

**В.В. Белов**

## **ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ОПТИКЕ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД**

Дается обзор основных результатов исследований, выполненных в Институте оптики атмосферы СО РАН в рамках теории линейных систем по проблемам теории распространения оптических сигналов в дисперсных средах.

Программа исследований Института оптики атмосферы по теории распространения оптических сигналов через рассеивающие среды инициирована в конце 60-х годов его директором академиком В.Е. Зуевым. Ее выполнение поддерживалось созданием уникальной экспериментальной базы и оснащением института современной, непрерывно обновляющейся вычислительной техникой. Основные результаты, полученные до 1975 г., нашли отражение в известной монографии В.Е. Зуева, М.В. Кабанова <Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех)> (М.: Сов. радио, 1977, 368 с.) Дальнейшие исследования в этом направлении продолжались в основном в рамках теории линейных систем.

Эта теория успешно применяется для изучения и описания разнообразных физических процессов. Широко известны результаты, полученные в ее рамках при изучении электрических цепей. Основные ее идеи и методы нашли применение при анализе и синтезе оптических систем. Достаточно в этой связи, видимо, сослаться на известную монографию А. Папулиса <Теория систем и преобразований в оптике> (М.: Мир, 1975. 495 с.). В последние десятилетия ведутся интенсивные исследования по созданию и совершенствованию оптико-электронных комплексов различного назначения, имеющих в своем составе как активные, так и работающие в пассивном режиме элементы с использованием подсветки от внешних источников (Солнце, Луна и т.п.). Эти сложные комплексы включают в свой состав электронные и оптические блоки и могут быть описаны в целом с помощью одних и тех же понятий теории линейных систем: импульсных реакций, комплексных передаточных функций, амплитудно- и фазочастотных характеристик. Наконец, несложно показать, что при выполнении определенных условий можно на основе линейно-системных характеристик описать и процесс распространения оптических сигналов в средах, через которые осуществляется связь между приемником и источником оптического излучения [1, 2]. Обратим внимание на достаточно очевидную связь между импульсными реакциями каналов с рассеянием и функциями Грина. Этот вопрос достаточно подробно рассмотрен нами в [3].

В предлагаемой статье дается обзор результатов исследований, выполненных в рамках теории линейных систем в Институте оптики атмосферы по проблемам распространения оптических сигналов в дисперсных средах.

### **Постановка задачи. Определение линейно-системных характеристик. Методы исследований**

Сформулируем задачу теории распространения оптических сигналов в дисперсных средах так, как это сделано в [3].

Рассмотрим в наиболее общем виде проблему распространения оптических сигналов, отвлекаясь от конкретных предметных областей исследования и сформулируем общие подходы к ее решению. Условимся различать входные и выходные оптические сигналы. Под входным будем понимать сигнал  $P_{\text{вх}}$ , который определен в точке (области) его излучения или падения на границу рассеивающей и поглощающей среды. Выходным сигналом будем называть  $P_{\text{вых}}$ , который определен в точке (области) его регистрации.

Таким образом, будем рассматривать и называть одномерными сигналы  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}(t)$ , если они определены для некоторой фиксированной точки (или области) пространства как функции времени  $t$ , двумерными  $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}(x, y)$ : – в стационарном случае и трехмерными (пространственно-временными) – сигналы  $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}(x, y, t)$ . Первый случай, очевидно, рассматривает теория оптической локации, зондирования, связи, второй – теория видения, теория пассивного зондирования температуры подстилающей поверхности, третий случай реализуется при наблюдении динамических сцен. Будем предполагать, что источник и приемник излучения экранированы рассеивающей средой, оптические свойства которой в каждой точке определены, не изменяются во времени и заданы значениями коэффициентов рассеяния  $\beta_{\text{sc}}(\mathbf{r})$ , ослабления  $\beta_{\text{ext}}(\mathbf{r})$ , поглощения  $\beta_{\text{аб}}(\mathbf{r})$  и индикатрисой рассеяния  $g(\mathbf{r}, \omega)$ .

Цель исследований процесса распространения оптических сигналов в рассеивающих средах заключается в установлении закономерностей и связей между пространственными, временными, энергетическими и другими характеристиками входных и выходных сигналов в зависимости от оптических свойств и геометрических характеристик каналов распространения коротковолнового излучения. В самом общем виде эти связи на языке понятия лучистой интенсивности определены стационарным

$$(\omega, \text{grad } I(\mathbf{r}, \omega)) = -\beta_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{r}) I(\mathbf{r}, \omega) + \beta_{\text{sc}}(\lambda, \mathbf{r}) \int_{\Omega} I(\mathbf{r}, \omega') g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + \Phi_0(\mathbf{r}, \omega) \quad (1)$$

или нестационарным

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\mathbf{r}, \omega)}{\partial t} + (\omega, \text{grad } I(\mathbf{r}, \omega, t)) = -\beta_{\text{ext}}(\lambda, \mathbf{r}) I(\mathbf{r}, \omega) + \beta_{\text{sc}}(\lambda, \mathbf{r}) \int_{\Omega} I(\mathbf{r}, \omega') g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + \Phi_0(\mathbf{r}, \omega) \quad (2)$$

интегро-дифференциальными уравнениями переноса излучения, где  $I(\mathbf{r}, \omega, t)$  – интенсивность в точке  $\mathbf{r}$  в направлении  $\omega$  в момент времени  $t$ . Любая задача теории переноса оптических сигналов в рассеивающих средах может быть сведена к решению уравнения (1) или (2) при соответствующих граничных и начальных (в нестационарном случае) условиях.

Отвлечемся от особенностей физической природы каналов распространения сигналов и тех физических процессов, которые сопровождают перенос энергии от источника к приемнику. Тогда формально для исследования каналов с распределенными рассеивателями можно применить известный аппарат теории анализа линейных систем (линейность атмосферно-оптических каналов следует из линейности уравнений (1) и (2) относительно интенсивности). Для инвариантных к сдвигу источников в пространстве или во времени линейных систем основные положения этого подхода к решению задач теории переноса оптических сигналов в рассеивающих средах сводятся к следующим выражениям (в приложении к задачам лазерной локации, зондирования, связи):

$$P_{\text{вых}}(t) = \int_0^{\infty} P_{\text{вх}}(t') h(t-t') dt',$$

$$\dot{K}_{\text{вых}}(\gamma) = \dot{K}_{\text{вх}}(\gamma) \dot{H}(\gamma),$$

где  $h(t)$  – реакция канала зондирования, локации или связи на  $\delta(t)$  воздействие;  $\dot{K}_{\text{вых}}(\gamma), \dot{K}_{\text{вх}}(\gamma), \dot{H}(\gamma)$  – комплексные спектральные представления сигналов  $P_{\text{вых}}(t), P_{\text{вх}}(t), h(t)$  соответственно, причем

$$h(t) = F^{-1}[\dot{H}(\gamma)], \quad \dot{H}(\gamma) = F[h(t)],$$

$F, F^{-1}$  – прямое и обратное одномерное Фурье преобразование;  $\dot{H}(\gamma)$  – обычно называют передаточной функцией системы.

В приложении к теории видения

$$P_{\text{вых}}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int P_{\text{вх}}(x-x', y-y') h(x', y') dx' dy',$$

$$h(x, y) = F^{-2}[\dot{H}(\gamma, \omega)], \quad \dot{H}(\gamma, \omega) = F^2[h(x, y)],$$

где  $h(x, y)$  – реакция канала видения в точке  $(x, y)$  плоскости изображения на  $\delta(x, y)$  – источник в плоскости предметов;  $F^2, F^{-2}$  – прямое и обратное двумерное Фурье преобразование. Аналогично записываются основные положения линейно-системного подхода к решению задач атмосферной оптики в случае наблюдения через рассеивающие среды динамичных сцен.

Под импульсными реакциями будем понимать:

а) в одномерном случае

$$h(t) = I(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}, t; \mathbf{r}^*, \omega^*, \delta(t)),$$

т.е. функцию Грина, определенную в точке  $\mathbf{r}^{**}$ , направлении  $\omega^{**}$ , при условии, что сигнал излучен в виде  $\delta(t)$  импульса из точки  $\mathbf{r}^*$  в направлении  $\omega^*$ , или

$$h(t) = P_{\text{вых}}(\mathbf{r}^{**}, t; \mathbf{r}^*, \delta(t)) = \int_{\Omega^{**}} I(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}, t; \mathbf{r}^*, \delta(t)) d\omega^{**};$$

б) в двумерном случае

$$h(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}) = I(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}; \delta(x-x^*) \delta(y-y^*), \omega^*),$$

т.е. функцию Грина, определенную в точке  $\mathbf{r}^{**}$ , направлении  $\omega^{**}$ , при условии излучения мононаправленного источника из точки  $\mathbf{r}^*(x, y)$ , или

$$h(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}) = \int_{\Omega} I(\mathbf{r}^{**}, \omega^{**}; \delta(x-x^*) \delta(y-y^*) G(\mathbf{r}^*, \omega^*) d\omega^*.$$

Итак, задача теории распространения оптических сигналов решена, если определены импульсные реакции внешнего канала распространения сигналов и приемного оптико-электронного тракта. В спектральной области в этом случае можно записать, что

$$\dot{K}_{\text{вых}} = \dot{K}_{\text{вх}} \dot{H}_{\text{д.к}} \dot{H}_{\text{о.б}} \dot{H}_{\text{э.б}}, \quad (3)$$

где  $\dot{H}_{\text{д.к}}$  – оптическая передаточная функция дисперсного канала,  $\dot{H}_{\text{о.б}}$  – передаточная функция

оптического блока,  $\dot{H}_{\text{э.б}}$  – передаточная функция электронного блока приемного тракта. В [3] обсуждены условия, при которых можно полностью разделить на две независимые проблему учета влияния дисперсной среды и приемной оптической системы на выходной сигнал. Сделанное в [3] замечание ограничивает применимость (3) к описанию процесса распространения сигнала от источника через рассеивающую среду и приемный оптико-электронный блок. Оно связано с конечной глубиной резкости оптических систем и возможным возникновением кружков рассеяния плоскости изображения [4].

При исследовании линейно-системных характеристик и прежде всего импульсных реакций дисперсных каналов распространения оптических сигналов, использовались в основном метод Монте-Карло [2, 4 – 10] и приближенные методы уравнения переноса излучения (УПИ) [7–10], а также учитывались результаты лабораторных экспериментов, в которых использовались модельные дисперсные среды, помещенные в кюветы [1, 7, 11, 12], и результаты экспериментов, проведенных на базе большой аэрозольной камеры Института оптики атмосферы [9, 10, 13].

## Лазерное зондирование, связь. Одномерные линейно-системные характеристики

Линейно-системные характеристики  $h(t)$  и  $\dot{K}(\omega)$  каналов зондирования удаленных от излучателя рассеивающих слоев (в схеме на отражение) исследовались нами методом Монте-Карло и основные их свойства описаны в [14, 15]. Установлено, что эти характеристики наиболее существенно зависят от таких геометрических факторов, как угол поля зрения приемной системы ( $\nu_1$ ), расстояние до ближайшей к излучателю границы слоя ( $z_0$ ) и оптической плотности среды ( $\tau$ ). Их рост приводит к уширению импульсной реакции (к уменьшению полосы пропускания  $\Delta\omega$ ).

Для рассеивающих сред с размытой дальней от излучателя границей амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) каналов – монотонные функции частоты. Для сред с явно выраженной дальней границей АЧХ каналов зондирования могут стать осциллирующими в области <больших> частот модуляции. Эта особенность в поведении АЧХ может быть использована для оценки геометрической толщины слоя оптической неоднородности, локализованного на относительно прозрачной трассе зондирования [14]. На рис. 1 приведен пример такой амплитудно-частотной характеристики. Она описывает передаточные свойства канала лазерного зондирования удаленного рассеивающего слоя с нарастающей к дальней границе оптической плотностью при оптической его толщине  $\tau = 2; 4$ .

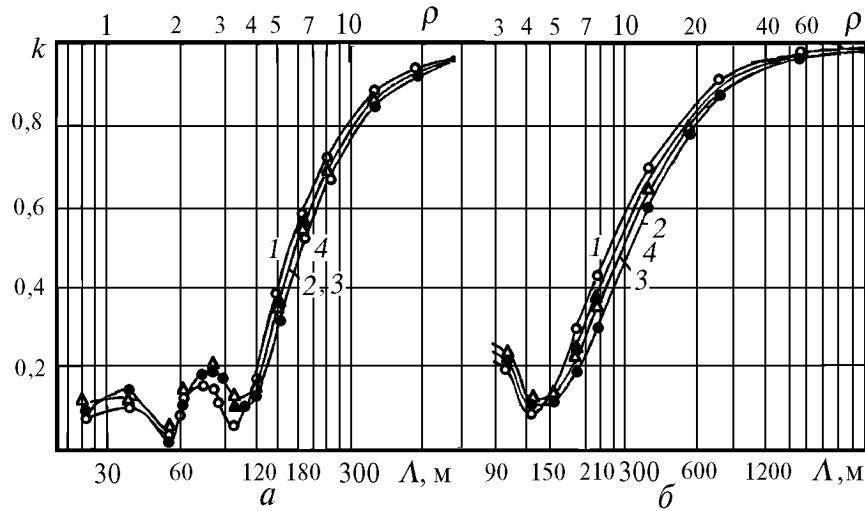


Рис. 1. Пример расчетов амплитудно-частотных характеристик канала зондирования удаленного облачного слоя с нарастающей оптической плотностью вдоль направления зондирования. Оптическая толщина облачного слоя  $\tau = 2$  (а) и  $\tau = 4$  (б). Номера кривых соответствуют углам поля зрения приемника в диапазоне  $3' \div 3^\circ$ .

На основе принципа геометрического подобия, введя безразмерные параметры  $\tau_0 = \overline{\beta}_{\text{ext}} z_0 \text{tg } \nu_0$  (где  $\overline{\beta}_{\text{ext}}$  – среднее значение коэффициента ослабления по толщине рассеивающей среды,  $\nu_0$  – угол расходимости зондирующего пучка) в [15] удалось обобщить результаты исследований, выполненных численным методом для конкретных оптико-геометрических параметров схем зондирования.

Остановимся несколько подробнее на менее известном результате, полученном нами при исследовании влияния неоднородности оптической плотности рассеивающего слоя вдоль направления зондирования на временную структуру многократно рассеянной компоненты лидарных сигналов. Интерес к этому вопросу проявляется в связи с предпринимаемой в последнее время попыткой решения обратных задач оптики дисперсных сред с учетом эффектов многократного рассеяния.

Будем описывать фон многократного или, точнее, вторичного рассеяния (т.е. кратности рассеяния выше первой) в лидарном сигнале импульсной реакцией  $h_m(t)$ . Эта характеристика оценивалась в [16] для моностатической схемы вертикального зондирования удаленного рас-

сеивающего слоя для набора оптических толщин в диапазоне  $0,5 \leq \tau \leq 6$  при трех вариантах профиля коэффициента ослабления по толщине слоя (вдоль координаты  $z$ ):

$$\text{а) } \beta_{\text{ext}}(z) = \text{const}; \quad (4)$$

$$\text{б) } \beta_{\text{ext}}(z) = \alpha_1(L-z)z; \quad (5)$$

$$\text{в) } \beta_{\text{ext}}(z) = \alpha_2(z), \quad (6)$$

где  $L$  – геометрическая толщина слоя;  $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ .

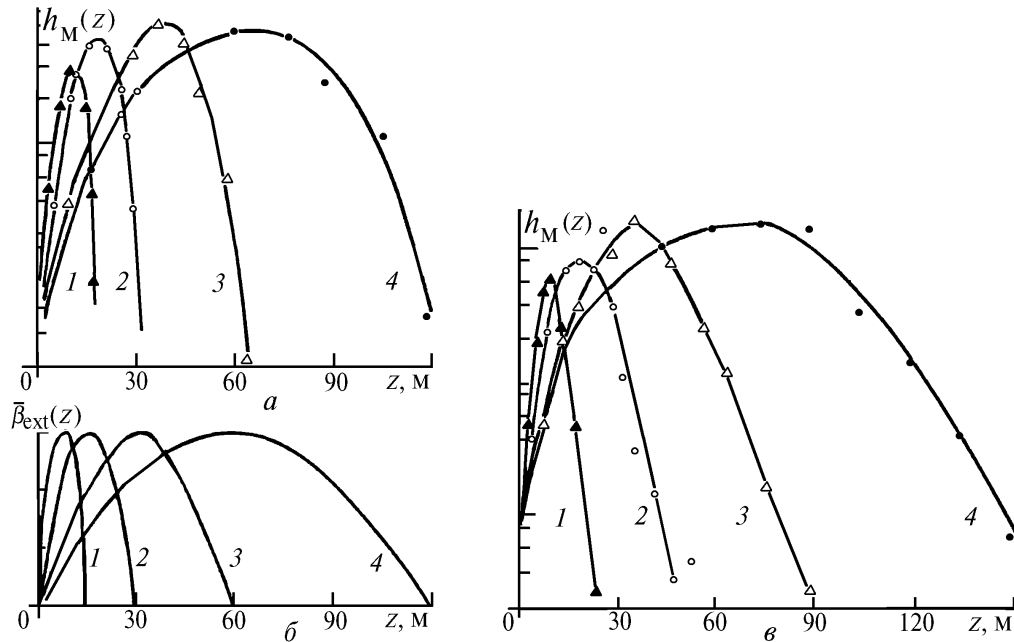


Рис. 2. Результаты моделирования импульсной реакции  $h_M(z)$  при зондировании удаленного облачного слоя с параболическим распределением коэффициента ослабления ( $\beta$ ). Номера кривых на ( $a$ ,  $b$ ) соответствуют номерам кривых ( $\beta$ ). Углы поля зрения приемника:  $3^\circ$  –  $a$ ,  $3^\circ$  –  $b$ .

На рис. 2 приведены результаты оценок методом Монте-Карло функций  $h_M(t)$  для рассеивающего слоя с параболическим профилем ( $z$ ). Для облегчения сравнения функций  $\beta_{\text{ext}}(z)$  и  $h_M(t)$  последняя представлена в координатах  $z = 2 t c$ , где  $c$  – скорость света. Характеристики  $h_M(z)$  нормированы:

$$h_M(z) = h_M(z)/h_{\text{max}},$$

где  $h_{\text{max}}$  – максимальное значение  $h_M(z)$  при угле поля зрения  $\nu = 3^\circ$ . Как и следовало ожидать,  $h_M(z)$  существенно зависит от угла поля зрения приемника. Наиболее ярко эта зависимость проявляется при больших  $\tau$  в случае однородной и параболической моделей  $\beta_{\text{ext}}(z)$ . Кроме того, установлено, что:

а) фон многократного рассеяния растет по мере проникновения луча в облако до некоторой глубины  $z = z_M \leq L$ , где достигает своего максимального значения и уменьшается при  $z > z_M$ ;

б) характеристики максимального значения отраженного фона вторичного рассеяния – его величина  $h_{\text{max}}$  и положение  $z_M$  на оси  $z$  зависят от угла поля зрения приемника и оптических свойств среды.

Рис. 3, где приведены результаты оценок  $h_M(z)$  для  $\tau = 4$  и различных моделей вертикального профиля  $\beta_{\text{ext}}(z)$ , иллюстрирует особенности формирования фона многократного рассеяния

в различных модельных условиях. Расчетами установлено, что при однородном профиле  $\beta_{\text{ext}}(z)$  в первоначальный момент роста  $\tau$  величина  $\max_z h_M(z, \tau, \nu_1)$  и значение  $z_M$ , где достигается максимальная интенсивность вторичного рассеяния, возрастают и тем больше, чем больше угол приема  $\nu_1$ . Дальнейшее увеличение оптической (геометрической) толщины рассеивающего слоя, начиная с некоторых значений  $\tau$  (зависящих от  $\nu_1$ ), не приводит к изменению характеристик  $\max_z h(z, \tau, \nu_1)$ .

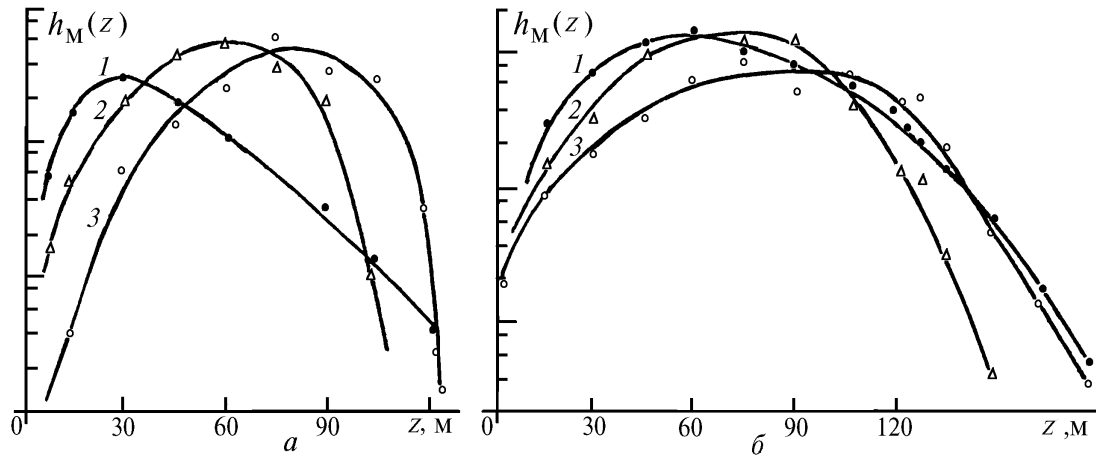


Рис. 3. Влияние распределения  $\beta_{\text{ext}}(z)$  на структуру фона многократного рассеяния. Оптическая толщина среды  $\tau=4$ ; углы поля зрения:  $3^\circ - a$ ,  $3^\circ - b$ ; кривые 1, 2 и 3 соответствуют распределениям  $\beta_{\text{ext}}(z)$  в виде (4), (5) и (6)

Можно утверждать, что при малых углах приема  $\nu_1 \lesssim 10'$  ( $\tau_1 \lesssim 0,0264$ ) с ростом  $\tau$  максимум интенсивности фона многократного рассеяния насыщается при  $\tau = 1$ , а при больших углах приема  $\nu_1 \approx 3^\circ$  ( $\tau_1 = 1,58$ ) – при  $\tau \approx 2$ .

Тенденция к насыщению интенсивности фона вторичного рассеяния при росте  $\tau$  наблюдается и при  $z > z_M$ , что происходит при  $\tau \approx 8-10$ .

Основным результатом, полученным при моделировании фона вторичного рассеяния, является то, что установлена устойчивая реакция компоненты  $h_M(z)$  на профиль  $\beta_{\text{ext}}(z)$  при всех рассмотренных  $\tau$  и  $\overline{\beta_{\text{ext}}}$ , которая несколько уменьшается при больших их значениях.

В зависимости  $h_M(z)$  от профиля  $\beta_{\text{ext}}(z)$  не удалось найти общих количественных связей (в виде, например, аппроксимационных выражений)  $h_M(z)$  с интегральными или средними оптическими характеристиками рассеивающего слоя (например,  $\tau$  или  $\overline{\beta_{\text{ext}}}$ ) и с апертурно-геометрическими параметрами схемы зондирования ( $\nu_0, \nu_1$  или  $\tau_0, \tau_1$ ).

Таким образом, фон вторичного рассеяния оказывается весьма чувствительным к вариациям оптико-геометрических параметров схем зондирования. Это затрудняет, если не делает безнадежными, попытки корректного устранения фона многократного рассеяния из лидарных сигналов без знания об оптических характеристиках зондируемой среды. В то же время эти результаты могут быть основанием для разработки методов извлечения информации о зондируемых средах из лидарного сигнала с учетом присутствия в нем многократно рассеянной компоненты.

Исследования импульсных реакций оптических каналов связи проведены с помощью расчетов методом Монте-Карло в малоугловом диффузионном приближении и лабораторных экспериментов в аэрозольной камере. Уникальная экспериментальная база института позволила выполнить эти исследования до  $\tau \approx 70$ , провести оценку области применимости приближенных методов решения уравнения переноса излучения и детально изучить влияние оптических свойств адиабатических туманов, геометрических параметров схем регистрации сигналов

на поляризационную и временную структуру импульсных реакций оптических каналов связи. Основные результаты этих исследований описаны в [9, 10, 13]. В процессе выполнения этой программы исследований выяснены особенности формирования поляризованной и кроссполяризованной импульсной реакции оптических каналов связи, установлены закономерности их изменения при вариациях характеристик искусственных туманов, близких по своим рассеивающим свойствам к облачным (типа С. 1) образованиям. Исследовано влияние варьируемых параметров схем наблюдения на задержку максимумов импульсных реакций и оценены условия, при которых происходит полная деполаризация регистрируемого излучения.

Возможность контроля оптических свойств рассеивающей среды (ослабление, оптическая толщина, индикатриса рассеяния) позволили использовать результаты этих экспериментов для оценки границ применимости математических моделей к описанию передаточных свойств каналов с рассеянием. В частности, исследована точность малоуглового приближения при решении уравнения переноса для описания импульсных реакций  $h(t)$  и в то же время подробно исследована зависимость их формы и мощностных характеристик от вариантных параметров схем наблюдения в той области значений параметров, где применимы приближения однократного рассеяния, малоуглового и диффузионного приближений при решении УПИ. Вне этой области форма импульсных реакций исследована с помощью метода Монте-Карло и экспериментов в аэрозольной камере.

Итоги выполнения этой исследовательской программы в [9, 10, 13] формулируются следующим образом:

- При малых оптических толщинах, когда угловое расширение пучка многократно рассеянного излучения не превышает угловой апертуры приемника ( $v_0^2 \ll v^2$ ), длительность импульса определяется однократным рассеянием в поле его зрения и не зависит от оптической толщины. Для условий проведенных модельных экспериментов это  $\tau \leq 10$ .

- В переходной области ( $\tau = 10 \div 70$ ) временная форма импульса может быть описана с достаточно высокой степенью точности в малоугловом диффузионном приближении в предположении о возрастании эффективного коэффициента диффузии с увеличением  $\tau$  и времени пребывания фотона в среде.

- При  $\tau > 70$  исчезает зависимость длительности от угла наблюдения и возможно применение асимптотических решений.

### **Перенос изображения через рассеивающие среды. Двумерные линейно-системные характеристики**

Процесс переноса изображения объектов через рассеивающие среды может быть исследован (в предположении однородности плоскости предметов) с помощью двух импульсных реакций  $h_g(x, y)$  и  $h_{gg}(x, y)$  (описывающих соответственно помехи бокового подсвета и переотражения) и двух интегральных характеристик:  $I_g$  – интенсивность световой дымки и  $E_0$  – освещенность плоскости объектов наблюдения (в некоторых случаях вместо импульсных реакций достаточно знать параметры  $\eta_\infty = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_g(x, y) dx dy$  и  $\gamma_\infty = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_{gg}(x, y) dx dy$ ). Цель наших

исследований заключалась:

- в построении алгоритмов статистического моделирования и методик измерения линейно-системных характеристик  $h_g(x, y)$ ,  $h_{gg}(x, y)$ ;

- в изучении основных закономерностей формирования и влияния помех рассеяния и отражения на качество изображения в видимой и ИК-области спектра;

- в исследовании особенностей процесса переноса изображения в рассеивающих средах при импульсной подсветке объектов;

- в разработке аппаратурных и программных средств коррекции изображений, искаженных рассеянием и поглощением в среде.

Близкие по целям исследования выполнялись и в других научных центрах страны и за рубежом [17–41]. Наша программа отличалась от других тем, что включала в себя достаточно большой объем лабораторных экспериментов, выполнявшихся параллельно с численными экспериментами на ЭВМ методом Монте-Карло. Это позволило построить алгоритмы расчета

импульсных реакций методом статистического моделирования, наиболее полно и точно учитывающие особенности формирования изображений объектов, наблюдаемых через рассеивающие среды. Исследования выполнены в два этапа. На первом этапе отрабатывались, сравнивались методики измерения линейно-системных характеристик систем видения (объект – среда – приемник), изучались основные закономерности переноса изображения в лабораторных экспериментах на модельных средах, имитирующих оптические свойства облаков, туманов и плотных атмосферных дымок. Одновременно выполнялись численные эксперименты методом Монте-Карло, имитирующие реальные лабораторные эксперименты.

Второй этап исследований выполнялся только теоретически на основе алгоритмов и программ моделирования импульсных характеристик каналов видения, которые прошли проверку на достоверность при выполнении первого этапа исследований. На этом этапе моделируются аэрокосмические условия наблюдения объектов через облачную, безоблачную (плоскопараллельную или с учетом сферичности) атмосферу в видимом и ИК-диапазоне длин волн.

Среди наиболее значимых результатов, полученных в процессе выполнения программы исследований, с нашей точки зрения, можно выделить следующие:

- $t$ -эффект и его интерпретация в [2] ;
- оценка границ применимости методики углового сканирования при измерениях импульсных реакций каналов видения [12] ;
- влияние оптико-геометрических условий наблюдения на изопланарность изображений и пространственное разрешение в системах видения [42–44] ;
- основные закономерности формирования помехи бокового подсвета [7] ;
- алгоритмы и аппаратные средства коррекции искажающего влияния рассеивающих сред на изображения [45] ;
- влияние процессов рассеяния и отражения на интенсивность восходящих потоков ИК-излучения [47] ;
- создание программно-информационной системы по проблемам переноса изображений [46] .

Основные выводы работ [2, 7, 12, 42 – 44] сводятся к следующему.

Эффект экстремального искажения изображения слоем рассеивающей среды (при перемещении последней между наблюдателем и объектом) может проявиться, если размеры зон неоднородности отражательной (излучательной) способности будут сравнимы с шириной соответствующей условиям наблюдения импульсной реакции. Этот эффект может наблюдаться как при естественных условиях освещения, так и при наблюдении самосветящихся объектов. Показано, что не исключается возможность повторения  $t$ -эффекта при перемещении среды, но ее экстремальное искажающее влияние проявится в других фрагментах или деталях изображений.

Показано, что рассеивающая среда заметно влияет на размер области изопланарности изображений. Основные факторы, определяющие эту зависимость, – оптическая толщина среды, индикатриса рассеяния и неоднородность оптических свойств среды вдоль линии наблюдения. Рост оптической толщины приводит к монотонному уменьшению размеров зон изопланарности изображений. Увеличение вытянутости индикатрисы рассеяния и оптической толщин сред сопровождается расширением, по крайней мере, центральной зоны изопланарности изображений. Перемещение среды к наблюдателю также приводит к росту площади изопланарных участков изображений.

Одна из важных одночисловых характеристик качества изображения – пространственная разрешающая способность – чувствительна к вариациям оптических характеристик параметров схем наблюдения и, что важно, определяется яркостной пространственной структурой объекта наблюдения. Удалось установить связь между этими характеристиками и контрастной чувствительностью анализатора (фиксатора) изображения и на этой основе, в частности, объяснить причины и определить условия проявления  $t$ -эффекта.

Остановимся кратко на основных свойствах импульсных реакций  $h_g(x, y)$  каналов видения в схемах вертикального наблюдения объектов. Установлено, что наибольшее влияние на их форму оказывает не интегральная оптическая толщина детерминированных горизонтально-однородных рассеивающих сред, экранирующих объект от наблюдателя, а характер распределения  $\beta_{\text{ext}}(z)$  коэффициента ослабления вдоль линии визирования. При сохранении оптической толщины среды форма импульсных реакций существенно изменится, если в пространстве ме-



жду объектом и наблюдателем концентрировать слои повышенной оптической плотности на различных расстояниях от наблюдателя. С другой стороны, полная мощность бокового подсвета не зависит от  $\beta_{\text{ext}}(z)$  и полностью определяется оптической толщиной среды, ее поглощательной способностью и формой индикатрисы рассеяния. Для поглощающей мутной среды рост ее оптической толщины приводит сначала к увеличению яркости  $B_g$  бокового подсвета, затем – к монотонному его уменьшению.

Иные свойства характерны для импульсной реакции  $h_{gg}(x, y)$ , характеризующей помеху переотражения. Пример расчета импульсных реакций  $h_{gg}(\varphi)$ , нормированных на их максимальные значения, приведен на рис. 4. Результаты получены для схем вертикального наблюдения через рассеивающий слой оптической толщины  $\tau = 1$  (кривая 1),  $\tau = 6$  (кривые 2 – 4). Кривая 2 проведена через точки, соответствующие трем различным расстояниям от плоскости предметов до ближней к нему границы рассеивающего слоя ( $\varphi$  – угол между вертикальным направлением из точки наблюдения и направлением на точку подсвета). На рис. 5 приведены в относительных единицах результаты моделирования интегральной яркости бокового подсвета и дополнительной освещенности точки наблюдения отраженным от среды потоком излучения, исходящим от всей однородной плоскости объектов.

Отметим, что исследование зависимостей импульсных реакций  $h_g(x, y)$ ,  $h_{gg}(x, y)$  и характеристик  $\eta_{\infty}$ ,  $\gamma_{\infty}$  проведены нами как в видимой, так и ИК-области спектра. В [47] определены условия наблюдения, при которых необходим учет этих помех в алгоритмах восстановления температуры подстилающей поверхности по спутниковым измерениям яркости светимости системы атмосфера – подстилающая поверхность.

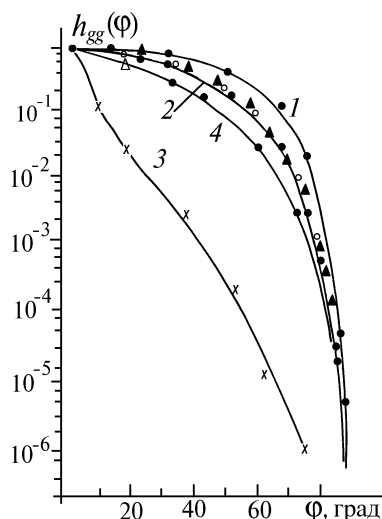


Рис. 4. Нормированные на максимальное значение импульсные реакции  $h_{gg}(\varphi)$ , полученные методом Монте-Карло для различных оптико-геометрических параметров схемы наблюдения

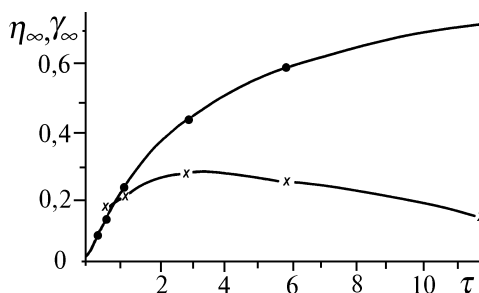


Рис. 5. Зависимость интегральных характеристик  $\eta_{\infty}$ ,  $\gamma_{\infty}$  от оптической толщины модельного облачного слоя

Анализ свойств импульсных реакций  $h_g(x, y)$ , полученных для различных условий наблюдения самосветящихся объектов, позволил нам предложить аппаратные и программные средства уменьшения искажающего влияния рассеивающих сред на качество изображения малоразмерных одиночных объектов и их композиций.

В [45] оценены области значений оптико-геометрических условий наблюдения, при которых применение простых аппаратных решений позволяет существенно повысить качество изображения объектов, экранированных от наблюдателя плотными рассеивающими средами. В то же время показано, что в некоторых ситуациях более эффективными (среди рассмотренных) оказываются программные средства обработки изображений в частотной или пространственной областях.

Основные программные продукты, разработанные для решения проблем теории переноса изображения через рассеивающие среды, интегрированы нами в автоматизированный программно-информационный комплекс. С его помощью можно осуществить замкнутый численный эксперимент, позволяющий сформировать изображение заданного объекта (при наблюдении его в общем случае через неоднородную, многокомпонентную со сферической геометрией среду, для заданных условий освещения и длины волны регистрируемого излучения) и осуществить коррекцию изображения на основе имеющейся информации об импульсной реакции  $h_g(x, y)$ .

## Заключение

Результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в Институте оптики атмосферы СО РАН по проблемам теории распространения оптических сигналов через рассеивающие среды, можно сформулировать следующим образом.

1. Последовательно применена теория линейных систем для изучения процесса переноса оптических сигналов через рассеивающие и поглощающие среды.

2. Разработаны и проверены на достоверность результаты расчетов алгоритмы математического моделирования передаточных свойств каналов распространения оптических сигналов, образованных рассеивающими средами.

3. Экспериментально и теоретически исследованы границы применимости приближенных методик измерения импульсных реакций каналов переноса изображений.

4. Проведено исследование передаточных свойств атмосферно-оптических каналов зондирования (локации), связи и видения в условиях существенного влияния процессов рассеяния и отражения на информационные характеристики распространяющихся через них оптических сигналов. Установлены или подтверждены основные закономерности формирования помех рассеяния и отражения. Обнаружен эффект экстремального искажения средой изображения объектов. Выявлены условия его возникновения, дана качественная и количественная интерпретация этого явления.

5. Выполнен анализ влияния традиционно не учитываемых (или учитываемых приближенно) факторов, связанных с рассеянием излучения в атмосфере и отражением (переотражением) его подстилающей поверхностью, на точность восстановления ее температуры при аэрокосмическом пассивном зондировании в ИК-диапазоне длин волн.

6. Предложены аппаратурные и программные средства устранения (уменьшения) искажающего влияния рассеивающей среды на качество изображения объектов, наблюдаемых через плотные рассеивающие среды.

Более подробно результаты исследований по проблеме теории переноса оптических сигналов мы предполагаем рассмотреть в готовящейся к изданию монографии В.Е. Зуева, В.В. Белова <Перенос оптических сигналов через рассеивающие и поглощающие среды>.

Продолжение исследований в ИОА СО РАН в обсуждаемом направлении связано с изучением влияния неортоотропности отражательных (излучательных) свойств поверхностей на качество их изображения, с особенностями формирования изображений в системах наблюдения с активной когерентной и некогерентной подсветкой (в том числе и через оптически плотные рассеивающие среды), а также с разработкой аппаратурных и программных средств коррекции изображений, искаженных рассеивающими и поглощающими средами.

Автор признателен академику В.Е. Зуеву за внимание к данному направлению исследований, за участие в обсуждении конкретных результатов, а также всем коллегам, с помощью которых обсуждаемые здесь результаты были получены.

1. Зуев В.Е., Белов В.В., Борисов Б.Д. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 268. С. 321–324.
2. Белов В.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 8. С. 787–799.
3. Белов В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 823 – 828.
4. Белов В.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФА и О. 1982. Т. 18. N 4. С. 435–437.
5. Белов В.В., Креков Г.М. // Opt. Lett. 1979. V. 4. P. 158–160.
6. Креков Г.М., Орлов В.М., Белов В.В. и др. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
7. Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 2. С. 18–24.
8. Белов В.В., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 10. С. 58–64.
9. Вергун В.В., Генин Е.В., Коханенко Г.П. и др. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 8. С. 809–814.
10. Вергун В.В., Генин Е.В., Коханенко Г.П. и др. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 9. С. 921–927.

11. Генин В.Н., Зайцев В.Е., Кабанов М.В. // X Всесоюз. конференция по распространению радиоволн. (Тезисы докл.). М.: Наука, 1972. С. 356–359.
12. Белов В.В., Глазов Г.Н., Генин В.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФА и О. 1987. N 11. С. 1205–1210.
13. Бергун В.В., Генин Е.В., Коханенко Г.П. и др. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 7. С. 691–697.
14. Белов В.В., Глазов Г.Н., Креков Г.М. // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21. N 3. С. 50–54.
15. Белов В.В., Глазов Г.Н., Креков Г.М. // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1978. Т. 21. N 2. С. 275–280.
16. Белов В.В., Креков Г.М. // VI Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск, 1980. С. 103–106.
17. Kaufman Y.J. // J. of Geoph. Res. 1982. V. 87. N 66. P. 4137–4147.
18. Kaufman Y.J. // J. of Geoph. Res. 1979. V. 84. N 66. P. 3165–3172.
19. Odell A.P., Weinman J.A. // J. of Geoph. Res. 1975. V. 80. N 36. P. 5035–5039.
20. Tanre D., Herman M., Deschamps P.Y. // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 20. P. 3676–3684.
21. Tanre D., Herman M., Deschamps P.Y. a de Leffe // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 21. P. 3587–3594.
22. Mekler Y., Kaufman Y.J. // J. of Geoph. Res. 1980. V. 85. N 7. P. 4067–4083.
23. Thomas R.W.L. // Adv. Space Res. 1983. V. 2. N 5. P. 157–166.
24. Ishimaru A. // Appl. Opt. 1978. V. 17. N 3. P. 348–352.
25. Kaufman Y.J. // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 19. P. 3400–3407.
26. Otterman J., Fraser R.S. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 16. P. 2852–2860.
27. Davis J.M., McKee T.V., Cox S.K. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 19. P. 3193–3205.
28. Дрофа А.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФА и О. 1984. Т. 20. N 10. С. 939–946.
29. Дрофа А.С., Кацев И.Л. // Метеорология и гидрология. 1981. N 11. С. 101–109.
30. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 328 с.
31. Стрелков С.А., Сушкевич Т.А. // Численное решение задач атмосферной оптики. М.: ИПМ АН СССР, 1984. С. 22–41.
32. Мишин И.В., Орлов В.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФА и О. 1979. Т. 15. N 3. С. 266–274.
33. Золотухин В.Г., Усиков Д.А., Гришин В.А. // Исследование Земли из космоса. 1980. N 3. С. 58–59.
34. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. 207 с.
35. Бабак В.Э., Беляев А.С., Гитин Ю.Л. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 51. N 2. С. 349–351.
36. Koreika N.S., Solomon S., Gensaу Y. // J. Opt. Soc. Am. 1981. V. 71. N 7. P. 892–901.
37. Fraser R.S., Kaufman Y. // IEEE Transactions and Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. GE-23. N 5. P. 625–633.
38. Kuga Y., Ishimaru A. // J. Opt. Soc. Am. A. 1985. V. 2. N 12. P. 2330–2335.
39. Kuga Y., Ishimaru A. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 1. P. 4382–4385.
40. Kaufman Y.J., Fraser R.S. // Invited paper (A. 1. 5. 1.) for Presentation in the CASPAR 24th Planetary Meeting. Ottawa. Canada. 1982. P. 1–19.
41. Долин Л.С., Савельев В.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФА и О. 1979. Т. 15. N 7. С. 717–723.
42. Белов В.В., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 860–868.
43. Белов В.В., Креков Г.М., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 10. С. 1011–1018.
44. Белов В.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 9. С. 17–24.
45. Алексеев А.И., Белов В.В., Борисов Б.Д., Молчунов Н.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 888–892.
46. Белов В.В., Гендрин М.В., Макушкина И.Ю., Молчунов Н.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 893–895.
47. Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 6. С. 797–826.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
22 июля 1994 г.

**V. V. Belov. Theory of Linear Systems in Dispersion Media Optics.**

The main investigation results obtained at the Institute of Atmospheric Optics of SB RAS on optical signals propagation in dispersion media in the framework of linear systems theory are presented in the paper.