

СРАВНЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ТРЕХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ БИСТАТИЧЕСКИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ ИЛИ ЗОНДИРОВАНИЯ

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

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

² Национальный исследовательский Томский государственный университет

e-mail: Belov@iao.ru, TMV@iao.ru

Ключевые слова: метод Монте-Карло, импульсная переходная характеристика, бистатистические схемы.

Сравниваются погрешности расчетов импульсной переходной характеристики (ИПХ), выполненных для однородной молекулярной среды тремя алгоритмами статистического моделирования: алгоритмом локальной оценки, классическим алгоритмом двойной локальной оценки и предлагаемым алгоритмом с модифицированной двойной локальной оценкой в каждый временной интервал. Сравнение показывает, что для прозрачных сред предлагаемый алгоритм дает результаты со значительно меньшими погрешностями (или меньшей трудоемкостью), но для оптически плотных сред классический алгоритм двойной локальной оценки дает результаты с меньшей погрешностью, чем предлагаемый.

При лидарном зондировании дисперсных сред (атмосфера, водная среда) [1-2] или при организации связи вне зоны прямой видимости (называемой также в литературе «загоризонтной» или «non-line-of-sight», или «over-the-horizon») [3-6] могут использоваться бистатистические схемы приемо-передающего тракта оптико-электронных систем. Эти схемы характеризуются большим расстоянием между источником и приемником излучения (называемого базой). В отклике $h(t)$ внешнего канала импульсной реакцией или импульсной переходной характеристикой (распространения сигнала от источника к приемнику на входной δ -импульс, называемый ИПХ), выделяют три участка (рис. 1): передний и задний фронты, формируемые рассеянным излучением кратностью выше первой, и центральный участок, который формируется в основном рассеянным излучением первой кратности рассеяния.

Единственным эффективным методом моделирования переднего и заднего фронтов функции $h(t)$ с нашей точки зрения является метод Монте-Карло. Расчета $h(t)$ в приближении однократного рассеяния недостаточно, так как это не позволяет в случае зондирования адекватно решить обратную задачу, а при оптической связи оценить объем или скорость передачи информации. Моделирование ИПХ можно осуществлять несколькими алгоритмами. Первых из них – алгоритм локальной оценки [7], но этот алгоритм эффективен только в центральной зоне. Второй – классической двойной локальной оценкой (под классическим понимаем алгоритм, описанный в [7]). Третий – предлагаемый нами модифицированный алгоритм двойной локальной оценки, которая

осуществляется не в случайный, а в каждый временной интервал функции $h(t)$. Цель данной работы состояла в сравнении погрешности (трудоемкости) этих трех алгоритмов и определения области оптико-геометрических условий, где их применение предпочтительнее.

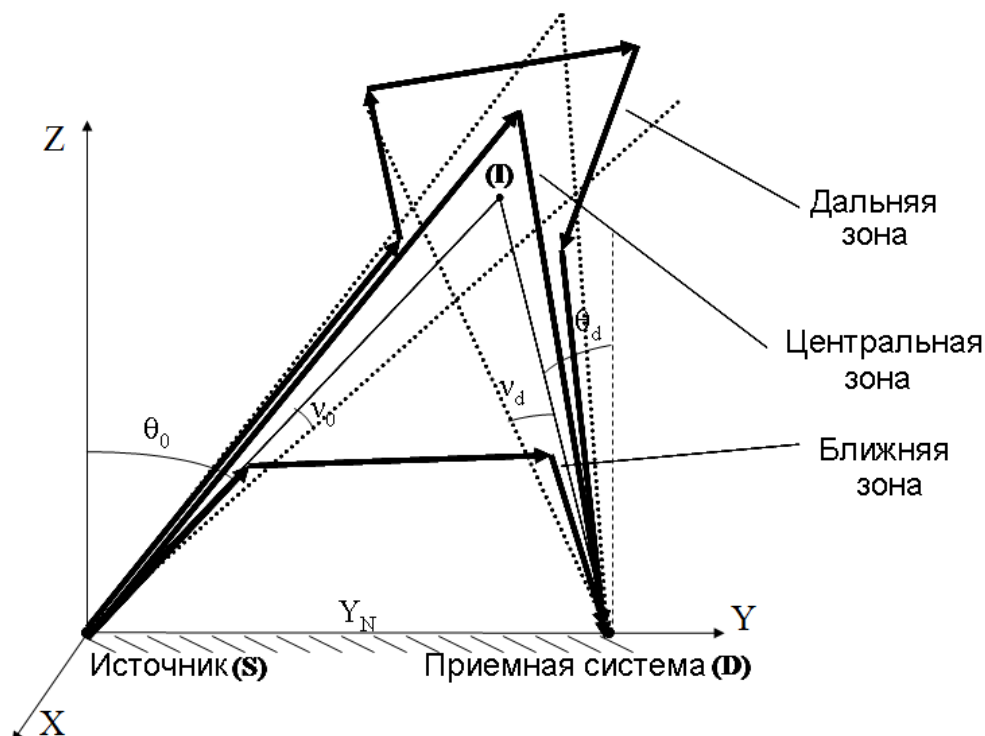


Рис.1 - Геометрическая схема бистатической системы оптической связи.

Алгоритмы расчета ИПХ.

1. Алгоритм локальной оценки (lok)

Этот алгоритм метода Монте-Карло строится на моделировании траекторий движения “фотонов” в среде [7, С. 10]. В каждой точке столкновения M , если точка столкновения лежит в пределах угла поля зрения v_d , в соответствующий временной интервал функции $h(t)$ осуществляется локальная оценка.

2. Классический алгоритм двойной локальной оценки (double)

Этот алгоритм также строится на моделировании траекторий движения “фотонов” в среде [7, С. 10]. Для каждой точки столкновения M в области поля зрения строится 1 фиктивная точка столкновения N и осуществляется двойная локальная оценка в соответствующий временной интервал.

3. Предлагаемый алгоритм модифицированной двойной локальной оценки (new)

В новом алгоритме в отличие от классической двойной локальной оценки предлагается для каждой точки столкновения M строить фиктивные точки столкновения N_j в каждый возможный временной интервал и осуществлять двойные локальные оценки

сразу в несколько временных интервалов, что значительно увеличит эффективность использования каждой траектории “фотонов”.

Тестирование алгоритмов. Сравнение погрешности.

Для тестирования предлагаемого алгоритма были выполнены расчеты многократно рассеянной компоненты ИПХ для однородной молекулярной среды без поглощения с коэффициентом молекулярного рассеяния $\sigma_{s,m}=0.02, 0.1$ 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 $\nu_0=10^\circ$, угол расходимости приемной системы $\nu_d=10^\circ$. При данных коэффициентах рассеяния оптическая длина пути источник-центральная зона -приемник (S-I-D) (рис. 1) $\tau_{SID}=0.0664, 0.332$ и 6.64 . Расчет выполнялся для 5 интервалов в области переднего фронта функции $h(t)$, 5 интервалов в центральной зоне $h(t)$ и 15 интервалов в области заднего фронта импульса $h(t)$. В расчетах ограничились максимальной длиной траектории за вычетом базового расстояния, учитываемой в локальной (либо двойной локальной) оценке $l_{max}=15 \text{ км}$. Число траекторий для каждого алгоритма выбиралось так, чтобы время расчета составляло 1 час (± 5 мин) на ЭВМ с производительностью по тесту Lin-X 30 ГФлопс.

Пример сравнения результатов расчетов для случая $\sigma_{s,m}=0.1$ приведен на рис. 2. На рис. 3 приведены результаты расчета ИПХ для трех оптических моделей, полученных предлагаемым алгоритмом.

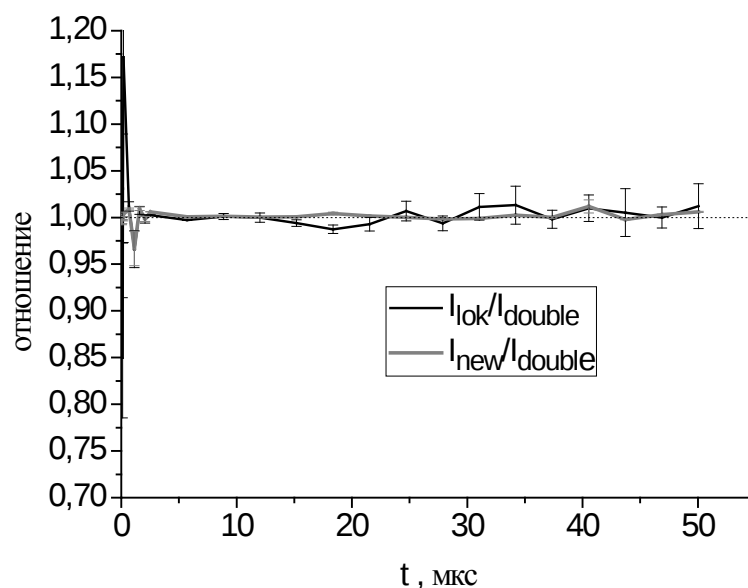


Рис. 2 – Отношение результатов расчетов ИПХ, полученных тремя алгоритмами при $\sigma_{s,m}=0.1$.

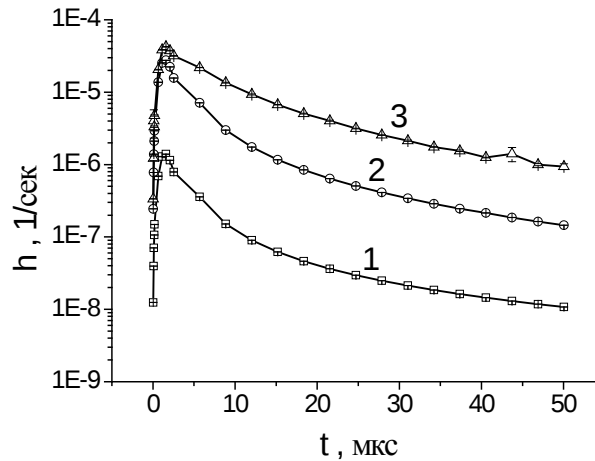


Рис. 3 – Зависимость ИПХ от времени для трех моделей среды, полученные предлагаемым алгоритмом. Кривая 1 – $\sigma_{s,m}=0.02$, 2 – $\sigma_{s,m}=0.1$, 3 – $\sigma_{s,m}=2$.

Сравнение среднеквадратичных отклонений результатов (погрешностей) расчетов различными алгоритмами (приведены в табл. 1) показывает, что погрешность предлагаемого алгоритма при небольшой оптической толщине трассы S-I-D в среднем в 1.6-5.6 раз ниже, чем у алгоритма классической двойной локальной оценки.

Таблица 1 – среднеквадратичные отклонения результатов расчетов многократно рассеянной компоненты $h(t)$ тремя алгоритмами для молекулярной однородной среды. В таблице max – соответствует максимальному значению, а $aver$ – среднему по временным интервалам; $M\xi$ – оценка математического ожидания искомой величины, а $D\xi$ – ее дисперсия

Алгоритм	$(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{max}$	$(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{aver}$	$\frac{(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{max}}{(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{max,new}}$	$\frac{(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{aver}}{(\sqrt{D\xi}/M\xi)_{aver,new}}$
$\sigma_{s,m}=0.02, \tau_{SID}=0.0664$				
Новый	1,20E-02	1,55E-03	1	1
Двойная локальная оценка	5,80E-02	8,77E-03	4,83E+00	5,66E+00
Локальная оценка	9,83E-01	8,63E-02	8,19E+01	5,56E+01
$\sigma_{s,m}=0.1, \tau_{SID}=0.332$				
Новый	8,88E-03	2,16E-03	1	1
Двойная локальная оценка	2,20E-02	3,35E-03	2,48E+00	1,55E+00
Локальная оценка	3,15E-01	3,87E-02	3,55E+01	1,79E+01
$\sigma_{s,m}=2, \tau_{SID}=6.64$				
Новый	4,23E-01	4,37E-02	1	1
Двойная локальная оценка	7,99E-02	1,60E-02	1,89E-01	3,66E-01
Локальная оценка	6,44E-01	7,02E-02	1,52E+00	1,60E+00

Но при высоких оптических толщинах алгоритм двойной локальной оценки дает при одинаковом времени расчета в 2.7 раза меньшую погрешность, чем предлагаемый алгоритм. Это связано с тем, что за одно время предлагаемый алгоритм моделирует при

небольших оптических толщинах в 1-2 раза меньше траекторий, но при больших оптических толщинах в 4 и более раза меньше траекторий, чем классический алгоритм двойной локальной оценки. Сравнение с алгоритмом локальной оценки показывает, что предлагаемый алгоритм дает в 1.6—55.6 раз меньшую погрешность.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №15-01-00783-А, РФФИ 15-07-06811-А, президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5, программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

Литература

1. *J.A. Reagan, J.D. Spinhirne and D.M. Byrne, D.W. Thomson, R.G. de Pena, Y. Mamane Atmospheric Particulate Properties Inferred from Lidar and Solar Radiometer Observations Compared with Simultaneous In Situ Aircraft Measurements: A Case Study // Applied Meteorology. – vol. 16, №9. 1977. – p. 911- 928.*
2. *Шефер О.В.* Оценка характеристик отраженного излучения применительно к моностатическому и бистатическому лазерному зондированию кристаллических облаков, содержащих ориентированные частицы. // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 09. С. 792-803.
3. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троцкий В.О., Шиянов Д.В.* Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 04. С. 261-267
4. *В.В. Белов, М.В. Тарасенков, В.Н. Абрамочкин* Бистатические атмосферные оптико-электронные системы связи (полевые эксперименты) // Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 19. С. 89-95
5. *D. Han, Y. Liu, K. Zhang, P. Luo, M. Zhang* Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system // Opt. Express. 20, 2012. 15833-15842.
6. *D. Han, X. Fan, K. Zhang, R. Zhu* Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication // Applied optics. Vol. 52. No. 22. 2013. pp. 5516-5522.
7. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1976. - 284 с.