

Алгоритм двойной локальной оценки

Этот алгоритм включает в себя обычную процедуру моделирования траекторий движения фотонов в среде [21, с.10]. Для каждой k -й точки столкновения M j -й фотонной траектории [21, с. 39] строится случайная промежуточная точка столкновения N в поле зрения приемника. Так как этот угол конечен, то координаты точки N строятся в сферической системе координат, связанной с приемной системой, по формулам

$$\mu = 1 - \alpha_1(1 - \cos(\nu_d/2)), \quad (2)$$

$$\varphi = 2\pi\alpha_2, \quad (3)$$

$$\tau_{DN} = -\ln\alpha_3, \quad (4)$$

где μ – случайный косинус угла между осью приемной системы и направлением на точку N ; φ – случайный азимутальный угол направления, в котором расположена точка N ; τ_{DN} – случайная оптическая длина трассы от приемной системы до точки N в направлении (μ, φ) ; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – случайные величины, равномерно распределенные в промежутке $[0, 1]$.

Определяется случайный i -й временной интервал, для которого выполнено условие

$$t_{i-1} \leq \frac{l_0 + r_{MN} + r_{ND}}{c} \leq t_i. \quad (5)$$

Здесь l_0 – длина пути, пройденного траекторией от источника S до точки M ; r_{MN} – расстояние от точки M до N ; r_{ND} – расстояние от N до D ; t_{i-1}, t_i – границы i -го временного интервала.

В этот временной интервал осуществляется двойная локальная оценка интенсивности принимаемого излучения:

$$I_{i,j,k} = \omega_k \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_M)g(\mathbf{r}_M, \cos\gamma_{M1})}{2\pi\sigma_t(\mathbf{r}_M)} \times \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_N)g(\mathbf{r}_N, \cos\gamma_N)}{2\pi\sigma_t(\mathbf{r}_N)} \frac{2\pi\left(1 - \cos\frac{\gamma_d}{2}\right)}{r_{MN}^2} \exp(-\tau_{MN}), \quad (6)$$

где \mathbf{r}_N – радиус-вектор промежуточной точки N ; γ_{M1} – угол рассеяния в точке M от направления траектории фотонов до столкновения к направлению MN ; γ_N – угол рассеяния между направлением MN и ND ; τ_{MN} – оптическая толщина от M до N .

Выражение (6) в знаменателе содержит член r_{MN}^2 . Дисперсия этой оценки бесконечна. Чтобы сделать ее конечной, необходимо, следуя [21], не выполнять двойную локальную оценку, если промежуточная точка находится внутри шара с центром в точке M и радиусом ϵ . Это создает некоторое смещение оценки, но делает дисперсию оценки (6) конечной. В работе [19] приводится оценка смещения погрешности вырезанием шара радиусом ϵ и рекомендации по его выбору. В [19] предлагается также несмещенная комбинированная оценка с конечной дисперсией. Однако рассмотрение этого алгоритма останется за рамками настоящей статьи.

Новый алгоритм

Идея предлагаемого алгоритма состоит в том, чтобы осуществлять двойную локальную оценку из каждой точки столкновения последовательно в каждый возможный для данной точки временной интервал. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2. Новые блоки по сравнению с классическими алгоритмами метода Монте-Карло отмечены пунктиром.



Рис. 2. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Алгоритм в указанных блоках состоит из следующих этапов.

Этап 1. Строится подвижная декартова система координат с центром в точке D и ортами, задаваемыми как

$$\mathbf{j}' = (a_j; b_j; c_j) = \left(\frac{x}{r_{MD}}; \frac{y}{r_{MD}}; \frac{z}{r_{MD}} \right), \quad (7)$$

$$\mathbf{k}' = (a_k; b_k; c_k) = \frac{(\tilde{a}_k; \tilde{b}_k; \tilde{c}_k)}{\sqrt{\tilde{a}_k^2 + \tilde{b}_k^2 + \tilde{c}_k^2}}, \quad (8)$$

$$(\tilde{a}_k; \tilde{b}_k; \tilde{c}_k) = (-\cos\alpha \cdot a_j; \sin\theta_d - \cos\alpha \cdot b_j; \cos\theta_d - \cos\alpha \cdot c_j), \quad (9)$$

$$\mathbf{i}' = (a_i; b_i; c_i) = (c_k b_j - b_k c_j; a_k c_j - c_k a_j; b_k a_j - a_k b_j), \quad (10)$$

где

$$r_{MD} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad (11)$$

$$\cos\alpha = \frac{y \sin\theta_d + z \cos\theta_d}{r_{MD}}; \quad (12)$$

(x, y, z) – координаты точки столкновения M ; α – угол между направлением DM и направлением визирования; $(\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}')$ – базисные векторы подвижной системы координат.

Этап 2. В пределах поля зрения приемной системы в подвижной системе координат выбирается случайное направление $(a; b; c)$ по формулам (2), (3).

Этап 3. В подвижной системе координат строятся подобласти в поле зрения приемной системы, соответствующие временным интервалам $[t_{i-1}, t_i]$ $i = 1 \dots N_{time}$. Границами этих подобластей являются конус поля зрения и эллипсоиды вращения. Уравнения эллипсоидов вращения в данной подвижной системе координат имеют вид

$$r_i = \frac{P_i}{1 - e_i \cos \theta}, \quad (13)$$

$$i = i_{\min} - 1, \dots, N_{time}, \quad (14)$$

$$P_i = \frac{\Delta l_i^2 - r_{MD}^2}{2\Delta l_i}, \quad (15)$$

$$e_i = \frac{r_{MD}}{\Delta l_i}, \quad (16)$$

$$\Delta l_i = \begin{cases} r_{MD}, & i = i_{\min} - 1, \\ t_i c - l_0, & i = i_{\min}, \dots, N_{time}, \end{cases} \quad (17)$$

где r_i — расстояние от начала координат до точек на поверхности i -го эллипсоида; θ — угол между вектором \mathbf{j} и направлением в точку на поверхности эллипсоида; P_i — фокальные параметры эллипсоидов; e_i — эксцентриситеты; i_{\min} — минимальный номер временного интервала, для которого для пройденного пути l_0 и точки M есть подобласть; N_{time} — количество рассматриваемых временных интервалов.

Этап 4. В каждой подобласти строится своя промежуточная точка столкновения N_i , определяемая как

$$r_i = \frac{P_{i-1}}{1 - e_{i-1} b} + \alpha_{3,i} \left(\frac{P_i}{1 - e_i b} - \frac{P_{i-1}}{1 - e_{i-1} b} \right). \quad (18)$$

Этап 5. Определяются координаты промежуточных точек N_i в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} x_i &= (a_i a + a_j b + a_k c) r_i, \\ y_i &= (b_i a + b_j b + b_k c) r_i, \\ z_i &= (c_i a + c_j b + c_k c) r_i. \end{aligned} \quad (19)$$

Этап 6. Делается двойная локальная оценка в каждый возможный временной интервал:

$$\begin{aligned} I_{i,j,k} &= \omega_k 2\pi \left(1 - \cos \frac{v_d}{2} \right) \left(\frac{P_i}{1 - e_i b} - \frac{P_{i-1}}{1 - e_{i-1} b} \right) \times \\ &\times \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_M) g(\mathbf{r}_M, \cos \gamma_{1,i})}{2\pi \sigma_t(\mathbf{r}_M) r_{MN_i}^2} \times \\ &\times \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_{N_i}) g(\mathbf{r}_{N_i}, \cos \gamma_{2,i})}{2\pi} \exp(-\tau_{MN_i}) \exp(-\tau_{N_i D}), \quad (20) \end{aligned}$$

где \mathbf{r}_{N_i} — радиус-вектор промежуточной точки N_i ; $\gamma_{1,i}$ — углы рассеяния от направления фотонной траектории до столкновения к направлениям \mathbf{MN}_i ; $\gamma_{2,i}$ — углы рассеяния от направлений \mathbf{MN}_i к направлениям $\mathbf{N}_i \mathbf{D}$; b — вторая координата случайно направленного (a, b, c) в подвижной системе координат.

Использование оценки (20) аналогично алгоритму двойной локальной оценки требует задания шара с центром в точке M радиусом ε , внутри которого оценка не выполняется, для того чтобы дисперсия оценки была конечной.

Тестирование алгоритма

Для тестирования программ на основе описанных выше алгоритмов выполнялись тестовые сравнения с расчетами из [19]. Рассматривалась модельная плоская трехмерная среда. При $z > 0$ рассматривается вакуум, при $z < 0$ — плотная рассеивающая непоглощающая среда с коэффициентом рассеяния $\sigma_s = 0,175 \text{ м}^{-1}$ и индикатрисой рассеяния Хеньи—Гринштейна с коэффициентом $g = 0,9$ (например, [22, с. 14]). Источник излучения располагается на высоте 5 м, направлен вертикально вниз, расходимость источника $v_0 = 0,00030$ рад и направляет излучение по времени согласно мощности $P(t) = qt^2 \exp(-qt)$, $q = 0,225 \text{ нс}$. В той же точке располагается приемник излучения, ориентированный в том же направлении с углом поля зрения $v_d = 0,00030$ рад. Скорость света в среде $c = 0,225 \text{ м/нс}$. Аналогично [19] расчет выполнялся для $3 \cdot 10^8$ траекторий, радиус вырезаемого шара $\varepsilon = 2,857 \text{ E-5 км}$. Результаты расчетов принимаемого излучения из [19] и наших расчетов тремя алгоритмами приведены в табл. 1 и на рис. 3. Сравнение показывает, что результаты [19] полностью согласуются с нашими результатами.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов и погрешностей для тестового примера из [19]

Алгоритм	Время, нс				
	400	410	420	430	440
Локальная оценка [19]	2,842 ± 0,025	1,809 ± 0,007	1,181 ± 0,027	0,747 ± 0,007	0,482 ± 0,002
Двойная локальная оценка [19]	3,053 ± 0,047	2,005 ± 0,025	1,334 ± 0,016	0,911 ± 0,027	0,621 ± 0,014
Комбинированная оценка [19]	3,074 ± 0,052	2,016 ± 0,025	1,361 ± 0,032	0,914 ± 0,027	0,619 ± 0,014
Локальная оценка (1)	2,822 ± 0,007	1,804 ± 0,005	1,191 ± 0,030	0,797 ± 0,041	0,501 ± 0,022
Двойная локальная оценка (6)	3,088 ± 0,044	1,995 ± 0,018	1,321 ± 0,014	0,905 ± 0,013	0,615 ± 0,008
Модифицированная двойная оценка (20)	3,068 ± 0,019	1,996 ± 0,014	1,349 ± 0,015	0,930 ± 0,026	0,615 ± 0,007

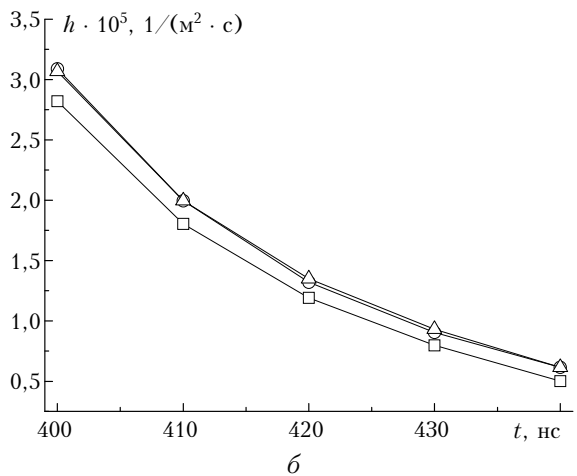
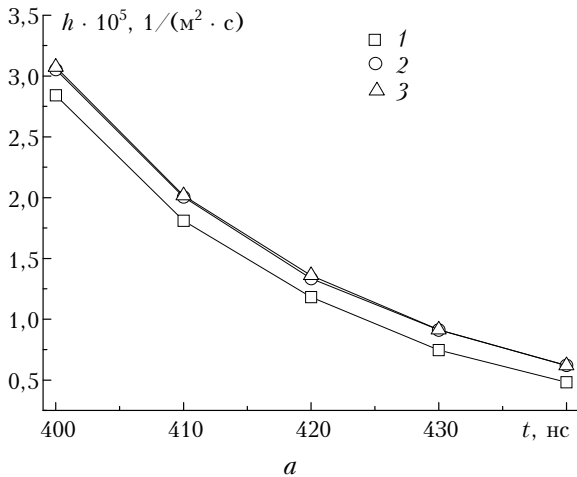


Рис. 3. Результаты расчетов для тестового примера из [19]: *a* – результаты из [19]; *б* – результаты, полученные нами. Кривая 1 – метод локальной оценки; 2 – двойной локальной оценки; 3 – на фрагменте (*a*) соответствует комбинированной оценке, (*б*) – предлагаемому алгоритму

Сравнение трудоемкостей алгоритмов

Для оценки условий, при которых предлагаемый алгоритм имеет преимущества, были выполнены расчеты многократно рассеянной компоненты ИР для однородной среды без поглощения с коэффициентом рассеяния $\sigma_s = 0,02; 0,5$ и 2 км^{-1} . Расчеты выполнялись для следующих условий: зенитный угол источника $\theta_0 = 45^\circ$, зенитный угол оптической оси приемной системы $\theta_d = 75,96^\circ$, базовое расстояние $Y_N = 3 \text{ км}$, угол расходимости источника $\nu_0 = 20^\circ$, угол расходимости приемной системы $\nu_d = 20^\circ$. При данных коэффициентах рассеяния оптическая длина пути источник – центральная зона – приемник ($S-I-D$) (см. рис. 1) $\tau_{SID} = 0,0664; 1,66$ и $6,64$. Радиус ϵ брался равным 10 см . Расчет выполнялся для двух индикатрис рассеяния – рэлеевской и Хеньи–Гринштейна с параметром $g = 0,9$. Для рэлеевской индикатрисы максимальная длина траекторий за вычетом базового расстояния l_{\max} бралась равной $4,5 \text{ км}$, время ближней зоны разбивалось на 3 одинаковых интервала, центральной и дальней – на 10 интервалов. Для индикатрисы Хеньи–Грин-

штейна l_{\max} бралось равным $1,5 \text{ км}$, ближняя зона разбивалась на 3 интервала, центральная на 10 интервалов, а дальняя на 3 интервала. Различия в l_{\max} и разбиении интервалов связаны с тем, что в силу высокой вытянутости вперед индикатрисы Хеньи–Гринштейна ИР убывает значительно быстрее, чем для рэлеевской индикатрисы. Число траекторий для каждого алгоритма выбиралось так, чтобы время расчета составляло 10 мин ($\pm 45 \text{ с}$) на ЭВМ с производительностью по тесту Lin-X 30 ГФлопс .

Результаты расчета многократно рассеянной части ИР тремя алгоритмами для случая $\sigma_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$ приведены на рис. 4, в табл. 2 приведено отношение трудоемкостей алгоритмов, определяемое как

$$R_{i,j} = \frac{t_i D_i}{t_j D_j}, \quad (21)$$

где t_i – время, затраченное на расчет i -м алгоритмом; D_i – средняя по временным интервалам относительная дисперсия расчета i -м алгоритмом; i, j – порядковые номера алгоритмов. В качестве первого алгоритма взят алгоритм локальной оценки, второго – алгоритм двойной локальной оценки и третьего – предлагаемый нами алгоритм.

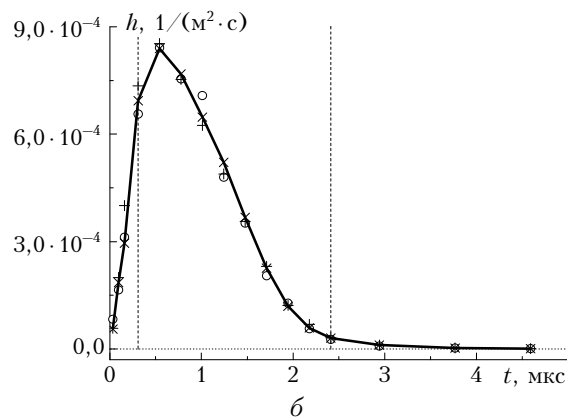
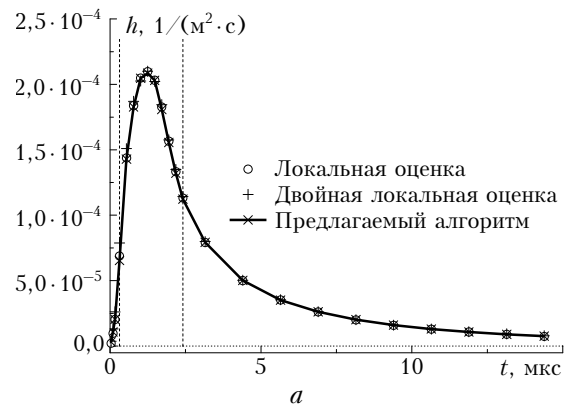


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов многократно рассеянной компоненты ИР, полученных тремя алгоритмами метода Монте-Карло при $\sigma_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$: *a* – расчет с индикатрисой Рэля; *б* – расчет с индикатрисой Хеньи–Гринштейна

Сравнение трудоемкостей показывает, что в рассмотренной ситуации для всех случаев, кроме случая индикатрисы Хеньи–Гринштейна с $\sigma_s = 2 \text{ км}^{-1}$,

предлагаемый алгоритм имеет меньшую трудоемкость по сравнению с алгоритмом двойной локальной оценки. Во всех рассмотренных ситуациях алгоритм локальной оценки имеет большую трудоемкость, чем оставшиеся алгоритмы. Из табл. 2 видно, что предлагаемый алгоритм лучше подходит для индикатрисы Рэля, чем для индикатрисы Хеньи–Гринштейна, а также для сред с меньшим рассеянием.

Таблица 2

Отношение трудоемкостей трех алгоритмов			
Индикатриса	$\sigma_s, \text{ км}^{-1}$	Отношение трудоемкостей	
		$R_{3,1}$	$R_{3,2}$
Рэля	0,02	1,04E-03	7,44E-03
	0,5	2,35E-02	1,01E-01
	2	1,66E-02	1,01E-01
Хеньи–Гринштейна	0,01	1,36E-03	1,47E-01
	0,5	9,65E-02	5,30E-01
	2	5,94E-01	1,26E+00

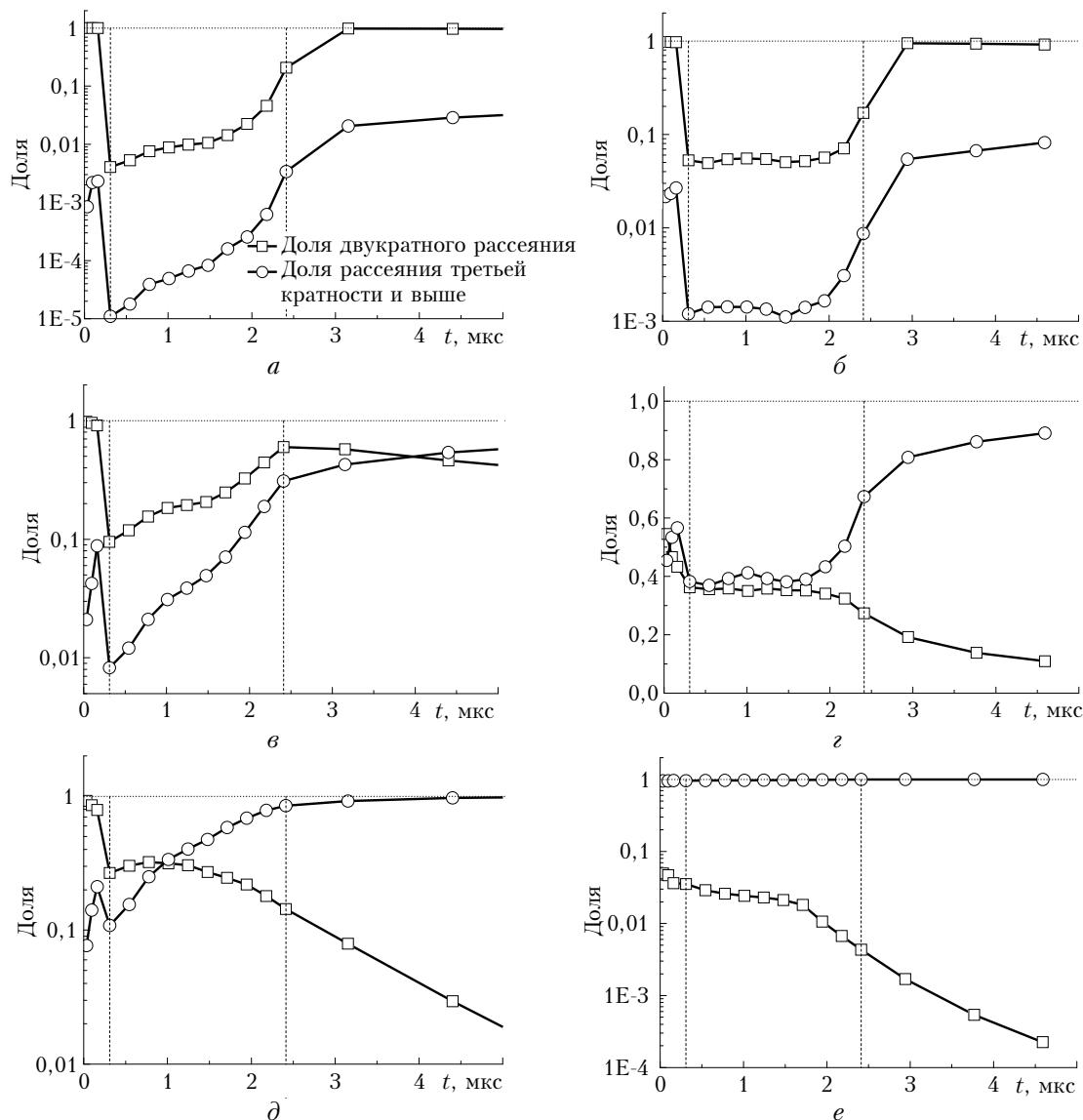


Рис. 5. Зависимость вклада рассеяния второй, третьей и выше кратности в значения ИР. Индикатриса Рэля: а – $\sigma_s = 0,02$; в – $0,5$; д – 2 км^{-1} ; индикатриса Хеньи–Гринштейна: б – $\sigma_s = 0,02$; з – $0,5$; е – 2 км^{-1}

Анализ затрачиваемого предлагаемым алгоритмом времени показывает, что при $\sigma_s = 2 \text{ км}^{-1}$ для индикатрисы Рэля порядка 10% времени уходит на моделирование движения фотонов в среде, 35% на построение промежуточных точек столкновения, 20% на расчет оптических толщин в (20) и 35% на выполнение оценки (20).

На рис. 5 для всех рассмотренных моделей показана доля двукратного рассеяния в суммарной ИР и доля третьей кратности и выше. Из рис. 5 видно, что при $\sigma_s = 0,02 \text{ км}^{-1}$ вклад третьей и выше кратности для индикатрисы Рэля меняется от 0,001 до 6,7%, для индикатрисы Хеньи–Гринштейна – от 0,11 до 8,2%. Поэтому достаточно ограничиться рассеянием первых двух кратностей. Но при $\sigma_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$ доля рассеяния третьей и выше кратностей для индикатрисы Рэля меняется от 0,83 до 87%, а для индикатрисы Хеньи–Гринштейна – от 37 до 89%. При $\sigma_s = 2 \text{ км}^{-1}$ доля меняется в пределах

7,7–99,99% и 95–99,99% для индикатрисы Рэлея и Хенби–Гринштейна соответственно. Это указывает на необходимость применения метода Монте-Карло в этих случаях.

Заключение

Выполненное сравнение трех алгоритмов метода Монте-Карло для схем связи на рассеянном излучении и бистатического зондирования показывает, что предлагаемый алгоритм лучше подходит для сред с высокой мутностью среды, высоким вкладом молекулярного рассеяния и для временных интервалов, где не происходит изменения значения ИР на порядки значений. В остальных случаях эффективнее алгоритм двойной локальной оценки.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-01-00783-А, 15-07-06811-А, 16-31-00033-мол_а, программы № 8.1.27.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

1. Reagan J.A., Byrne D.M., King M.D., Spinhrne J.D., Herman B.M. Determination of the complex refractive index and size distribution of atmospheric particulates from bistatic-monostatic lidar and solar radiometer measurements // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1980. V. 85, N 3. P. 1591–1599.
2. Meki K., Yamaguchi K., Li X., Saito Y., Kawahara T.D., Nomura A. Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere // *Opt. Lett.* 1996. V. 21, N 17. P. 1318–1320.
3. Sugimoto N. Two-color dual-polarization pulsed bistatic lidar for measuring water cloud droplet size // *Opt. Rev.* 2000. V. 7, N 3. P. 235–240.
4. Barnes J.E., Sharma N.C.P., Kaplan T.B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system // *Appl. Opt.* 2007. V. 46, N 15. P. 2922–2929.
5. Olofson K.F.G., Witt G., Peterson J.B.C. Bistatic lidar measurements of clouds in the Nordic Arctic region // *Appl. Opt.* 2008. V. 47, N 26. P. 4777–4786.
6. Каблукова Е.Г., Каргин Б.А. Эффективные дискретно-стохастические модификации локальных оценок метода Монте-Карло для задач лазерного зондирования рассеивающих сред // *Вычислит. технол.* 2012. Т. 17, № 3. С. 70–82.
7. Каблукова Е.Г., Каргин Б.А., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Чесноков Е.Н. Численное статистическое моделирование распространения терагерцового излучения в облачном аэрозоле // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 11. С. 939–948.
8. Каблукова Е.Г., Каргин Б.А., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г. Численное моделирование поляризационных характеристик эхосигнала при наземном зондировании облаков в терагерцовом диапазоне // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 10. С. 892–900; Kablukova E.G., Kargin B.A., Lisenko A.A., Matvienko G.G. Numerical simulation of polarization charac-

teristics of an echo signal in the process of ground-based cloud sensing in the terahertz range // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 33–41.

9. Креков Г.М. Метод локальных оценок потока в задачах широкополосного лазерного зондирования // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, N 1. С. 47–55; Krekov G.M. Technique for the local estimation of fluxes in broadband lidar sensing problems // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 2. P. 152–160.
10. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 2. Параметрическая модификация итерационного метода решения лидарного уравнения // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22, № 8. С. 795–802.
11. Yin H., Chang S., Jia H., Yang Ji., Yang Ju. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // *J. Opt. Soc. Amer.* 2009. V. 26, N 11. P. 2466–2469.
12. Ding H., Chen G., Majumdar A. K., Sadler B.M., Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // *IEEE J. Sel. Areas. Commun.* 2009. V. 27, N 9. P. 1535–1544.
13. Yin H., Jia H., Zhang H., Wang X., Chang S., Yang J. Vectorized polarization-sensitive model of non-line-of-sight multiple-scatter propagation // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 2011. V. 28, N 10. P. 2082–2085.
14. Han D., Fan X., Zhang K., Zhu R. Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication // *Appl. Opt.* 2013. V. 52, N 22. P. 5516–5522.
15. Xiao H., Zuo Y., Wu J., Li Y., Lin J. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 17. P. 3366–3369.
16. Belov V.V., Tarasenkov M.V., Abramochkin V.N., Ivanov V.V., Fedosov A.V., Troitskii V.O., Shiyonov D.V. Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 1. Methods of study // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 5. P. 364–370.
17. Yin H., Chang S., Wang X., Yang Ji., Yang Ju., Tan J. Analytical model of non-line-of-sight single-scatter propagation // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 2010. V. 27, N 7. P. 1505–1509.
18. Elshimy M.A., Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 2011. V. 28, N 3. P. 420–428.
19. Lotova G.Z. Modification of the double local estimate of the Monte-Carlo method in radiation transfer theory // *Rus. J. Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. 2011. V. 26, N 5. P. 491–500.
20. Михайлов Г.А., Лотова Г.З. Численно-статистическая оценка потока частиц с конечной дисперсией // *Докл. АН*. 2012. Т. 447, № 1. С. 18–21.
21. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1976. 284 с.
22. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. С. 14.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkov. Three algorithms of statistical simulation in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing.

Three algorithms of the Monte Carlo method for calculation of impulse transfer function in channels of laser sensing and communication are considered: the local estimation algorithm, the double local estimation algorithm, and the suggested modified double local estimation algorithm. Results of testing of the algorithms and their comparison are considered. For a homogeneous medium, the complexities of the algorithms are compared, demonstrating under what conditions the suggested algorithm is advantageous as compared to the double local estimation algorithm. The contributions of double, triple, and higher-order scattering are numerically estimated. High contribution of multiple scattering proves the expediency of application of the Monte Carlo method for solving problems of this type.