

Б.Д. Борисов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СЛОЯ МОДЕЛЬНОЙ МУТНОЙ СРЕДЫ НА ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЯ

Изложены результаты экспериментальных исследований моделирования условий наблюдения через слой рассеивающей среды. Приведены зависимости качества изображения от положения слоя и размеров частиц. Оценены границы оптических толщин, при которых контраст изображения является немонотонной функцией положения слоя.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований по проблемам переноса изображения в мутных средах обобщены в работах [1, 2, 3], анализ которых показывает, что эти исследования еще далеки от завершения и требуют дальнейшего развития. Одной из таких проблем является влияние слоистой неоднородности среды на качество изображения.

В теории линейных систем видения качество изображения принято характеризовать, например, функцией размытия точки (ФРТ), описывающей распределение освещенности в плоскости наблюдения точечного диффузного источника, или частотно-контрастной характеристикой $K(\omega) = k(\omega)/k(0)$, где $k(\omega)$ — оптическая передаточная функция (ОПФ). Для осесимметричной ФРТ рассеивающей среды

ОПФ может быть найдена с помощью преобразования Ганкеля $k(\omega) = 2\pi \int_0^{\infty} rh(r)J_0(\omega r)dr$, где $h(r)$ — функ-

ция размытия точки; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ (x и y — координаты в плоскости наблюдения; $\omega = 2\pi f$ — пространственная частота; $J_0(\omega r)$ — функция Бесселя 0-го порядка.

В лабораторных экспериментальных исследованиях измерение $k(\omega)$ осложнено трудностью создания большего размера протяженных объектов и рассеивающих слоев. В работе [4] показано, что сужение пространственных границ измерения $h(r)$ (что, как правило, имеет место в лабораторных экспериментах), приводит к ошибкам в оценке ОПФ на низких пространственных частотах (ошибка усечения). Достаточная точность в определении $k(\omega)$ достигается для частот $f \geq R^{-1}$, где R граничное значение пространственной координаты $h(r)$. В работе [5] на примере расчета ЧКХ оптических систем рекомендуемой процедурой снижения погрешности в области высоких пространственных частот является

нормировка относительно «величины полной энергии урезанной ФРТ», т.е. $\tilde{k}(0; l) = 2\pi \int_0^R r\tilde{h}(r)dr$ (l — расстояние от объекта до локализованного слоя рассеивающей среды).

В данном сообщении на основе характеристик $\tilde{K}(\omega; l) = \tilde{k}(\omega; l)/\tilde{k}(0; l)$, рассчитанных по экспериментальным $\tilde{h}(r; l)$, исследуются зависимости этих характеристик от оптической толщины τ , размеров частиц и положения пространственно ограниченного рассеивающего слоя на трассе наблюдения с целью определения границ оптических толщин и положения слоя, в которых наиболее сильно проявляется эффект экстремального искажения изображения объектов ограниченных размеров, описанный в работах [6, 7].

Для нахождения функции $\tilde{h}(r; l)$ использовалась экспериментальная установка с диффузно-излучающим плоским излучателем угловыми размерами $\sim 9 \cdot 10^{-4}$ рад. Схема экспериментальной установки и методика измерений подобны ранее описанным в работе [8]. Рассеивающая среда помещалась в круглую плоско-параллельную стеклянную кювету диаметром 440 мм. Слой с рассеивателями толщиной $\Delta L = 22$ мм перемещался относительно источника и приемника вдоль оптической оси последнего. Излучение источника регистрировалось объективом диаметром 64 мм. Мгновенное поле зрения анализатора изображения составляло не более $2\beta = 10^{-3}$ рад.

Распределение освещенности в плоскости изображения приемного объектива находилось дискретным сканированием полем зрения анализатора изображения. Приближение эксперимента к условиям наблюдения системами с визуальной регистрацией оптического сигнала, достигалось использованием спектрального диапазона, близкого к спектральному диапазону визуальных систем с максимумом пропускания в области 0.55 мкм.

Применяемая в эксперименте методика определения $\tilde{h}(r; l)$ относится к методике «углового сканирования». Из работы [9] следует, что эта методика и «прямой способ» (метод пространственного сканирования узкоугольным приемником) измерения $\tilde{h}(r; l)$ взаимозаменяемы для малых углов изме-

рения и с достаточной точностью во всем диапазоне углов, если рассеивающий слой вблизи источника. Использование последнего свойства позволяет провести оценку эффективного рассеивающего объема, формирующего ФРТ мутного слоя в «ближней зоне». Оценочный эксперимент заключается в определении зависимости яркости света, рассеянного слоем среды, от размеров последовательно увеличивающихся круглых диффузно светящихся тест-объектов до величины «насыщения» яркости. Эти измерения были проведены в широком диапазоне оптических толщин от $\tau = 0,29$ до $\tau = 12,7$. Проведенная оценка дает возможность сделать вывод о том, что геометрические размеры кюветы с рассеивающей средой достаточны и превышают необходимый рассеивающий объем, нужный для учета практически полной ФРТ в диапазоне $0 \leq l \leq 90$ мм. Это позволяет результаты исследований $\tilde{K}(\omega)$; ($0 \leq l \leq 90$) использовать для анализа условий видения объектов произвольных размеров.

Для моделирования в лабораторных условиях разнообразных атмосферно-оптических ситуаций создавались среды с оптическими толщинами и некоторыми характерными размерами рассеивающих частиц. Так, раствором молока в дистиллированной воде с диаметром частиц приблизительно 3 мкм моделировались условия наблюдения через облачные образования. Взвесь ликоподия имитировала слой тумана с диаметром частиц около 34 мкм. На рис. 1 приведен пространственный спектр при наблюдении через слой дистиллированной воды без внесения дискретных рассеивателей.

Дистиллированная вода является слабоссеивающей средой с угловым распределением интенсивности рассеянного света, близким к рэлеевскому на очень малых изотропных частицах с максимумом пропускания в сине-зеленой оптической области спектра. Из рисунка видно, что перемещение слоя с дистиллированной водой не приводит к значительным изменениям $\tilde{K}(f; t)$, где параметр t характеризует положение слоя повышенной мутности на трассе наблюдения и равен l/L , L — расстояние между источником и приемным объективом. Минимальное значение $t = 0$ определяет положение слоя у объекта. Пространственный спектр частот системы видения в этом случае при изменении $0,01 \leq t \leq 0,1$ ограничен кривыми на рис. 1.

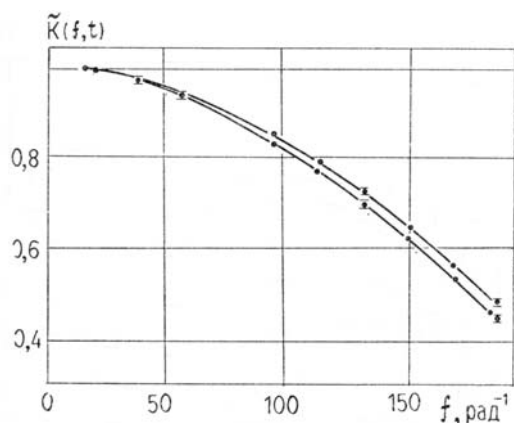


Рис. 1. Пространственный спектр в плоскости изображения системы видения через слой, дистиллированной воды для $0,01 \leq t \leq 1,0$

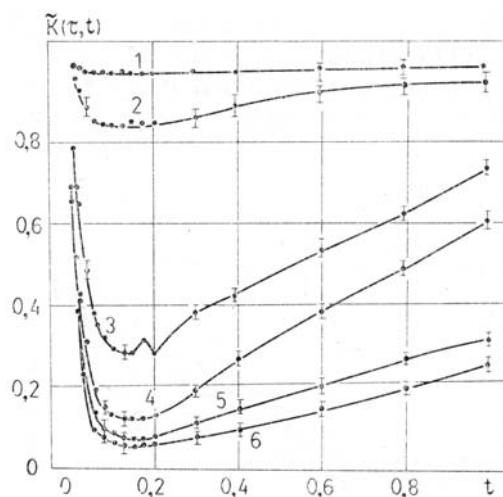


Рис. 2. Зависимость $\tilde{K}(\tau; t)$ для монодисперсного слоя с диаметром частиц ~ 3 мкм для фиксированной пространственной частоты $f = 19 \text{ рад}^{-1}$ и оптических толщин: 1 — 0,45; 2 — 1,5; 3 — 3,0; 4 — 5,0; 5 — 6,0; 6 — 7,0

Оценка влияния оптической толщины рассеивающего слоя на функцию $\tilde{K}(\tau; t)$ с изменением t была проведена экспериментально в широком диапазоне τ . На рис. 2 показана трансформация контраста изображения $\tilde{K}(\tau; t)$ как функции относительного расстояния и оптической толщины τ на фиксированной пространственной частоте $f = 19 \text{ рад}^{-1}$ для раствора молока. С увеличением оптической толщины слоя характер зависимости $\tilde{K}(\tau; t)$ меняется. Для определенных значений τ существует минимум функции $\tilde{K}(\tau; t)$ при перемещении слоя по трассе наблюдения [6]. Например, для оптической толщины $\tau = 0,45$ (кривая 1) изменение $\tilde{K}(\tau; t)$ при $t \rightarrow 1,0$ практически отсутствует. Для $\tau = 1,5$ (кривая 2) наблюдается уменьшение контраста в районе $0,05 \leq t \leq 0,3$. При увеличении τ до 3–5 у функции $\tilde{K}(\tau; t)$ появляется глубокий минимум, который начинает сглаживаться с ростом τ . Эти изменения в зависимости от τ можно

характеризовать, например, наклоном линейной части функции $\tilde{K}(\tau; t)$ для значений $t = 0,2 - 1,0$. В этом случае для оптических толщин $\tau = 5,0$ и $\tau = 7,0$

$$\tilde{K}(5; 0,2 < t < 1) = c_1 t; \quad \tilde{K}(7; 0,2 < t < 1) = c_2 t,$$

где $c_1 = 0,6$; $c_2 = 0,25$. Из сравнения этих двух функций видно, что угловые коэффициенты c_1 и c_2 при варьировании оптической толщины от 5 до 7 изменяются более чем в 2 раза. Дальнейшее увеличение τ приближает угловой коэффициент к единице.

Таким образом, значение $\tilde{K}(\tau; t)$ при различных положениях рассеивающего слоя определяется оптической толщиной рассеивающей среды. Для малых оптических толщин, когда основную роль играет однократное рассеяние, перемещение слоя не приводит к существенным изменениям в контрасте изображения. Возрастание многократного рассеяния с увеличением τ ведет к резкому уменьшению функции $\tilde{K}(\tau; t)$ при определенных положениях слоя рассеивающей среды. Дальнейший рост многократно рассеянного света сглаживает немонотонность $\tilde{K}(\tau; t)$.

Влияние размеров частиц и положения рассеивающего слоя на $\tilde{K}(f; t)$ иллюстрируют рис. 3 и 4. На рис. 3 приведена зависимость изменения $\tilde{K}(f; t)$ для раствора молочной среды оптической толщины $\tau = 3$. Перемещение рассеивающего слоя дает характерный минимум, отмеченный ранее. После резкого уменьшения $\tilde{K}(f; t)$ в области $0 < t \leq 0,2$ для всех пространственных частот наблюдается монотонное увеличение контраста с приближением рассеивающего слоя к приемной системе. Влияние крупных частиц на изменение $\tilde{K}(f; t)$ показано на рис. 4. При наблюдении через рассеивающий слой из взвеси частиц ликоподия ($\tau = 3,5$) минимум контраста наблюдается на более близком расстоянии от источника излучения. Функция $\tilde{K}(f; t)$ имеет выраженный минимум в диапазоне $0 < t \leq 0,15$ и слабо зависит от t при $t \rightarrow 1$. Его существование может быть объяснено взаимодействием прямопрошедшего и рассеянного излучения. Если рассмотреть систему видения, работающую на конечном расстоянии, то, как уже отмечалось, величина $\tilde{K}(f; t) = \tilde{k}(f; t) / \tilde{k}(0; t)$ есть отношение интенсивности пространственной спектральной компоненты к полному потоку, создаваемому точечным объектом, в поле зрения приемной системы. Полный поток является функцией эффективного рассеивающего объема, размеров рассеивателей и оптической толщины. При перемещении слоя в ближней зоне происходит перераспределение (для достаточной оптической толщины и при значительном эффективном рассеивающем объеме) между прямым и рассеянным излучением, которое приводит к снижению контраста изображения.

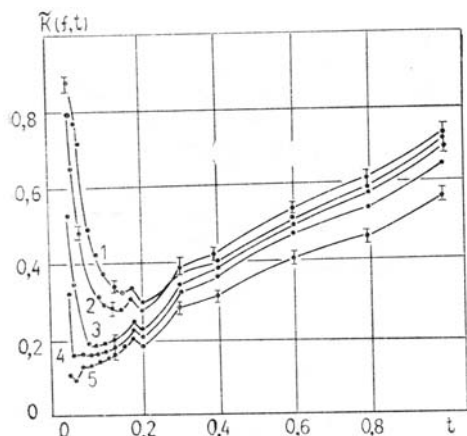


Рис. 3. Зависимость $\tilde{K}(f; t)$ для раствора молока; оптическая толщина $\tau=3,0$; пространственные частоты: 1 — 13 рад⁻¹; 2 — 19 рад⁻¹; 3 — 39 рад⁻¹; 4 — 77 рад⁻¹; 5 — 116 рад⁻¹

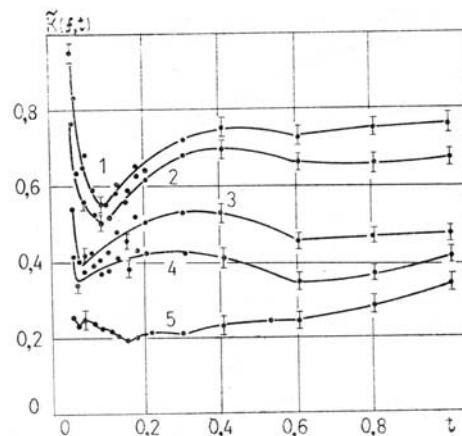


Рис. 4. Зависимость $\tilde{K}(f; t)$ для взвеси ликоподия с диаметром частиц ~ 34 мкм; $\tau=3,5$; пространственные частоты: 1 — 13 рад⁻¹; 2 — 19 рад⁻¹; 3 — 39 рад⁻¹; 4 — 58 рад⁻¹; 5 — 116 рад⁻¹

С одной стороны, чем меньше частицы, тем более существен вклад многократно рассеянного света в эффективный рассеивающий объем из прилегающей к нему рассеивающей зоны. С другой стороны, уменьшение эффективного рассеивающего объема и уменьшение вклада рассеянного света приводит к улучшению контраста при перемещении слоя к приемнику. В случае крупных частиц (для положения слоя вблизи источника) основная часть рассеянного света концентрируется в области прямопрошедшего излучения в ФРТ, что приводит к разрушению тонкой структуры изображения. Для

крупных частиц вклад рассеянного света определяется в большей степени центральной частью углового распределения, которое меньше зависит от эффективного рассеивающего объема. Таким образом, при наблюдении через слой крупных частиц для $0,2 \leq t \leq 1$ в данных условиях эксперимента функция $\tilde{K}(f; t)$ слабо зависит от положения рассеивающего слоя.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Перемещение ограниченного слоя мутной среды в промежутке между приемником и объектом может приводить к немонотонному изменению контраста изображения. Существует область оптических толщин, в которой контраст изображения проходит через минимальное значение. В данном эксперименте эту область можно оценить значением оптической толщины $1,5 \leq \tau \leq 6,0$ для размера рассеивающих частиц диаметром ~ 3 мкм.

2. Перемещение слоя с крупными частицами оказывает меньшее искажающее влияние на качество изображения в зоне, прилегающей к приемному объективу. Значения параметра t для этого случая определяются пределами $0,2 \leq t \leq 1$.

1. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Советское радио, 1977. — 386 с.
2. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. — Минск: Наука и техника, 1985. — 327 с.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 254 с.
4. Волнистова Л.П., Дрофа А.С. — Изв. АН СССР. ФАО, 1985, т. 21, № 1, с. 50.
5. Проектирование оптических систем/Под редакцией Р. Шеннона, Дж. Вайанта. — М.: Мир, 1983. — 430 с.
6. Зуев В.Е., Белов В.В., Борисов Б.Д., Генин В.Н., Кабанов М.В., Креков Г.М. — ДАН СССР, 1983, т. 268, № 2, с. 321.
7. Будак В.П., Гуторов М.М., Федосов В.П. — Светотехника, 1986, № 11, с. 19.
8. Борисов Б.Д., Генин В.Н., Лиммер Б.А., Наливайко А.А., Шишлов В.И. — В кн.: Проблемы оптики атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1983, с. 150.
9. Белов В.В., Борисов Б.Д., Генин В.Н., Креков Г.М., Макушкина И.Ю. — Изв. АН СССР. ФАО, 1987, т. 23, № 11, с. 1205.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
23 декабря 1987 г.

B. D. Borisov. Effect of Model Turbid Medium Layer on Image Transfer.

The results of laboratory-scale experiments simulating image transfer through a scattering medium layer are presented. The relation of the image quality to the layer position and particle size is discussed. Optical depths are evaluated for which the image contrast is a nonmonotonic function of the layer position.