

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

## **РАСЧЕТ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

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

Показано, что наличие поглощения в среде влияет на отношение сигнал-шум, улучшая его на порядки. Проанализировано также влияние слоистой структуры на зависимость  $S/N$  от оптических размеров рассеивающего объема.

Важной задачей оптики атмосферы и океана является исследование формирования светового поля слоисто-неоднородных сред. Методы решения данной задачи широко обсуждаются в литературе [1]. Использование энергетического баланса и соответственно энергетических характеристик, как наиболее целесообразного метода, встречает ряд трудностей. Одной из них является сложность непосредственного решения уравнения переноса, так как требует введения ряда предположений, корректность которых трудно оценить [2]. Однако сочетание точного решения с методом многократных отражений [3] позволяет количественно оценить баланс излучения, а следовательно, соответствующим образом спланировать экспериментальные исследования.

Возникает необходимость определить и измерить не только общее пропускание и отражение, но и выявить закономерности для доли излучения, вышедшего через боковые поверхности дисперсной среды. При переносе светового излучения через слоисто-неоднородную среду, состоящую из  $n$  слоев, общее пропускание и отражение не зависят от перестановки слоев только в частном случае, т.е. когда среда неограничена. Когда речь идет об ограниченных средах, то общее пропускание, отражение и выход излучения вбок становятся функциями чередования слоев и существенно зависят от поперечных размеров среды. Следовательно, при решении практических задач, связанных с поисками слоистых сред с оптимальными параметрами, число экспериментов становится значительным.

Поэтому разработке теории переноса излучения в неоднородных средах посвящено достаточно много работ [4,5]. Использование общих принципов инвариантности и симметрии позволило получить ряд аналитических решений задачи переноса излучения в неоднородных средах. Сложность получаемых аналитических решений обусловила широкое использование численных методов расчета поля излучения в таких средах [4].

Расчет энергетических характеристик излучения, распространяющегося в слоисто-неоднородной среде, на основе непосредственного решения уравнения переноса излучения достаточно сложен и требует введения ряда предположений, корректность которых не всегда просто оценить.

В связи с этим была предпринята попытка описать процесс распространения излучения в слоисто-неоднородных средах на основе метода многократных отражений с использованием параметризации индикатрисы рассеяния и модели неоднородной среды, состоящей из однородных слоев.

Несмотря на искусственную модель среды, несомненным преимуществом данного метода является возможность получения в замкнутой форме решения задачи переноса излучения для любого вида индикатрис рассеяния с учетом пространственной ограниченности среды. Данное преимущество дает возможность полного анализа закономерностей переноса излучения в слоисто-неоднородных средах в широком диапазоне изменения оптических размеров и параметров среды.

Основными параметрами, определяющими решение задачи переноса излучения в слоисто-неоднородной среде, являются: оптические размеры среды  $\tau_{x_i}$ ,  $\tau_{y_i}$ ,  $\tau_{z_i}$ ; коэффициент ослабления  $i$ -го слоя  $\alpha_i = \sigma_i + \kappa_i$ ; вероятность выживания кванта  $\Lambda_i$ ; параметризованная индикатриса рассеяния  $\eta_i + \beta_i + 4\mu_i = 1$ .

При такой параметризации задачи решение находится посредством взаимодействия слоев с использованием метода многократных отражений. В простом аналитическом виде коэффициенты пропускания и отражения можно записать только в случае неограниченной в плоскости нормальной направлению распространения среды, состоящей из слоев с консервативным рассеянием

$$t_n = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}} ; \quad (1)$$

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}}{1 + \sum_{i=1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}} , \quad (2)$$

где  $t_n$  – коэффициент пропускания, а  $r_n$  – коэффициент отражения излучения средой, состоящей из  $n$  слоев;  $\tau_{x_i}$  – оптическая глубина  $i$ -го слоя.

Распределение излучения в среде для текущей координаты  $\tau_{x_i}$ , расположенной на границе слоев  $i$  и  $i + 1$ , определяется следующим образом:

$$I_1(\tau_x) = I_0 \frac{1 + \sum_{i=j+1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}}{1 + \sum_{i=1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}} ; \quad (3)$$

$$I_2(\tau_x) = I_0 \frac{\sum_{i=j+1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}}{1 + \sum_{i=1}^n (\beta_i + 2 \mu_i) \tau_{x_i}} . \quad (4)$$

Из анализа полученных выражений следует, что величина коэффициентов пропускания и отражения излучения неограниченной консервативной рассеивающей средой не зависит от порядка чередования слоев, в то время как распределение излучения в среде меняется при изменении этого порядка и может иметь  $n!$  значений.

В случае пространственно ограниченной слоисто-неоднородной среды описание процесса переноса излучения существенно усложняется и решение не удастся получить в аналитическом виде. Ключом к решению задачи переноса излучения в слоисто-неоднородной среде является решение задачи переноса в однородном пространственно ограниченном слое, зная которое, можно найти решение для неоднородной среды. Решение записывается в виде рекуррентных соотношений, полученных при расчете взаимодействия однородных слоев. Коэффициенты пропускания, отражения, поглощения и выхода излучения через боковую поверхность имеют вид

$$t_n = t_1 t_{n-1} / (1 - r_1 r_{n-1}) ; \quad (5)$$

$$r_n = r_1 + [t_1^2 r_{n-1} / (1 - r_1 r_{n-1})] ; \quad (6)$$

$$S_n^* = S_1^* + \{ [t_1 (r_n S_1^* + S_{n-1}^*)] / (1 - r_1 r_{n-1}) \} , \quad (7)$$

где  $t_n$  – коэффициент пропускания излучения  $n$  слоями;  $r_n$  – коэффициент отражения;  $S_n^*$  – сумма коэффициентов поглощения и выхода излучения через боковую поверхность;  $t_1, r_1, S_1^*, t_{n-1}, r_{n-1}, S_{n-1}^*$  – коэффициенты пропускания, отражения, поглощения и выхода излучения через боковую поверхность первого и  $n - 1$  слоев соответственно.

Исследуем поведение отношения  $S/N$  в зависимости от оптических размеров среды, вероятности выживания кванта, влияния подстилающей поверхности и внешних источников при

прохождении излучения через среду, состоящую из 2-х однородных слоев. Слои выбираются с равной оптической толщиной  $\tau_x/2$ .

На рис. 1 приведены зависимости величины  $S/N$  от поперечных оптических размеров среды ( $\tau_y = \tau_z$ ) для различных значений вероятности выживания кванта  $\Lambda$ . На данном рисунке кривые 1 и 3 соответствуют однородным средам с индикатрисами рассеяния, характеризуемыми параметром вытянутости  $a$ , равным 1 и 12,09 соответственно; кривые 2 – слоистая среда, состоящая из двух слоев с теми же индикатрисами рассеяния. Из рисунка видно, что при увеличении поперечных размеров отношение  $S/N$  уменьшается и наличие слоистой структуры при числе слоев  $n = 2$  не меняет характера этой зависимости; наличие 2-х слоев с различными индикатрисами рассеяния аналогично однородной среде с некоторой усредненной индикатрисой рассеяния. Данный факт объясняется тем, что пропускание среды, состоящей из 2-х различных слоев, не зависит от порядка чередования их.

На рис. 2 приведена зависимость  $S/N$  от вероятности выживания кванта  $\Lambda$ . Кривые 1, 3 соответствуют однородным средам, характеризуемым значениями  $a = 1$  и 12,09, кривая 2 – двухслойная среда. Из рисунка видно, что наличие поглощения в среде влияет на отношение  $S/N$ , улучшая его на порядки, что объясняется уменьшением интенсивности многократно рассеянного света при увеличении поглощения в среде.

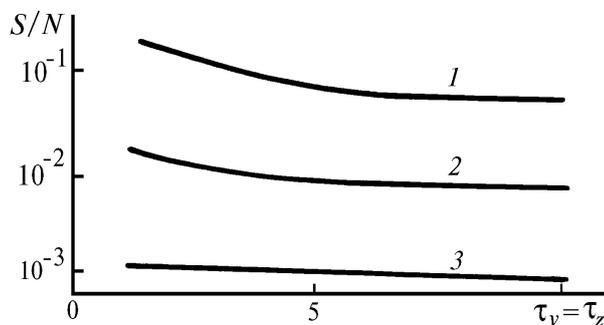


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал-шум от поперечных оптических размеров:  $\Lambda = 0,8$ ;  $\tau_x = 10$ .  
Кривая 1 –  $a = 1$ ; 2 – слоистая среда; 3 –  $a = 12,09$

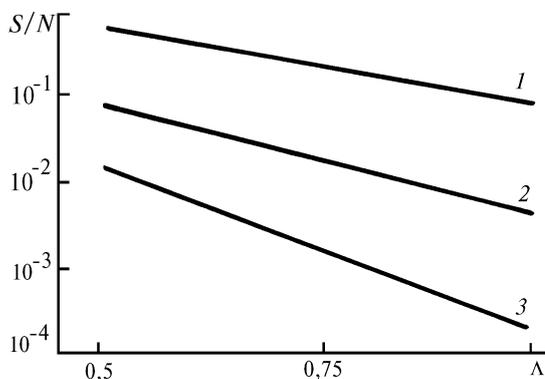


Рис. 2. Зависимость отношения  $S/N$  от вероятности выживания кванта:  $\tau_x = 10$ ;  $\tau_y = \tau_z = 1$ ; кривая 1 –  $a = 1$ ;  
2 – слоистая среда; 3 –  $a = 12,09$

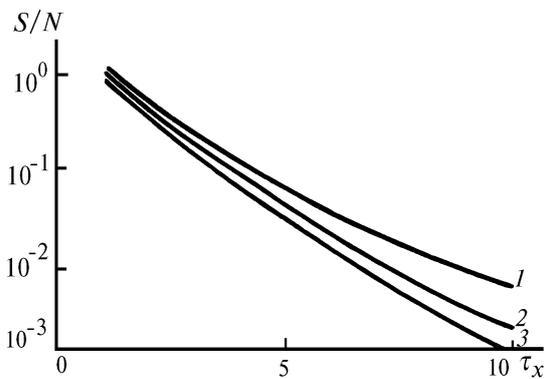


Рис. 3. Зависимость отношения  $S/N$  от оптической глубины слоисто-неоднородной среды:  $\Lambda = 1$ ; кривая 1 –  $\tau_y = \tau_z = 1$ ; 2 –  $\tau_y = \tau_z = 5$ ; 3 –  $\tau_y = \tau_z = 10$

Зависимость  $S/N$  от оптической глубины среды  $\tau_x$  приведена на рис. 3. С ростом оптической глубины среды мы наблюдаем резкое уменьшение отношения  $S/N$  при любых оптических поперечниках, и наличие слоистой структуры не меняет характера этой зависимости.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

– отношение  $S/N$  в двухслойной среде не зависит от порядка чередования слоев вследствие независимости пропускания;

– среда, состоящая из двух слоев, аналогична однородной среде тех же оптических размеров с некоторой усредненной индикатрисой рассеяния.

1. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Советское радио, 1977. 368 с.
2. Соболев В. В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: ГИТТЛ, 1956. 356 с.
3. Савельев Б. А., Могильницкий С. Б. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. Т. 82. N 8. С. 82–85.
4. Марчук Г. И. и др. Решение прямых и некоторых обратных задач методом Монте-Карло. Новосибирск: Наука, 1968. 172 с.
5. Фейгельсон Е. М., Краснокутская Л. Ф. Потoki солнечного излучения и облака. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 157 с.

КТИ РАН <ОПТИКА>  
Томский политехнический университет

Поступила в редакцию  
22 июня 1993 г.

**V. V. Goryachev, M. V. Kabanov, S. B. Mogil'nitskii, B. A. Savel'ev. Calculations of the Signal-to-Noise Ratio in an Inhomogeneous Stratified Medium.**

In this paper we present a discussion of the investigation of SNR as a function of optical size of a medium and of the photon survival probability taking also into account the influence of underlying surface and external sources when radiation propagates through a multilayer medium. It is shown in this study that light absorption by the medium, if present, improves SNR values by orders of magnitude. The influence of a medium stratification on the dependence of SNR on optical size of the medium is analyzed.