

Б.В. Горячев, М.В. Кабанов, С.Б. Могильницкий, Б.А. Савельев

ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Исследовано поведение отношения сигнал-шум δ в зависимости от оптических размеров среды и вероятности выживания кванта, влияния подстилающей поверхности и внешних источников при прохождении излучения через многослойную среду.

При решении многих прикладных задач, связанных с видением в рассеивающих средах, возникает необходимость оценки предельной дальности видимости в зависимости от оптических характеристик среды и геометрии эксперимента. Получение таких оценок должно базироваться на концепции оптимального обнаружения [1, 2] и ее конкретной реализации в виде инженерных методик расчета, приводящих к конечным формулам, удобным для анализа. Теоретическое описание этой задачи основывается на решении уравнения переноса излучения, получаемого для неограниченных в поперечном направлении (относительно распространения излучения) сред. Количественные данные для расчета конкретных ситуаций в ограниченных средах получают с помощью численных методов, что затрудняет проведение полного анализа проблемы. Решение задачи существенно усложняется при описании распространения излучения в слоисто-неоднородных, или стратифицированных рассеивающих средах. Необходимость получения такого решения определяется тем, что природные среды обладают ярко выраженной неоднородной, в частности слоистой, структурой, простейшим вариантом которой является двуслойная среда, изученная нами ранее [3, 4]. В данной статье рассматривается модель трехслойной рассеивающей среды конечного объема и исследуется зависимость отношения сигнал-шум от оптических и геометрических параметров среды.

Рассмотрим рассеивающую среду, состоящую из трех слоев, каждый из которых имеет форму прямоугольного параллелепипеда с произвольными оптическими длинами ребер τ_x , τ_y , τ_z . Направление распространения излучения совпадает с осью x . Рассеивающая среда характеризуется также вероятностью выживания кванта Λ и нормированной индикатрисой рассеяния излучения с коэффициентом асимметрии $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$, где η , β , μ – интегральные параметры индикатрисы рассеяния в шестипотоковом представлении [6].

В практической деятельности наиболее распространенным способом определения отношения сигнал-шум (δ) является сопоставление энергетических характеристик исследуемого объекта и фона. Отношение сигнал-шум определим аналогично [2, 5].

Формулу для расчета отношения сигнал-шум можно получить с использованием рекуррентных соотношений [4].

$$\delta = \frac{\exp(-\tau_x) \{ [1 - r_1(\tau, \Lambda, a) r_2(\tau, \Lambda, a)] [1 - r_2(\tau, \Lambda, a) r_3(\tau, \Lambda, a)] - t_2^2(\tau, \Lambda, a) r_1(\tau, \Lambda, a) r_3(\tau, \Lambda, a) \}}{t_1(\tau, \Lambda, a) t_2(\tau, \Lambda, a) t_3(\tau, \Lambda, a) - \exp(\tau_x) \{ [1 - r_1(\tau, \Lambda, a) r_2(\tau, \Lambda, a)] [1 - r_2(\tau, \Lambda, a) r_3(\tau, \Lambda, a)] - t_2^2(\tau, \Lambda, a) r_2(\tau, \Lambda, a) r_3(\tau, \Lambda, a) \}}$$

где τ_x – общая оптическая глубина среды; $t_1(\tau, \Lambda, a)$, $t_2(\tau, \Lambda, a)$, $t_3(\tau, \Lambda, a)$, $r_1(\tau, \Lambda, a)$, $r_2(\tau, \Lambda, a)$, $r_3(\tau, \Lambda, a)$ – коэффициенты пропускания и отражения 1-, 2- и 3-го слоев рассеивающей среды. Данные коэффициенты могут быть определены любым из методов, учитывающих пространственную ограниченность среды, например, [7–9].

Формула позволяет исследовать влияние оптических размеров, вероятности выживания кванта, индикатрисы рассеяния излучения и порядка чередования слоев на величину δ . Диапазон изменения параметров среды, использованных в работе, следующий: оптическая глубина каждого из слоев $1 \div 10$; индикатриса рассеяния – от сферической ($a = 1$) до облачной С1 ($a = 12$); $\Lambda = 0,5 \div 1$. Кроме того, исследовалось влияние ограничивающих среду отражающих поверхностей, фоновой подсветки и апертуры приемной системы.

Для лучшей сопоставимости результатов будем рассматривать поведение δ , нормированного на значение отношения сигнал-шум при оптической глубине среды $\tau_x = 3$ ($\tau_{xi} = 1$).

Исследуем поведение величины отношения сигнал-шум в зависимости от оптических размеров среды, вероятности выживания кванта, степени анизотропии индикатрисы рассеяния и слоистости рассеивающей среды. Зависимость величины отношения сигнал-шум от оптических размеров среды представлена как функция δ от оптической глубины одного из слоев слоисто-неоднородной среды (рис. 1, 2).

Из полученных данных следует, что с увеличением оптической глубины среды, как и в случае однородной среды, происходит уменьшение δ . Справедливость сделанного вывода не зависит от номера слоя, оптические размеры которого увеличиваются, причем если один и тот же слой помещен первым или последним, получаются одинаковые значения δ (при прочих равных условиях).

Влияние слоистой структуры среды иллюстрируют рис. 1, 2, из которых следует, что при сохранении равной общей оптической глубины среды, меняя характеристики одного из слоев, получаем различие в значениях δ (при исследованных параметрах), достигающее порядка.

Из данных, приведенных на этих же рисунках, видно, что индикатриса рассеяния влияет на величину отношения сигнал-шум гораздо меньше, чем другие факторы, т.к. чередование слоев с различными индикатрисами изменяет δ всего в 1,5–2 раза (рис. 1).

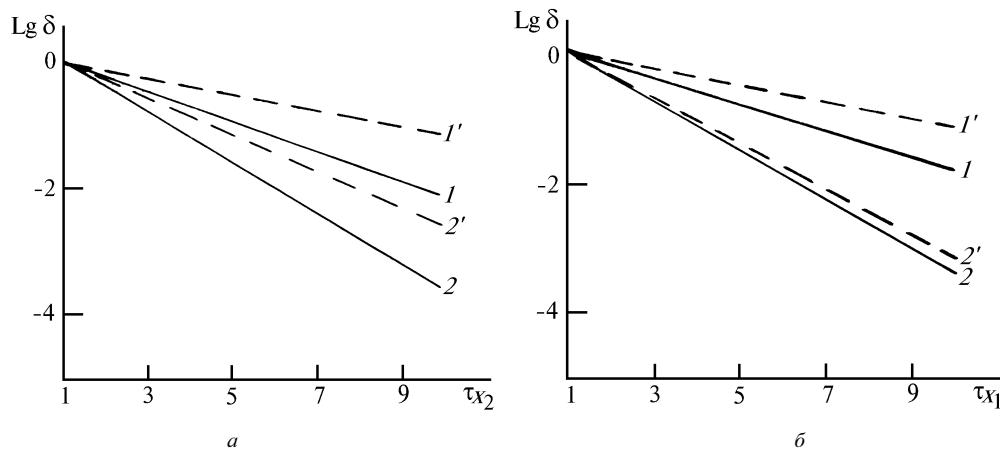


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал-шум от оптической глубины среды при $\tau_{y,z} = 5$; а – прямые 1, 1' – $a_2=1$; $a_1=a_3=12$; 2, 2' – $a_2=12$; $a_1=a_3=1$; 1, 2 – $\Lambda=1$; 1', 2' – $\Lambda=0,8$; $\tau_{x_1}=\tau_{x_3}=1$; б – 1, 1' – $a_2=12$; $a_1=a_3=1$; 2, 2' – $a_2=1$; $a_1=a_3=12$; 1, 2 – $\Lambda=1$; 1', 2' – $\Lambda=0,8$; $\tau_{x_2}=\tau_{x_3}=1$

Наиболее существенное влияние на величину δ оказывает наличие поглощения в среде (рис. 2, 3). Увеличение наличия поглощения в среде приводит к увеличению δ (например, рис. 3) и не зависит от слоистой структуры среды. Физическая интерпретация данного явления хорошо понятна: при увеличении поглощения в среде интенсивность поля многократно рассеянного света уменьшается и вследствие этого происходит увеличение δ , причем этот процесс не зависит от положения поглощающего слоя в среде.

Проанализируем поведение отношения сигнал-шум в зависимости от оптических размеров слоисто-неоднородной среды, коэффициента отражения поверхностей, величины интенсивности внешних источников излучения и апертуры приемника. Интенсивность внешних источников в расчетах изменялась на три порядка от $0,1 I_0$ до $100 I_0$. Здесь I_0 – интенсивность опорного сигнала. Среда характеризовалась следующими параметрами:

- 1-й слой: $\tau_{x_1} = 1$, $\tau_{y_1} = \tau_{z_1} = 5$, $a_1 = 1$, $\Lambda_1 = 1$;
- 2-й слой: $\tau_{x_2} = 1$, $\tau_{y_2} = \tau_{z_2} = 5$, $a_2 = 12$, $\Lambda_2 = 1$;
- 3-й слой: $\tau_{x_3} = 1 \div 10$, $\tau_{y_3} = \tau_{z_3} = 5$, $a_3 = 1$, $\Lambda_3 = 1$.

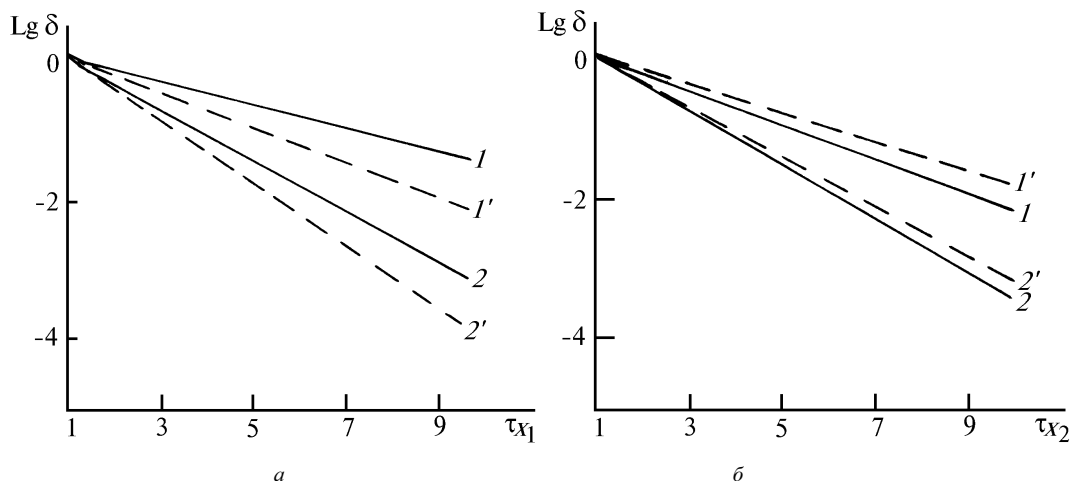


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал-шум от оптической глубины среды при $\tau_y, z=5$; *a* – прямые 1, 1' – $a_{1-3}=1$; $\tau_{x_2}=\tau_{x_3}=1$; 2, 2' – $a_{1-3}=12$; $\tau_{x_2}=\tau_{x_3}=1$; 1, 2 – $\Lambda_{1,3}=0,8$; $\Lambda_2=1$; 1', 2' – $\Lambda_{1,3}=1$; $\Lambda_2=0,8$; *b* – 1, 1' – $a_{1-3}=1$; $\tau_{x_1}=\tau_{x_3}=1$; 2, 2' – $a_{1-3}=12$; $\tau_{x_1}=\tau_{x_3}=1$; 1, 2 – $\Lambda_{1,3}=0,8$; $\Lambda_2=1$; 1', 2' – $\Lambda_{1,3}=1$; $\Lambda_2=0,8$

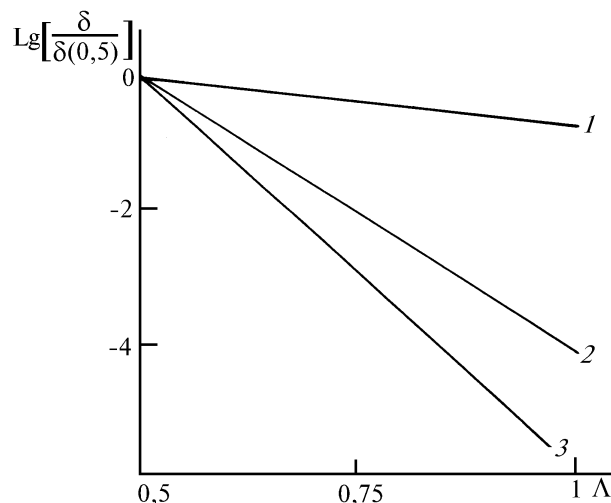


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум от вероятности выживания кванта: $\tau_{y,z}=5$; $\tau_{x_2}=\tau_{x_3}=1$; $a_{1,3}=1$; $a_2=12$. Прямая 1 – $\tau_{x_1}=1$; 2 – $\tau_{x_1}=5$; 3 – $\tau_{x_1}=10$

Результаты расчетов показывают, что величина δ уменьшается при увеличении оптической толщины любого из слоев. Увеличение интенсивности внешних источников также приводит к уменьшению δ .

Кроме того, при достаточно большой толщине одного из слоев, а следовательно, и всей среды влияние внешних источников становится незначительным. Данный вывод справедлив при нормальном, относительно направления опорного сигнала, освещении внешними источниками.

Анализ зависимости величины δ от коэффициента отражения боковых поверхностей, ограничивающих рассеивающую среду, показывает, что увеличение этого коэффициента аналогично по своему действию увеличению поперечных оптических размеров среды и, соответственно, приводит к уменьшению δ .

Уменьшение апертуры приемника приводит к резкому увеличению нормированного отношения сигнал-шум, что объясняется падением доли многократного рассеянного света, попадающего в приемник. Этот вывод справедлив, если мы не учитываем ограничений с точки зрения чувствительности аппаратуры. Следует добавить, что все выводы сделаны для случая

инструментальной регистрации излучения. При визуальном наблюдении необходимо учитывать физиологические особенности зрения.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы.

К уменьшению величины сигнал-шум приводят увеличение оптических размеров среды, коэффициентов отражения ограничивающих среду поверхностей, интенсивности внешних источников и увеличение апертуры приемника.

Улучшение отношения сигнал-шум наступает при увеличении поглощения в среде (аналогично явлению улучшения качества фотографии при чернении фотоматериалов), уменьшении степени слоистости среды, уменьшении анизотропии индикатрисы рассеяния излучения.

Таким образом, совместное действие всех факторов является многопараметрической задачей, требующей для своего решения создания специального алгоритма.

1. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов.радио, 1977. 368 с.
2. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 328 с.
3. Горячев Б.В., Ларионов В.В., Могильницкий С.В., Савельев Б.А. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 63. Вып. 4. С. 944–945.
4. Горячев Б.В., Кабанов М.В., Могильницкий С.В., Савельев Б.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №11. С. 1421–1425.
5. Горячев Б.В., Кабанов М.В., Могильницкий С.В., Савельев Б.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №11. С. 1416–1420.
6. Chu S.M., Churchill S.W. // J.Phys.Chem. 1955. V. 59. P. 855–863.
7. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике // Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
8. Davies R. // J.Atmos.Sci. 1978. V. 35 P. 1712–1725.
9. Горячев Б.В., Кабанов М.В., Могильницкий С.В., Савельев Б.А. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. №8. С. 819–822.

Томский политехнический университет,
Конструкторско-технологический институт, г.Томск

Поступила в редакцию
15 июля 1994 г.

B.V. Goryachev, M.V. Kabanov, S.B. Mogilnitskii, B.A. Savelyev. Radiation Transfer in a Stratified Scattering Medium.

A behaviour of the signal/noise (S/N) ratio (δ) is investigated vs a medium optical dimensions and probability of a quantum survival as well as influence of an underlying surface and outside sources when radiation passing through a multilayer medium.