

5. Davies R.J. The effect of finite geometry on the three-dimensional transfer of solar irradiance in clouds // *J. Atmos. Sci.* – 1978. – V. 35. – № 31. – P. 1712–1725.
6. Исимару Ф. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – Т. 1. – 280 с.
7. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
8. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1996. – 256 с.
9. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Перенос излучения в пространственно ограниченной дисперсной среде // *Оптика атмосферы и океана.* – 1996. – Т. 9. – № 12. – С. 1620–1624.
10. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных дисперсных средах // *Известия Томского политехнического университета.* – 2000. – Т. 303. – № 3. – С. 91–104.
11. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Исследование влияния размеров и формы рассеивающего объема на радиационные характеристики переноса излучения // *Известия Томского политехнического университета.* – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 12–15.
12. О'Нейл. Введение в статистическую оптику. – М.: Мир, 1966. – 186 с.
13. Амбарцумян В.А. Научные труды. Т. 1. – Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1960. – 430 с.
14. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.

Поступила 14.12.2006 г.

УДК 519.713

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ В СЛОИСТОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОТОК ДИСКРЕТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

И.В. Федотов

Томский политехнический университет
E-mail: tenshi3@mail.ru

Разработан и реализован алгоритм моделирования распространения волны в слоистой случайной среде, содержащей поток дискретных неоднородностей. Исследованы зависимости энергий рассеянного и поглощенного сигнала от параметров, описывающих неоднородную структуру случайной слоистой среды и потока неоднородностей. Проведены численные расчеты углового спектра рассеянного сигнала. Произведен анализ частотного спектра сигнала, прошедшего через поток дискретных неоднородностей.

Введение

Имеется целый ряд физических проблем, требующих точного расчета задач теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния. При решении ряда прикладных задач радиофизики, оптики и акустики представляет интерес моделирование процесса распространения волн в слоистых дискретных средах, включающих поток дискретных неоднородностей. Вопросы распространения электромагнитных волн в случайных неоднородных дискретных средах в приближении многократного рассеяния теоретически наименее разработаны.

В работах [1–3] рассмотрены методы исследования систем уравнений, составленных для решения задачи определения коэффициентов отражения и поглощения для произвольного числа слоёв. В результате получены общие схемы, в виде которых можно представить решения. Однако эти решения имеют чрезвычайно громоздкий вид и, если число слоёв превышает 3, почти бесполезны для анализа влияния того или иного слоя на коэффициент поглощения или коэффициент преломления.

Например, Л.М. Бреховских [3] предлагает исходить из уравнений Максвелла при условии однородной изотропной среды для выявления общих соотношений при исследовании отражения и преломления электромагнитных волн. Он рассматри-

вает решение задачи отражения и прохождения волны для произвольного числа слоёв аналитическим методом. Решение поставленной задачи для двух, трех слоёв является приемлемым, но при увеличении числа слоёв громоздкость формул, а соответственно, и сложность вычислений увеличивается многократно.

Целью данной работы является разработка численной модели процесса многократного взаимодействия сигнала со случайными дискретными неоднородностями слоистой среды и потока.

Список условных обозначений

- N, V – Профили концентрации и скорости потока дискретных неоднородностей;
- \vec{e}_s – единичный изотропный вектор переизлучения дискретных неоднородностей;
- \vec{e}_v – вектор скорости потока дискретных неоднородностей;
- \vec{e}_i – вектор распространения потока дискретных неоднородностей;
- D – длина свободного распространения частицы в неоднородном потоке;
- x – случайное число, равномерно распределённое на интервале от 0 до 1;

- l – средняя длина свободного распространения волны в среде;
- f_0 – несущая частота падающей волны;
- Fi – угол выхода частицы из среды;
- S – количество частиц.

1. Метод решения

В представленной работе задача распространения электромагнитных волн в дискретной случайной слоистой среде решается методом Монте-Карло [4–10]. Создается численная модель распространения волны в слоистой дискретной среде, включающей в себя поток дискретных неоднородностей.

Полагается, что источник сигнала с изотропной диаграммой направленности находится на поверхности слоистой среды, включающей неоднородный поток рассеивателей. Предполагается, что длина падающей волны меньше размеров слоев и характерных размеров потока. Рассеяние происходит некогерентным образом на статистически независимых дискретных неоднородностях. Излучатель электромагнитного сигнала представляется источником частиц с соответствующей диаграммой излучения. Начальные координаты частиц задаются в точке расположения излучателя. Тип взаимодействия волны с дискретными неоднородностями определяется в соответствии с задаваемыми коэффициентами рассеяния и поглощения.

В случае выполнения условия рассеяния направление распространения волны изменяется в соответствии с задаваемой индикатрисой переизлучения дискретных неоднородностей. Решение проблемы распространения волны в случайной дискретной среде сводится к определению функции распределения частиц в координатном пространстве.

Волна, излучаемая источником, моделируется частицами, равномерно распределенными в плоскости волнового фронта и ориентированными вдоль направления распространения сигнала \vec{e}_r . Перемещающимся дискретным неоднородностям ставятся в соответствие статистически независимые рассеиватели.

Профили концентрации N и скорости V дискретных неоднородностей потока показаны на рис. 1, а геометрия задачи – на рис. 2.

При определении длины свободного распространения частицы D в неоднородном потоке используется соотношение [4]:

$$D = -l \cdot \ln x. \tag{1}$$

Предполагается, что волна распространяется вдоль оси X (рис. 2). Тип взаимодействия волны со средой определяется в соответствии с сечениями поглощения и рассеяния. В случае выполнения условия рассеяния волны, направление распространения частицы изменяется в соответствии с задаваемой индикатрисой переизлучения. Индикатриса представляет собой векторную диаграмму рассеяния [3]. Все вычисления производятся в безразмерных величинах.

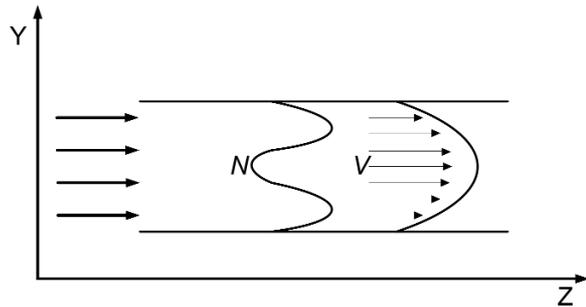


Рис. 1. Профили скорости и концентрации дискретных неоднородностей

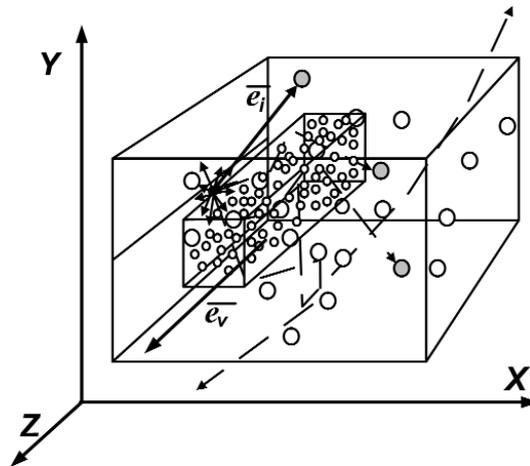


Рис. 2. Геометрия задачи, \vec{e}_r – вектор распространения и \vec{e}_v – вектор скорости потока дискретных неоднородностей

Скорость потока дискретных неоднородностей определяется формулой

$$V(X) = V_0 \exp(-\mu_v(X - X_0)^2), \tag{2}$$

V_0 – скорость потока дискретных неоднородностей вдоль оси Z , X_0 – заданное значение координаты X .

Профиль концентрации потока определяется выражением

$$N(X) = N_0 \exp(-\mu_c \rho), \tag{3}$$

где: N_0 – концентрация турбулентного потока вдоль оси потока,

$$\begin{aligned} \rho &= (X - X_1)^2; & 0 \leq X_1 \leq X_m / 2; \\ \rho &= (X - X_2)^2; & X_m / 2 \leq X_2 \leq X_m, \end{aligned} \tag{4}$$

где X_m – размер потока по оси X .

Длина свободного пробега частицы в потоке определяется как

$$\lambda(Z) = D / N(Z). \tag{5}$$

Для задания частотного спектра падающей волны применяется функция [5]

$$f_0 = \mathcal{G} \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cos(2\pi x_2) + A, \tag{6}$$

где x_1, x_2 – случайные числа, равномерно распределенные на интервале от 0 до 1, A – определяет положение середины спектра, \mathcal{G} – ширина частотного спектра.

Вследствие перемещения дискретных неоднородностей в потоке происходит доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала [7, 9]

$$f^* = (\vec{e}_s - \vec{e}_i)\vec{e}_i \varphi(V) + f_0, \quad (7)$$

где $\varphi(V)$ – функция, характеризующая неоднородность профиля скорости потока.

Для моделирования единичного изотропного вектора переизлучения используется следующий алгоритм [6]:

$$\begin{aligned} y_1 &= 1 - 2x_1, \\ y_2 &= \gamma_2 U, \\ y_3 &= \gamma_3 U, \\ \gamma_2 &= 1 - 2x_2, \\ \gamma_3 &= 1 - 2x_3, \\ U &= \sqrt{(1 - \gamma_1)^2 / \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \end{aligned} \quad (8)$$

при

$$\gamma_2^2 + \gamma_3^2 \leq 1. \quad (9)$$

Единичный вектор скорости потока определяет направление движения дискретных неоднородностей, по условию задачи он направлен вдоль оси Z .

Координаты рассеивателя r , с которой происходит взаимодействие волны, определяются из соотношения [7]:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + D \cdot \vec{e}_i. \quad (10)$$

При моделировании случайных траекторий распространения частиц в неоднородной среде осуществляется накопление в ячейках результирующего массива количества поглощенной и рассеянной энергии в среде [7, 9]. Проводится вычисление и накопление доплеровского сдвига частоты, приобретенного волной в результате многократного взаимодействия с дискретными неоднородностями. В случае выхода частицы за пределы среды в ПЭВМ происходит запоминание направления ее распространения.

2. Распространение электромагнитной волны в слоистой среде, содержащей поток дискретных неоднородностей

Рассмотрим вначале результаты сравнительных расчетов, проведенных с использованием описанного выше алгоритма и с помощью алгоритма описанного в статье [11] и пакета MCNP. Для сравнения использовалась геометрия и условия задачи из работы [11]. В расчетах использовался монохроматический источник рентгеновского излучения с энергией фотонов 100 кэВ, железная пластина $5 \times 5 \times 1$ см. Результаты расчетов как прямого, так и рассеянного излучений, приведенные на рис. 3, 4 совпадают в рамках статистической погрешности расчетов.

На указанных рисунках приведены графики относительной интенсивности регистрируемого излучения от координаты вдоль центрального среза изображения пластины на детекторной плоскости.

Сплошной линией изображены результаты, полученные с использованием методики [11], треугольниками – MCNP, а квадратами – рассматриваемым алгоритмом. Следует отметить, что рассматриваемый в данной статье алгоритм запоминает распределение зависимости рассеянного и поглощенного сигнала по всему объему моделируемой среды, а не только в плоскости детекторной пластины.

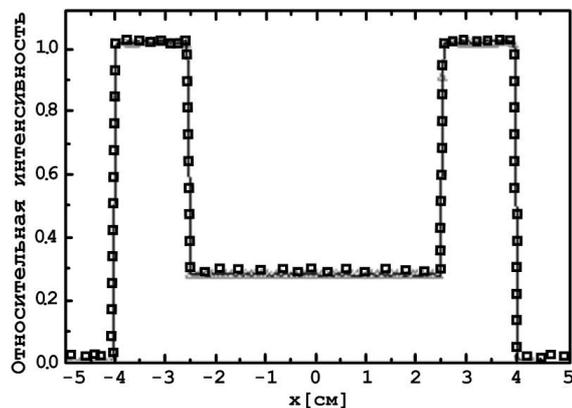


Рис. 3. Результаты расчетов прямого излучения

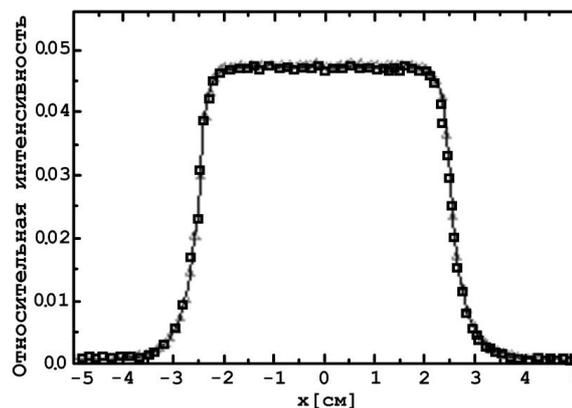


Рис. 4. Результаты расчетов рассеянного излучения

Таким образом, сопоставление результатов проведенных расчетов с данными, полученными другими методами [11], показало корректную работу предлагаемого алгоритма. Теперь перейдем к решению основной задачи.

Предполагается, что взаимодействие частиц с потоком дискретных неоднородностей происходит в соответствии с изотропной индикатрисой рассеяния. Все результаты представлены в относительных единицах и нормированы на максимум для каждого рисунка. Среда характеризуется присутствием плоскопараллельных слоев и потока в форме параллелепипеда.

В первом эксперименте рассмотрен источник электромагнитного сигнала с изотропной индикатрисой излучения, расположенный на поверхности среды с координатами $X=0, Y=50, Z=50$. Начальные данные, описывающие среднюю длину свободного распространения и коэффициент поглощения волны в среде, представлены на рис. 5 и 6. На рис. 7, 8 показаны профили скорости и концентрации дискретных неоднородностей в потоке.

Частотный спектр падающего сигнала представлен на рис. 9. Как видно из рисунка, частотный спектр имеет форму гауссоиды с максимальным значением по частоте 7,4 и минимальным $-2,57$. Частотная характеристика вышедшего сигнала из потока представлена на рис. 10.

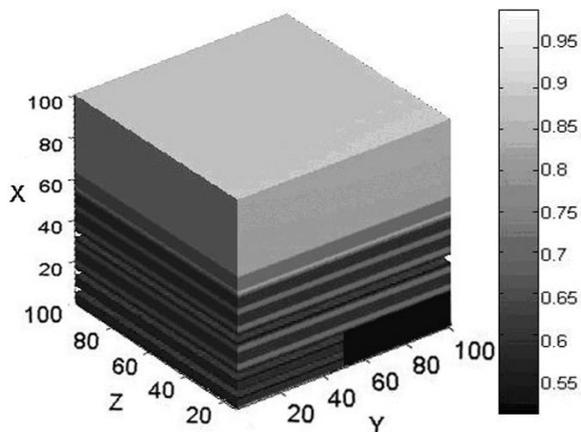


Рис. 5. Коэффициент поглощения волны в среде

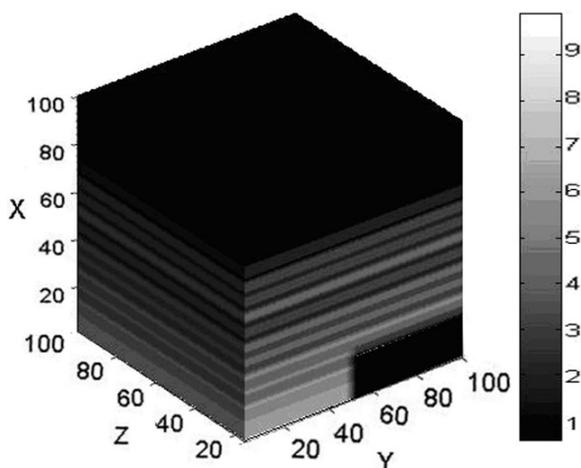


Рис. 6. Средняя длина свободного распространения волны в среде

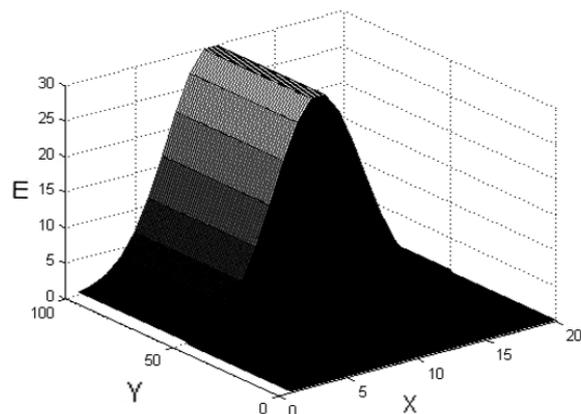


Рис. 7. Профиль скорости дискретных неоднородностей в потоке

На рис. 11, 12 представлены результаты расчета энергии поглощенного сигнала и энергии сигнала, рассеянного в среде, соответственно.

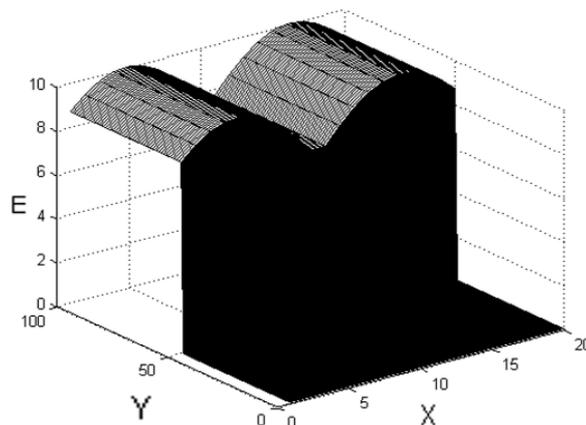


Рис. 8. Профиль концентрации дискретных неоднородностей в потоке

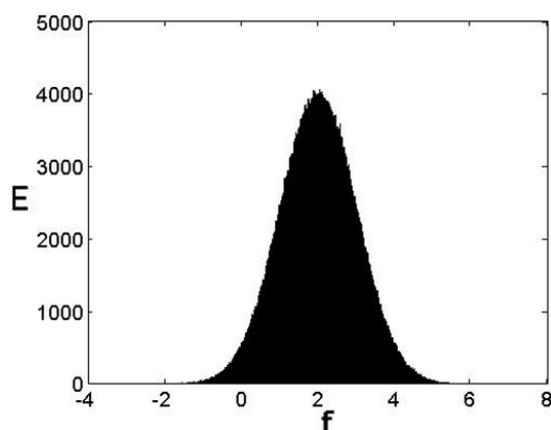


Рис. 9. Спектр падающего сигнала

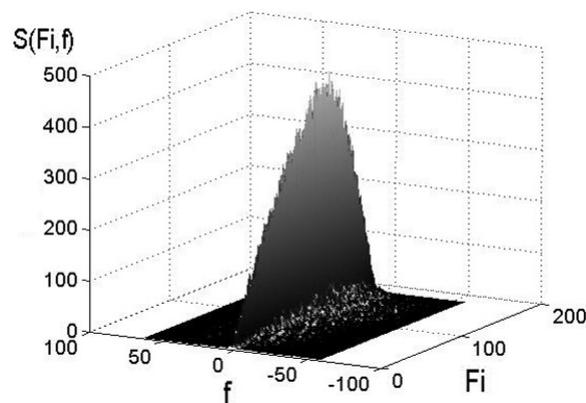


Рис. 10. Частотный и угловой спектр сигнала, вышедшего из потока

В следующем эксперименте изменены координаты расположения излучателя на $X=10$, $Y=80$, $Z=50$. Остальные входные параметры модели оставлены без изменения и соответствуют входным параметрам предыдущего эксперимента (рис. 5–9). Таким образом, источник излучения перемещен внутрь потока. Это необходимо для проверки корректности работы алгоритма с потоком. Поместив источник излучения в поток, мы избавляемся от частиц с малым количеством взаимодействий в потоке, которые имеют очень малый сдвиг частоты.

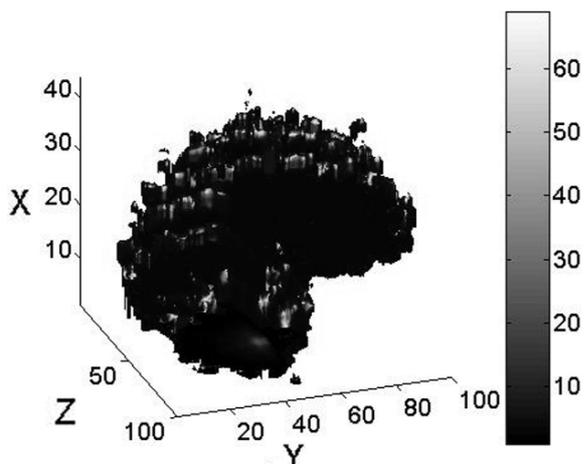


Рис. 11. Распределение энергии поглощенного сигнала в среде

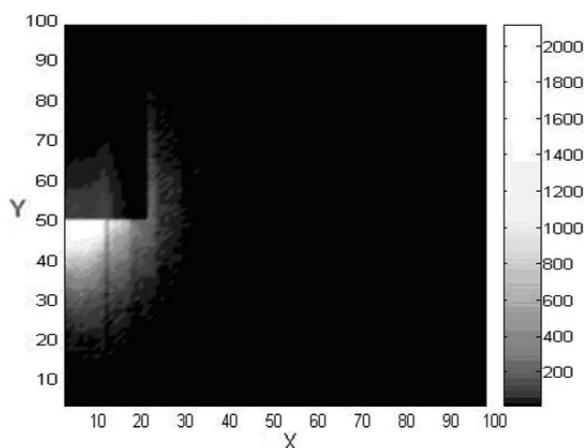


Рис. 12. Распределение энергии рассеянного сигнала в среде

На рис. 13 показан частотный и угловой спектр сигнала, вышедшего из потока. Рис. 14 демонстрирует распределение энергии рассеянного сигнала в среде.

3. Анализ результатов численного моделирования

Отсутствие поглощенного сигнала в потоке, рис. 11, можно объяснить тем, что в потоке очень низкий коэффициент поглощения по сравнению со средой, в чем можно убедиться, взглянув на рис. 5. Но на результат (рис. 11) существенно влияет длина свободного пробега частицы в среде. Длина свободного пробега в потоке мала (по сравнению со средой, рис. 6), благодаря чему частицы практически не проникают внутрь потока, а взаимодействуют только на поверхности потока. На этом рисунке так же видны слои, поскольку они имеют сравнительно большой коэффициент поглощения. На рис. 11 и 12 отчетливо наблюдается попадание частиц в область тени объекта. Такой результат объясняется тем, что лучи в среде распространяются хаотически и соответственно могут равновероятно переизлучаться в любом направлении, в том числе и в область тени.

Обратив внимание на частотные характеристики вышедшего из потока сигнала (рис. 10), видно, что форма частотного спектра сохраняется. Но при этом

максимальное значение частоты – 62,9, а минимальное – 58,6. Такое изменение ширины спектра объясняется значительной скоростью потока (рис. 7) и высокой концентрацией рассеивателей в потоке (рис. 8). Так же можно наблюдать, что максимум энергии практически не сместился по частоте. Это объясняется тем, что большинство частиц, взаимодействовавших с потоком, претерпели лишь однократное или двукратное рассеяние и накопили незначительный сдвиг частоты. Поскольку источник находится на границе потока и среды, то лишь некоторые частицы с большой энергией проникают в поток и взаимодействуют в нем, а остальные если и взаимодействуют с потоком, то только на его поверхности.

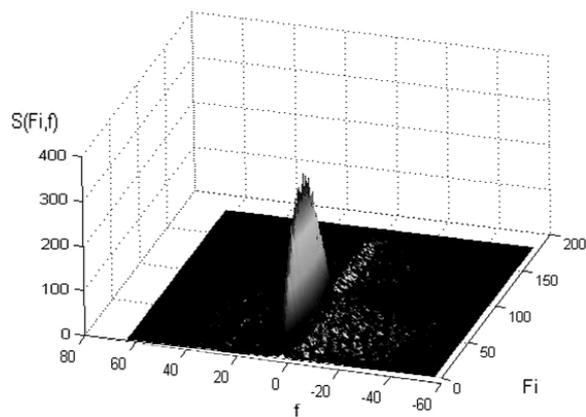


Рис. 13. Частотный и угловой спектр сигнала, вышедшего из потока

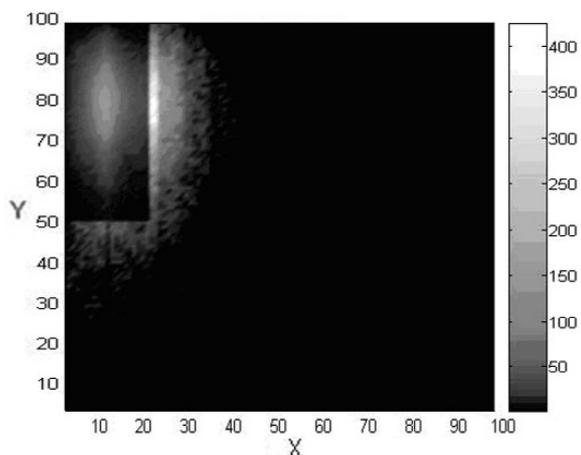


Рис. 14. Распределение энергии рассеянного сигнала в среде

Переместив источник внутрь потока во втором эксперименте, предполагалось получить спектр со значительно более широким диапазоном частот и меньшим влиянием частиц с малым количеством взаимодействий, по сравнению с предыдущим экспериментом. На рис. 13 представлен полученный в результате моделирования частотный и угловой спектр сигнала, вышедшего из потока. Анализ полученного результата показывает значительное уменьшение влияния частиц с малым количеством взаимодействий на частотный спектр сигнала, вышедшего из потока. Профиль концентрации потока представлен на рис. 1. В соответствии с этим в

моделируемом потоке профиль концентрации дискретных неоднородностей не равномерен, рис 8. Распределение энергии, наблюдаемое на рис. 14, объясняется неоднородной концентрацией дискретных неоднородностей в потоке, рис. 8. Такой результат обусловлен меньшей концентрацией дискретных неоднородностей внутри потока по сравнению с концентрацией при приближении к краям потока. Анализ результатов работы программы на основе разработанного алгоритма позволяет сделать вывод о ее корректной работе.

Заключение

Разработан алгоритм моделирования многократного взаимодействия электромагнитной волны со случайной трехмерной дискретной средой, включающей поток дискретных неоднородностей. Прове-

дена апробация разработанного алгоритма для задачи рассеяния рентгеновского излучения, а так же выполнено сопоставление результатов проведенных расчетов с данными полученными другими методами. Решена задача по трехмерной визуализации входных и выходных параметров модели. Произведен анализ частотного спектра сигнала, прошедшего через поток. Проверена корректность работы алгоритма при моделировании распространения электромагнитного сигнала в потоке. Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют отражение электромагнитного сигнала от объекта. В одном из проведенных экспериментов отчетливо наблюдалось попадание частиц в область тени объекта. В дальнейшем предполагается усовершенствование алгоритма с целью сокращения времени расчетов и осуществления сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апресян Л.А., Кравцов Ю.А. Теория переноса излучения. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайных неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – Т. 1. – 280 с., Т. 2. – 317 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 505 с.
4. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971. – 327 с.
5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. – М.: Наука, 1976. – 319 с.
6. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
7. Спицын В.Г. Моделирование рассеяния радиоволн на возмущениях ионосферной плазмы, создаваемых космическим аппаратом. – М.: Физматлит, 2003. – 176 с.
8. Spitsyn V.G., Fedotov I.V., Tsoy Y.R. Stochastic model of electromagnetic wave propagation in stratified absorbing media inclusive a semitransparent objects // National Radio Science Meeting. – Boulder, Colorado, USA, 2004. – P. 23.
9. Федотов И.В., Спицын В.Г. Моделирование распространения электромагнитной сигнала в случайной трехмерной дискретной среде // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: Труды Всеросс. научной конф. – М., 2004. – С. 433–439.
10. Spitsyn V.G., Fedotov I.V. Modeling of Electromagnetic Wave Propagation in Stratified Discrete Media Including the Inhomogeneous Flow of Scatterers // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – Albuquerque, New Mexico, USA, 2006. – P. 1369–1372.
11. Жуковский М.Е., Подоляко С.В., Йениш Г.-Р., Беллон К. Численное моделирование процессов рассеяния рентгеновского излучения при радиографическом контроле материалов // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 43–57.

Поступила 17.01.2006 г.