

# Сравнение трудоемкости алгоритмов статистического моделирования импульсной реакции канала бистатической лазерной связи на рассеянном излучении и бистатического лазерного зондирования

М. В. ТАРАСЕНКОВ<sup>1,2,\*</sup>, В. В. БЕЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, Россия

\*Контактный e-mail: [tmv@iao.ru](mailto:tmv@iao.ru)

Выполнено сравнение трудоемкости трех алгоритмов статистического моделирования импульсной реакции канала связи на рассеянном излучении и бистатического лазерного зондирования: алгоритма двойной локальной оценки, комбинированной оценки и предлагаемого алгоритма. Сравнение алгоритмов для многочисленных схем наблюдения для однородной среды показало, что предлагаемый алгоритм для оптических толщин трассы источник — пересечение — приемник меньше единицы имеет в среднем в 5 раз меньшую трудоемкость, чем алгоритм двойной локальной оценки, и в 5.9 раза, чем алгоритм комбинированной оценки. При больших значениях оптической толщины в случае невысокой вытянутости вперед индикатрисы рассеяния эффективнее алгоритм комбинированной оценки, а при высокой вытянутости индикатрисы — алгоритм двойной локальной оценки.

*Ключевые слова:* метод Монте-Карло, многократное рассеяние, оптическая связь, бистатическое зондирование, импульсная реакция.

## Введение

Теоретическое исследование передаточных свойств линейных атмосферных (водных) каналов оптико-электронной коммуникации [1–14] (зондирования [15–20]) можно осуществить, моделируя их реакцию  $h(t)$  на входной  $\delta(t)$ -импульс. Если вклад многократного рассеяния в принимаемый сигнал несуществен, то при решении уравнения переноса излучения (УПИ) можно использовать аналитические методы, например, в приближении одно- или двукратного рассеяния. В условиях высокой мутности среды при решении задач бистатической оптико-электронной связи (зондирования) многократное рассеяние излучения формирует фронты функции  $h(t)$ , называемой импульсной реакцией, а центральный ее участок определяется в основном однократно рассеянным излучением, приходящим из области, образованной пересечением поля зрения приемника с конусом расходящегося лазерного излучения из источника.

В этих случаях основным инструментом для решения УПИ становится метод Монте-Карло. Ранее коллективом авторов под руководством Г.И. Марчука и Г.А. Михайлова разработаны алгоритмы локальной и двойной локальной оценки (последний назовем

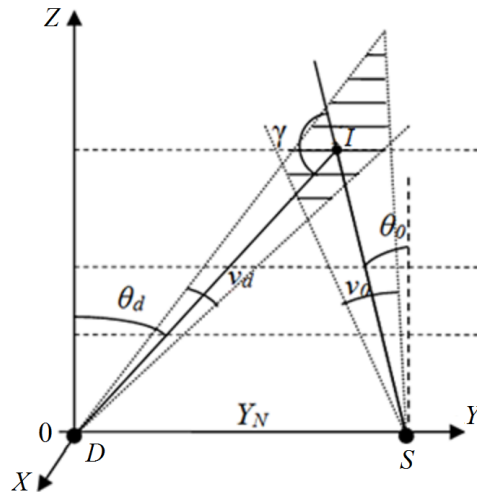


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи:  $S$  — источник,  $D$  — приемник

классическим) [21]. Для бистатических схем связи, или зондирования, (рис. 1) импульсную реакцию  $h(t)$  можно описать следующим образом. На интервале  $[t_1, t_2]$  формируется сигнал, приходящий из объема, образованного пересечением конусов поля зрения приемной системы и расходимости лазерного пучка. Этот участок функции  $h(t)$  назовем центральным, а участки на интервалах  $[0, t_1]$  (ближняя зона) и  $[t_2, t_{\max}]$  (дальняя зона) — передним и задним фронтами соответственно.

В дальней зоне алгоритм локальной оценки дает результаты с высокой погрешностью, и он неприменим для оценки переднего фронта импульсной реакции. Моделирование реакции  $h(t)$  с использованием алгоритма двойной локальной оценки на этих временных интервалах часто требует значительных временных затрат. Поэтому в работах [22, 23] предложен алгоритм модифицированной двойной локальной оценки, который в отличие от классического [21] осуществляет оценку в каждой точке столкновения не в случайный временной интервал, а сразу во всех возможных для данной точки интервалах. Отметим работу [20], в которой описывается модификация двойной локальной оценки, заключающаяся в использовании нескольких промежуточных точек в двойной локальной оценке для снижения дисперсии расчета. В работах [24, 25] приводится комбинированный алгоритм, цель которого устранить смещенность полученных таким образом оценок.

Сравнение результатов моделирования реакций  $h(t)$ , полученных алгоритмами локальной и двойной локальной оценки [22, 23], показало, что предложенный алгоритм во многих оптико-геометрических условиях имеет значительные преимущества по сравнению с конкурирующими. Данная работа посвящена сравнению трудоемкости алгоритмов статистического моделирования импульсной реакции  $h(t)$  для широкого набора оптико-геометрических условий с целью определения тех, при которых каждый из рассмотренных алгоритмов имеет преимущества.

## 1. Постановка задачи

Требуется определить реакцию  $h(t)$  атмосферного канала для геометрической схемы организации бистатической оптико-электронной связи (зондирования), изображенной на рис. 1. Пусть оптические свойства атмосферы определены, т. е. заданы индикатрисы

рассеяния  $g$ , коэффициенты рассеяния  $\sigma_s$  и ослабления  $\sigma_t$ . Учетом 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 (ее ось ориентирована в направлении  $\theta_d$  в плоскости  $Y0Z$ ), которая регистрирует излучение в пределах угла поля зрения  $\nu_d$ . На расстоянии  $Y_N$  от приемника в точке  $(0, Y_N, 0)$  расположен лазерный источник  $S$ , излучающий равномерно по направлениям  $\delta(t)$ -импульс с угловой расходимостью  $\nu_0$ , оптическая ось пучка лежит в плоскости  $Y0Z$ , и ее положение задается углом  $\theta_0$ . Протяженность трассы  $S-I-D$  прием равной  $L$ , а угол между направлениями  $SI$  и  $ID$  — равным  $\gamma$ . Начало отсчета по времени определим моментом  $t_0 = Y_N/c$  ( $c$  — скорость света).

Будем определять  $h(t)$  на интервале  $[0, t_{\max}]$ , где  $t_{\max} = l_{\max}/c$  ( $l_{\max}$  — максимальная протяженность траектории за вычетом  $Y_N$ ). Время ближней временной зоны разделим на  $N_1$ , центральную зону — на  $N_2$  и дальнюю — на  $N_3$  одинаковых (но разных по длительности) интервалов.

## 2. Алгоритмы статистического моделирования

Для статистического моделирования импульсной реакции осуществлены численные эксперименты с помощью четырех алгоритмов:

- 1) алгоритма локальной оценки, основанного на [21, с. 38];
- 2) классического алгоритма двойной локальной оценки, основанного на [21, с. 39];
- 3) алгоритма комбинированной оценки, предложенного в работах [24, 25];
- 4) разработанного авторами алгоритма [22, 23].

**Алгоритм локальной оценки.** Этот алгоритм по методу 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  $\nu_d$ , в соответствующий временной интервал  $i$  делается локальная оценка интенсивности излучения

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

Здесь  $\omega_k$  — “вес” фотона в  $k$ -й точке столкновения  $M$ ;  $\mathbf{r}_M$  — радиус-вектор точки  $M$ ;  $\gamma_M$  — угол рассеяния от направления траектории перед столкновением в точке  $M$  в направлении  $MD$ ;  $\sigma_s, \sigma_t$ , — коэффициенты рассеяния и ослабления соответственно;  $g$  — значение индикатрисы рассеяния в заданной точке столкновения и для заданного угла рассеяния;  $r_{MD}$  — расстояние между точками  $M$  и  $D$ ;  $\tau_{MD}$  — оптическая длина отрезка  $MD$ .

**Алгоритм двойной локальной оценки.** В отличие от алгоритма локальной оценки, в этом алгоритме для каждой  $k$ -й точки столкновения  $M$   $j$ -й фотонной траектории определяется случайная промежуточная точка столкновения  $N$  в поле зрения приемника и в соответствующий временной интервал осуществляется двойная локальная оценка интенсивности излучения

$$I_{i,j,k} = \omega_k \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_M)g(\mathbf{r}_M, \cos \gamma_1)}{2\pi\sigma_t(\mathbf{r}_M)} \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_N)g(\mathbf{r}_N, \cos \gamma_2)}{2\pi\sigma_t(\mathbf{r}_N)} \frac{2\pi \left(1 - \cos \frac{\nu_d}{2}\right)}{r_{MN}^2} \exp(-\tau_{MN}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}_N$  — радиус-вектор промежуточной точки  $N$ ;  $\gamma_1$  — угол рассеяния в точке  $M$  от направления траектории фотонов перед столкновением до направления  $MN$ ;  $\gamma_2$  — угол рассеяния между направлениями  $MN$  и  $ND$ ;  $r_{MN}$  — расстояние от точки  $M$  до  $N$ ;  $\tau_{MN}$  — оптическая толщина от точки  $M$  до  $N$ .

**Комбинированная оценка.** Как видно из оценки (2), правая часть выражения содержит в знаменателе величину  $r_{MN}^2$ , что делает эту оценку расходящейся. Чтобы этого избежать, вокруг точки столкновения необходимо задать шар радиуса  $\varepsilon$ . Если промежуточная точка окажется внутри шара, то оценка (2) не выполняется [21]. Этот прием делает оценку (2) конечной, но создает некоторое ее смещение. В работе [24] даются рекомендации по выбору радиуса  $\varepsilon$ , чтобы смещение оценки не превышало требуемую величину.

Проблему смещения оценок удалось иначе обойти в работах [24, 25], где предложена комбинированная оценка. Суть алгоритма заключается в том, что если точка столкновения лежит вне конуса с углом поля зрения  $\nu_d + \nu_\varepsilon$  ( $\nu_\varepsilon > 0$ ), центр которого расположен в точке приема, то выполняется двойная локальная оценка (2). Если точка столкновения находится внутри поля зрения приемника, то из этой точки локальная оценка не осуществляется, а в следующей точке столкновения (если она остается в поле зрения приемника) выполняется локальная оценка (1). В работах [24, 25] доказываются несмещенность и сходимости комбинированной оценки.

**Предлагаемый алгоритм.** В разработанном авторами алгоритме [22, 23] для каждой точки столкновения  $M$  поле зрения делится на подобласти, соответствующие каждому из возможных для данной точки временных интервалов, строится случайное направление в поле зрения, на полученном луче в каждой подобласти находится своя промежуточная точка и в каждом временном интервале выполняется двойная локальная оценка вида

$$I_{i,j,k} = \omega_k \cdot 2\pi \left(1 - \cos \frac{\nu_d}{2}\right) \left(\frac{P_i}{1 - e_i b} - \frac{P_{i-1}}{1 - e_{i-1} b}\right) \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_M) g(\mathbf{r}_M, \cos \gamma_{1,i})}{2\pi \sigma_t(\mathbf{r}_M) r_{MN}^2} \times \\ \times \frac{\sigma_s(\mathbf{r}_{N_i}) g(\mathbf{r}_{N_i}, \cos \gamma_{2,i})}{2\pi} \exp(-\tau_{MN_i}) \exp(-\tau_{N_i D}). \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{r}_{N_i}$  — радиус-вектор промежуточной точки  $N_i$ ;  $\gamma_{1,i}$  — углы рассеяния от направления фотонной траектории перед столкновением до направления  $MN_i$ ;  $\gamma_{2,i}$  — углы рассеяния от направлений  $MN_i$  до направления  $N_i D$ ;  $b$  — вторая координата случайного направления  $(a, b, c)$  в подвижной системе координат, связанной с точкой приема и точкой столкновения  $M$  [22, 23].

В предлагаемом алгоритме также необходимо вырезание шара радиуса  $\varepsilon$  вокруг точки столкновения  $M$ , чтобы дисперсия была конечной. В дальнейшем планируется устранение этого недостатка путем адаптации комбинированной оценки к предлагаемому алгоритму.

### 3. Тестирование алгоритмов

Для тестирования программ на основе описанных выше алгоритмов выполнялось сравнение импульсной реакции с результатами расчетов из [24], полученными для моностаической схемы зондирования в следующей постановке задачи. Модельная трехмерная среда задана в полупространстве  $z < 0$ , ограничена поверхностью  $z = 0$ . Оптические характеристики среды: поглощение отсутствует, коэффициент рассеяния  $\sigma_s = 0.175 \text{ м}^{-1}$ ,

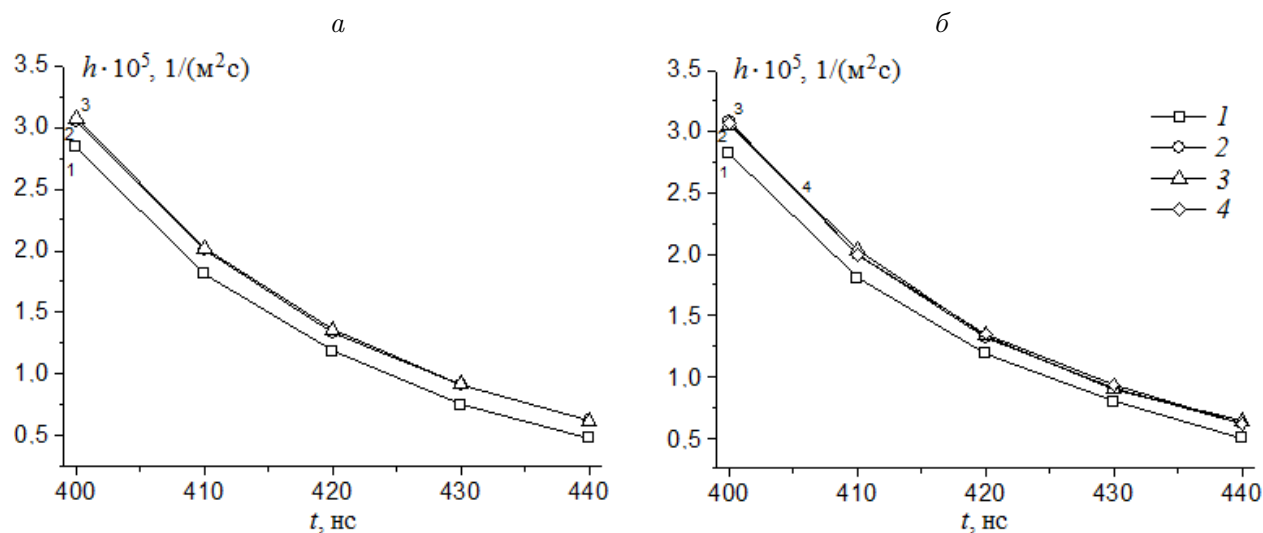


Рис. 2. Результаты расчетов для тестового примера из [24] (а) и полученные авторами (б): кривая 1 — метод локальной оценки, 2 — метод двойной локальной оценки, 3 — комбинированная оценка, 4 — предлагаемый алгоритм

индикатриса рассеяния Хеньи—Гринштейна с показателем  $\mu_0 = 0.9$ . Источник излучения располагался на высоте  $z = 5$  м, он ориентирован вертикально вниз, расходимость излучения  $\nu_0 = 0.00030$ , рад и мощность излучения распределена  $P(t) = qt^2 \exp(-qt)$ ,  $q = 0.225$  нс. В этой же точке помещен приемник излучения, ориентированный в том же направлении с углом поля зрения  $\nu_d = 0.00030$  рад. Скорость света в среде  $c = 0.225$  м/нс. Аналогично [24] расчет выполнялся для  $3 \cdot 10^8$  траекторий, радиус вырезаемого шара  $\varepsilon = 2.857E - 5$  км, для комбинированной оценки  $\nu_\varepsilon = 0.00086$  рад. Результаты расчетов принимаемого излучения из [24] и наших расчетов четырьмя алгоритмами приведены в таблице и на рис. 2. Сравнение показывает, что полученные результаты совпадают с результатами [24] в пределах погрешности расчетов.

Результаты расчетов для тестового примера из [24]

Алгоритм (оценка)	Время, нс				
	400	410	420	430	440
Локальная [24]	$2.842 \pm 0.025$	$1.809 \pm 0.007$	$1.181 \pm 0.027$	$0.747 \pm 0.007$	$0.482 \pm 0.002$
Локальная (1)	$2.822 \pm 0.007$	$1.804 \pm 0.005$	$1.191 \pm 0.030$	$0.797 \pm 0.041$	$0.501 \pm 0.022$
Двойная локальная [24]	$3.053 \pm 0.047$	$2.005 \pm 0.025$	$1.334 \pm 0.016$	$0.911 \pm 0.027$	$0.621 \pm 0.014$
Двойная локальная (2)	$3.088 \pm 0.044$	$1.995 \pm 0.018$	$1.321 \pm 0.014$	$0.905 \pm 0.013$	$0.615 \pm 0.008$
Комбини- рованная [24]	$3.074 \pm 0.052$	$2.016 \pm 0.025$	$1.361 \pm 0.032$	$0.914 \pm 0.027$	$0.619 \pm 0.014$
Комбини- рованная (1), (2)	$3.057 \pm 0.037$	$2.028 \pm 0.029$	$1.336 \pm 0.015$	$0.894 \pm 0.016$	$0.639 \pm 0.021$
Модифицирован- ная двойная (3)	$3.068 \pm 0.019$	$1.996 \pm 0.014$	$1.349 \pm 0.015$	$0.930 \pm 0.026$	$0.615 \pm 0.007$

#### 4. Сравнение трудоемкости алгоритмов для однородной среды

Для оценки области оптико-геометрических условий, в которой рассмотренные алгоритмы имеют преимущества, выполнен набор объемных серий расчетов многократно рассеянной компоненты в реакции  $h(t)$ . Расчеты с помощью алгоритма локальной оценки не производились, поскольку ранее показано [22, 23], что этот алгоритм характеризуется наибольшей трудоемкостью по сравнению с классическим и предложенным нами алгоритмом в рассматриваемых схемах каналов. Численные эксперименты проведены для следующих оптико-геометрических условий. Рассматривался однородный плоский слой толщиной 100 км, верхняя и нижняя поверхности слоя абсолютно поглощающие. Выполнены три серии расчетов:

1) рассеяние излучения в слое по закону Рэлея без поглощения (вероятность выживания кванта  $\chi = 1$ );

$$g_R(\mu) = \frac{3}{8}(1 + \mu^2); \quad (4)$$

где  $\mu$  — косинус угла рассеяния;

2) рассеяние по закону Хеньи — Гринштейна с показателем  $\mu_0 = 0.9$  без поглощения

$$g_{H-G}(\mu) = \frac{(1 - \mu_0^2)}{2(1 + \mu_0^2 - 2\mu\mu_0)^{3/2}}, \quad (5)$$

3) рассеяние по закону Рэлея с  $\chi = 0.5$ .

Коэффициент ослабления в расчетах принимал значения:  $\sigma_t = 0.01, 0.5$  и  $2 \text{ км}^{-1}$ . Задавались три варианта значений углов расходимости излучения и поля зрения приемника: 1)  $\nu_0 = 0.2^\circ, \nu_d = 2^\circ$ ; 2)  $\nu_0 = 0.2^\circ, \nu_d = 20^\circ$ ; 3)  $\nu_0 = 20^\circ, \nu_d = 20^\circ$ . Расчеты выполнялись для двух значений зенитного угла ориентации источника  $\theta_0$ , равных 0 и  $60^\circ$ . Приняты три значения угла  $\gamma$  между направлениями  $SI$  и  $ID$  (см. рис. 1): для  $\theta_0$ , равных 0, —  $\gamma = 105, 127.5$  и  $150^\circ$ , для  $\theta_0 = 60^\circ$  —  $\gamma = 45, 97.5$  и  $150^\circ$ . Численные эксперименты проведены для трех длин:  $L = 0.1, 2$  и  $10 \text{ км}$ . В рассматриваемых условиях базовое расстояние по всем вариантам задавалось в пределах  $0.025 < Y_N < 9.32 \text{ км}$ , зенитный угол ориентации оптической оси приемника для  $\theta_0 = 0$  изменялся в пределах  $30 \leq \theta_d \leq 75^\circ$ , для  $\theta_0 = 60^\circ$  — в пределах  $-30 \leq \theta_d \leq 75^\circ$ .

Перед основными расчетами выполнялись численные эксперименты для того, чтобы определить значения  $l_{\max}$ . В рассматриваемых условиях  $l_{\max} \in [0.219, 100] \text{ км}$  для индикатрисы Рэлея и  $l_{\max} \in [0.015, 100] \text{ км}$  для индикатрисы Хеньи — Гринштейна. Эти расчеты выполнялись для  $5 \cdot 10^4$  траекторий в 30 пачках, что потребовало не более 12% от суммарного времени расчетов.

Разбиение временных интервалов выполнялось следующим образом:  $N_1 = 5$  для ближней временной зоны, значения  $N_2$  и  $N_3$  выбирались в зависимости от того, насколько велико значение  $l_{\max}$  по сравнению со временем начала дальней временной зоны. Суммарно расчет выполнялся для 25 временных интервалов. Число траекторий для каждого рассматриваемого алгоритма выбиралось так, чтобы время расчета по тесту Lin-X при  $\sigma_t = 0.01$  и  $0.5 \text{ км}^{-1}$  составляло 10 мин на ЭВМ с производительностью 30 Гфлопс и 60 мин для  $\sigma_t = 2 \text{ км}^{-1}$ . Это связано с тем, что в последнем случае сходимость результатов моделирования происходит значительно медленнее. Каждым из алгоритмов выполнено по 486 вариантов расчетов. Для примера на рис. 3 приведены значения импульсной реакции для нескольких частных случаев. Эффективность

алгоритмов сравнивалась путем расчета отношения трудоемкостей алгоритмов, определяемого как

$$R_{i,j} = \frac{t_i D_i}{t_j D_j},$$

где  $t_i$  — время, затраченное на расчет  $i$ -м алгоритмом;  $D_i$  — средняя по 25 временным интервалам относительная дисперсия для расчета  $i$ -м алгоритмом;  $i, j$  — порядковые номера алгоритмов. В качестве первого алгоритма брался алгоритм двойной локальной оценки, второго — алгоритм комбинированной оценки и третьего — предложенный алгоритм.

После расчетов оценивалось влияние варьируемых в численных экспериментах величин на отношение трудоемкостей  $R$ . Анализ показывает, что на отношение трудоемкостей  $R_{31}$  и  $R_{32}$  существенно влияют значение  $\sigma_t$ , дистанция  $L$  и оптическая толщина трассы  $S-I-D$  (рис. 4). Функциональное поведение  $R_{31}$  и  $R_{32}$  схожее. При оптических толщинах  $\tau_{SID} \leq 1$  предлагаемый алгоритм имеет значительное преимущество по сравнению с алгоритмами двойной локальной оценки и комбинированной оценки.

Диапазон значений  $\tau_{SID} < 1$  важен по двум причинам. Первая связана с возможностью осуществления оптико-электронной связи на рассеянном излучении в условиях прозрачной атмосферы. Вторая причина создания эффективных (в смысле минимальной трудоемкости) алгоритмов двойной локальной оценки методом Монте-Карло обусловлена определением с их помощью области применимости приближения двукратного рассеяния при решении УПИ в рассмотренной постановке задачи.

С ростом мутности среды и протяженности канала предлагаемый алгоритм постепенно теряет преимущества по трудоемкости по сравнению с классическим алгоритмом двойной локальной оценки и алгоритмом комбинированной оценки. При оптических

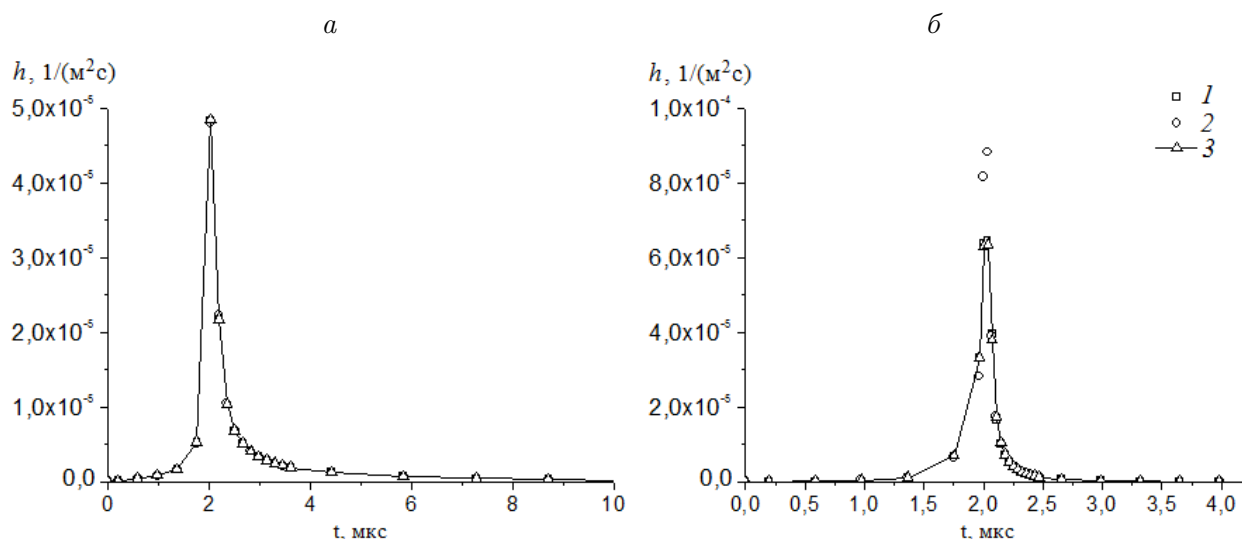


Рис. 3. Результаты расчета импульсной реакции тремя алгоритмами для условий:  $\nu_0 = 0.2^\circ$ ,  $\nu_d = 2^\circ$ ,  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $\theta_d = 22.5^\circ$ ,  $\gamma = 97.5^\circ$ ,  $L = 2$  км,  $\sigma_t = 0.5$  км $^{-1}$ ,  $\chi = 1$ ,  $Y_N = 1.3926$  км,  $\tau_{SID} = 1$ : *a* — индикатриса Рэлея (4), *б* — индикатриса Хеньи — Гринштейна (5); кривая 1 — классическая двойная локальная оценка, 2 — комбинированная оценка, 3 — предложенный алгоритм. Средняя дисперсия по временным интервалам указанными алгоритмами не превышала 0.61 % для (*a*) и 5.9 % для (*б*)

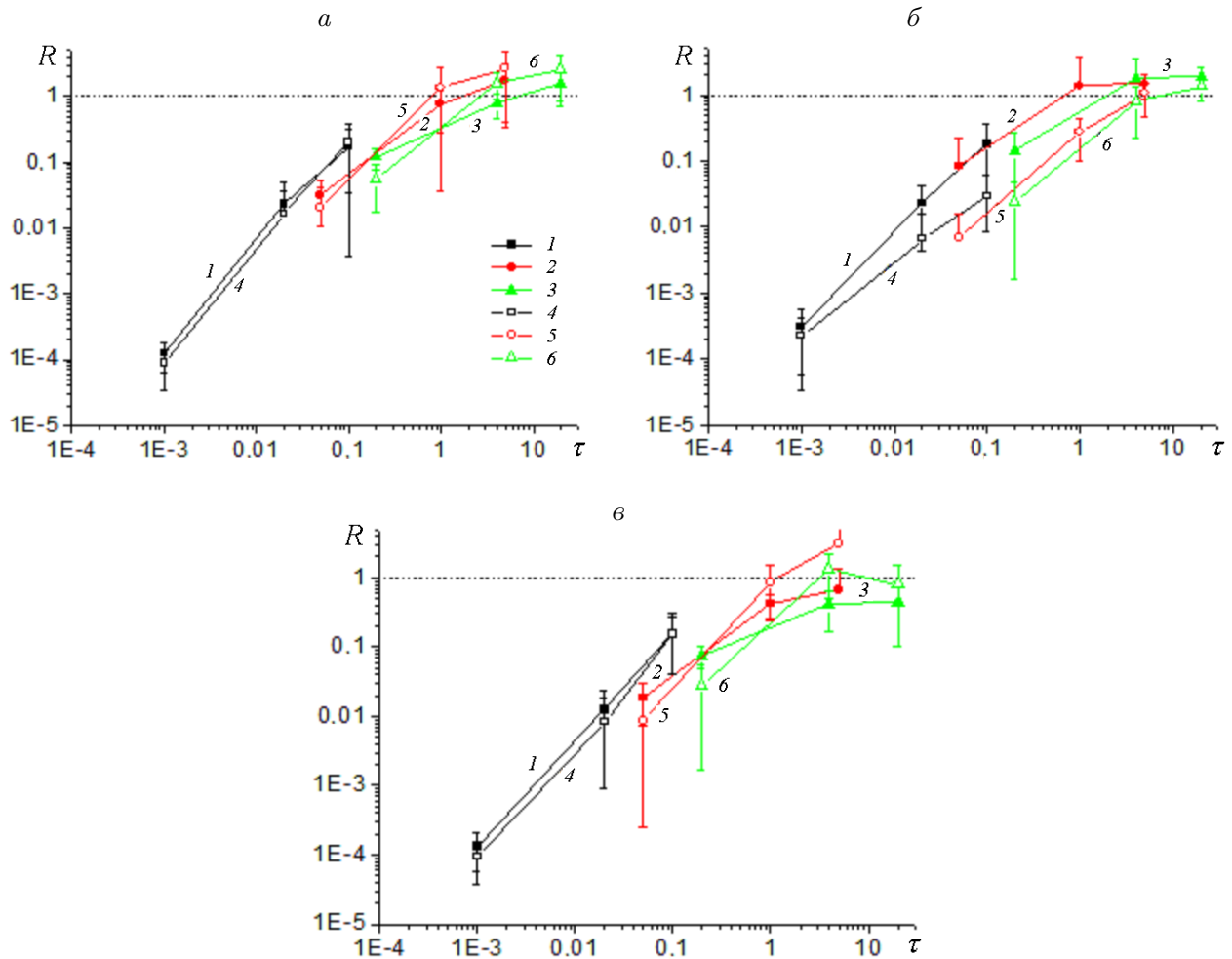


Рис. 4. Зависимость отношения средних относительных трудоемкостей  $R$  от оптической толщины трассы  $\tau_{SID}$  при фиксированных значениях коэффициента ослабления однородной среды:  $a$  — индикатриса Рэля, вероятность выживания кванта  $\chi = 1$ ;  $б$  — индикатриса Хеньи — Гринштейна,  $\chi = 1$ ;  $в$  — индикатриса Рэля,  $\chi = 0.5$ ; кривая 1 — отношение трудоемкостей алгоритмов двойной локальной оценки и предлагаемого алгоритма  $R_{31}$  при  $\sigma_t = 0.01 \text{ км}^{-1}$ , кривая 2 —  $R_{31}$  при  $\sigma_t = 0.5 \text{ км}^{-1}$ , кривая 3 —  $R_{31}$  при  $\sigma_t = 2 \text{ км}^{-1}$ ; кривая 4 — отношение трудоемкостей комбинированной оценки и предлагаемого алгоритма  $R_{32}$  при  $\sigma_t = 0.01 \text{ км}^{-1}$ , кривая 5 —  $R_{32}$  при  $\sigma_t = 0.5 \text{ км}^{-1}$ , кривая 6 —  $R_{32}$  при  $\sigma_t = 2 \text{ км}^{-1}$

толщинах  $\tau_{SID} \geq 1$  эти алгоритмы начинают иметь равную или меньшую трудоемкость по сравнению с предлагаемым алгоритмом.

Что касается влияния поглощения и индикатрисы рассеяния на трудоемкость алгоритмов, то из рис. 4 видно, что для индикатрисы Рэля классический алгоритм и алгоритм комбинированной оценки имеют примерно одинаковую трудоемкость, но для индикатрисы Хеньи — Гринштейна она значительно выше, чем для классического алгоритма двойной локальной оценки.

Анализ результатов расчетов показывает, что зависимость отношения трудоемкостей алгоритмов от углов расходимости источника и поля зрения практически отсутствует. Что касается угла  $\gamma$ , то при малых его значениях предлагаемый алгоритм работает несколько лучше по сравнению с другими алгоритмами, чем при больших  $\gamma$ . Наиболее сильно это проявляется для расчетов с индикатрисой Хеньи — Гринштейна.



## Заключение

Выполнено сравнение трудоемкости трех алгоритмов статистического моделирования многократно рассеянной части импульсной реакции канала бистатической связи (или зондирования) на рассеянном излучении: классического алгоритма двойной локальной оценки, комбинированной оценки и предлагаемого алгоритма. Результаты сравнения с алгоритмом локальной оценки не приводились, так как для рассмотренных геометрических схем канала данный алгоритм малоприменим. Получено, что предлагаемый алгоритм имеет значительно меньшую трудоемкость по сравнению с остальными алгоритмами (в среднем в 5 раз по сравнению с алгоритмом двойной локальной оценки и в 5.9 раза по сравнению с алгоритмом комбинированной оценки) при оптической толщине трассы источник  $S$  — пересечение  $I$  — приемник  $D$   $\tau_{SID} \leq 1$ . Это обеспечивает в среднем в 2.2 и 2.4 раза соответственно меньшую погрешность вычислений предлагаемым алгоритмом по сравнению с рассмотренными алгоритмами при одинаковом затраченном времени. В случае больших оптических толщин при индикатрисах рассеяния со слабой вытянутостью вперед лучше использовать алгоритм комбинированной оценки в силу его несмещенности, но при индикатрисах рассеяния с высокой вытянутостью вперед более оправданно использование алгоритма двойной локальной оценки.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 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.

Авторы благодарят Г.З. Лотову за предоставленные материалы, позволившие выполнить тестирование разработанных программ и создать программу расчетов алгоритмом комбинированной оценки.

## Список литературы / References

- [1] Yin, H., Chang, S., Jia, H., Yang, Ji., Yang, Ju. Non-line-of-sight multiscatter propagation model // JOSA A. 2009. Vol. 26, No. 11. P. 2466–2469.
- [2] 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. on Selected Areas in Communications. 2009. Vol. 27, No. 9. P. 1535–1544.
- [3] Yin, H., Jia, H., Zhang, H., Wang, X., Chang, S., Yang, J. Vectorized polarization-sensitive model of non-line-of-sight multiple-scatter propagation // JOSA A. 2011. Vol. 28, No. 10. P. 2082–2085.
- [4] Han, D., Fan, X., Zhang, K., Zhu, R. Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication // Applied Optics. 2013. Vol. 52, No. 22. P. 5516–5522.
- [5] Xiao, H., Zuo, Y., Wu, J., Li, Y., Lin, J. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium // Optics Letters. 2013. Vol. 38, No. 17. P. 3366–3369.
- [6] Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N., Ivanov, V.V., Fedosov, A.V., Troitskii, V.O., Shiyarov, D.V. Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Pt 1: Methods of study // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. Vol. 26, No. 5. P. 364–370.

- [7] **Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N., Ivanov, V.V., Fedosov, A.V., Gridnev, Yu.V., Troitskii, V.O., Dimaki, V.A.** Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Pt 2: Field experiments in 2013 // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 28, No. 3. P. 202–208.
- [8] **Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N., Troitskii, V.O.** Over-the-horizon optoelectronic communication systems // *Russ. Phys. J.* 2014. Vol. 57, No. 7. P. 202–208.
- [9] **Belov, V.V., Tarasenkov, M.V., Abramochkin, V.N.** Bistatic atmospheric optoelectronic communication systems (field experiments) // *Techn. Phys. Letters*. 2014. Vol. 40, No. 10. P. 871–874.
- [10] **Yin, H., Chang, S., Wang, X., Yang, Ji., Yang, Ju., Tan, J.** Analytical model of non-line-of-sight single-scatter propagation // *JOSA A*. 2010. Vol. 27, No. 7. P. 1505–1509.
- [11] **Elshimy, M.A., Hranilovic, S.** Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // *JOSA A*. 2011. Vol. 28, No. 3. P. 420–428.
- [12] **Воронцов М.А., Дудоров В.В., Зырянова М.О., Колосов В.В., Филимонов Г.А.** Частота появления ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 11. С. 936–940.  
**Vorontsov, M.A., Dudorov, V.V., Zyryanova, M.O., Kolosov, V.V., Filimonov, G.A.** Bit error rate in free space optical communication systems with a partially coherent transmitting beam // *Atmospheric and Ocean Optics*. 2013. Vol. 26, No. 3. P. 185–189.
- [13] **Полянский С.В., Игнатов А.Н.** Определение дистанции атмосферного канала связи с заданным коэффициентом готовности для г. Новосибирска // *Вестн. СибГУТИ*. 2009. № 4. С. 73–82.  
**Polyanskiy, S.V., Ignatov, A.N.** Defining the distance of atmospheric link with necessary readiness factor for Novosibirsk // *Vestnik SibGUTI*. 2009. No. 4. P. 73–82. (In Russ.)
- [14] **Пожидаев В.Н.** Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // *Радиотехника и электроника*. 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.  
**Pozhidaev, V.N.** The feasibility of ultraviolet communication lines, based on the effect of molecular and aerosol scattering in the atmosphere // *Radiotekhnika i Jelektronika*. 1977. Vol. 22, No. 10. P. 2190–2192. (In Russ.)
- [15] **Reagan, J.A., Byrne, D.M., King, M.D., Spinhirne, 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. of Geophys. Res.: Oceans*. 1980. Vol. 85, No. C3. P. 1591–1599.
- [16] **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 // *Optics Letters*. 1996. Vol. 21, No. 17. P. 1318–1320.
- [17] **Sugimoto, N.** Two-color dual-polarization pulsed bistatic lidar for measuring water cloud droplet size // *Optical Review*. 2000. Vol. 7, No. 3. P. 235–240.
- [18] **Barnes, J.E., Sharma, N.C.P., Kaplan, T.B.** Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system // *Applied Optics*. 2007. Vol. 46, No. 15. P. 2922–2929.
- [19] **Olofson, K.F.G., Witt, G., Peterson, J.B.C.** Bistatic lidar measurements of clouds in the Nordic Arctic region // *Applied Optics*. 2008. Vol. 47, No. 26. P. 4777–4786.
- [20] **Каблукова Е.Г., Каргин Б.А.** Эффективные дискретно-стохастические модификации локальных оценок метода Монте-Карло для задач лазерного зондирования рассеивающих сред // *Вычисл. технологии*. 2012. Т. 17, № 3. P. 70–82.

- Kablukova, E.G., Kargin, B.A.** Efficient discrete stochastic modification for local estimates of the Monte Carlo method for problems of laser sounding of scattering media // *Comput. Technologies*. 2012. Vol. 17, No. 3. P. 70–82. (In Russ.)
- [21] **Marchuk, G.I., Mikhailov, G.A., Nazaraliev, M.A., Darbinjan, R.A., Kargin, B.A., Elepov, B.S.** The Monte Carlo methods in atmospheric optics. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1980. 209 p.
- [22] **Белов В.В., Тарасенков М.В.** Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403.  
**Belov, V.V., Tarasenkov, M.V.** Three algorithms of statistical simulation in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016. Vol. 29, No. 5. P. 397–403. (In Russ.)
- [23] **Белов В.В., Тарасенков М.В.** Алгоритмы статистического моделирования импульсных реакций бистатистических каналов связи // *Тр. Междунар. конф. “Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики — 2015”, посвященной 90-летию со дня рождения акад. Г.И. Марчука. Ин-т вычисл. математики и матем. геофизики СО РАН, Новосибирск, 19–23 октября 2015 г. [Электронный ресурс]. Новосибирск: Абвей, 2015. С. 95–101.*  
**Belov, V.V., Tarasenkov, M.V.** The algorithms of statistical simulation of the impulse reactions of bistatic communication channels // *Proc. Intern. Conf. “Actual problems of Computational and Applied Mathematics – 2015”, Dedicated 90th Anniversary of the Acad. G.I. Marchuk. Novosibirsk, IVM&MG SB RAS, October 19–23, 2015. Novosibirsk: Abvey, 2015. P. 95–101. (In Russ.)*
- [24] **Lotova, G.Z.** Modification of the double local estimate of the Monte Carlo method in radiation transfer theory // *Russ. J. of Numer. Analysis and Math. Modeling*. 2011. Vol. 26, No. 5. P. 491–500.
- [25] **Михайлов Г.А., Лотова Г.З.** Численно-статистическая оценка потока частиц с конечной дисперсией // *Докл. Акад. наук*. 2012. Т. 447, № 1. С. 18–21.  
**Mikhailov, G.A., Lotova, G.Z.** A numerical statistical estimate for a particle flux with finite variance // *Doklady Mathematics*. 2012. Vol. 86, No. 3. P. 743–746.

*Поступила в редакцию 6 июля 2016 г.*

### **Comparison of the complexity of algorithms for statistical simulation of impulse response of bistatic communication channel on scattered radiation and bistatic laser sensing**

TARASENKOV, MIKHAIL V.<sup>1,2,\*</sup>, BELOV, VLADIMIR V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

\*Corresponding author: Tarasenkov, Mikhail V., e-mail: [tmv@iao.ru](mailto:tmv@iao.ru)

To check our algorithms test comparisons with results of other authors were made. Checking shows that the difference between the results is less than calculation error.

To achieve main purpose we performed a large number of calculation series for homogeneous medium. The comparison shows that for the optical thickness of the source-intersection path-receiver less than 1 the proposed algorithm is about 5 times

more efficient than the double local estimation algorithm and 5.9 times more efficient than the combined estimation algorithm. For larger optical thicknesses and low degree of elongation of the scattering phase function in the forward direction, the algorithm of combined estimate has higher efficiency, whereas for high degree of elongation of the scattering phase function, the algorithm of double local estimate has higher efficiency.

*Keywords:* Monte Carlo method, multiple scattering, optical communications, bi-static sensing, pulsed transfer characteristic.

**Acknowledgements.** This work was supported by RFBR grants No. 15-01-00783-A, 15-07-06811-A and 16-31-00033-mol-a and by the Tomsk State University Academician D.I. Mendeleev Scientific Fund Program (grant No. 8.1.27.2015) for 2015.

*Received 6 July 2016*