

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЯХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Э. В. Бабак, А. С. Беляев и Ю. Л. Гитин

Выполнен анализ влияния некоторых параметров оптических систем на общую ОПФ сложной системы — оптическая система — дисперсная система. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Под дисперсными системами здесь понимаются оптические среды, содержащие в себе во взвешенном состоянии частицы (дисперсную фазу) различных размеров, формы и с разнообразными физическими свойствами. К таким системам можно отнести эмульсии и суспензии или их сочетания как искусственного, так и естественного происхождения.

Дисперсными системами с этих позиций в равной степени могут быть названы атмосферные и морские золи, химические растворы, в которых одно вещество диспергировано в другом, биологические препараты и т. д.

Использование аппарата ОПФ (оптических передаточных функций) применительно к дисперсным системам предполагает решение задачи переноса светового излучения и его пространственной фильтрации в средах методами, встречающимися в теории систем. При этом либо определяют влияние дисперсных систем (ДС) на качество изображения и поэтому ДС рассматриваются совместно с оптическими системами, строящими изображение [1-6], либо определяют с помощью ОПФ физические параметры ДС. В последнем случае влияние оптических систем на ОПФ желательно исключить.

Как в том, так и в другом случае использование аппарата ОПФ вместо традиционных методов или совместно с ними представляет самостоятельный интерес и обладает известными преимуществами из-за большей простоты математических выводов, а также простоты и наглядности экспериментальных материалов.

Если ДС рассматривать, как элемент оптической системы, то, считая приемную часть оптической системы идеальной (по крайней мере в том диапазоне пространственных частот, в котором оказывает фильтрующее действие ДС), а регистрируемую функцию рассеяния ДС независимой от параметров регистрирующей оптической системы, можно определить ОПФ дисперсных систем, как Фурье-образ изображения точечного источника света

$$D(\nu_x; \nu_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x'; y') \exp \{i2\pi(\nu_x x' + \nu_y y')\} dx' dy' \dots, \quad (1)$$

где $h(x'; y')$ — распределение интенсивности в изображении точечного самосветящегося объекта при регистрации этого объекта через слой ДС, или функция рассеяния (ФР); ν_x, ν_y — пространственные частоты.

Здесь ФР дисперсных систем рассматривается как характеристика, присущая ДС. Иными словами, предполагается, что ФР, измеренная

при определенных параметрах ДС, может быть использована для определения ОПФ любой оптической системы, в которую включена как элемент ДС с теми же оптическими параметрами.

Однако экспериментальное определение ОПФ дисперсных систем имеет свои особенности и вытекающие из них трудности, которые связаны с оптическими свойствами этих систем.

Измерения ОПФ дисперсных систем всегда производятся с помощью оптических систем и в результате получают общую ОПФ. При соблюдении в такой сложной системе, по крайней мере, двух условий — линейности и независимости составляющих ее элементов друг от друга — общая ОПФ $H_{\Sigma}(\nu)$ могла бы, как известно [2], быть выражена простым равенством

$$H_{\Sigma}(\nu) = D(\nu) O(\nu), \quad (2)$$

где $D(\nu)$ — ОПФ дисперсной системы; $O(\nu)$ — ОПФ оптической системы.

В этом случае, зная ОПФ оптической системы, можно легко найти ОПФ дисперсной системы. Однако в действительности такие параметры оптической системы, как соотношение между световыми диаметрами передающего и приемного объективов, угловой размер теста, влияют на ФР, регистрируемую в плоскости приемника [4], влияют на нее и диаграмма направленности излучения объекта. Поэтому использование формулы (1) возможно лишь при соблюдении определенных требований, гарантирующих выполнение условия независимости. Об этом и пойдет разговор ниже.

Существует много методов измерения ОПФ дисперсных систем, которые являются, как правило, техническим воплощением двух способов. Первый из них заключается в определении функции рассеяния точки (ФРТ) с последующим ее Фурье-преобразованием. Суть этого способа обстоятельно изложена в работе [4]. Там же уделяется большое внимание учету влияния на ФРТ приемной оптической системы и приводится библиография по этому вопросу.

Второй способ заключается в измерении ОПФ без промежуточного определения ФРТ. Этот способ предпочтительней, так как позволяет использовать все преимущества ОПФ. Для экспериментального его осуществления применяются специальные тест-объекты: миры Фуко [7], миры с переменным периодом [8], радиальные тесты [2], скрещенные растры [9] и т. п. При этом измерения сводятся к регистрации коэффициента передачи амплитуд гармоник различной пространственной частоты этих тестов через слой ДС.

Рассмотрим случай непосредственного определения ОПФ для однородной изотропной ДС, когда ОПФ равна своему модулю, т. е. частотно-контрастной характеристике (ЧКХ). Для простоты ограничимся одномерным представлением всех функций. Рассмотрим случай, когда ДС заполняет весь объем между объектом и приемником.

Для описания переноса изображения тест-объекта в плоскость приемника можно воспользоваться уравнением свертки [10]

$$i(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} i(x) h(x' - x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} i(x' - x) h(x) dx, \quad (3)$$

где $i(x)$ — распределение интенсивности в плоскости объекта, $i(x')$ — распределение интенсивности в плоскости изображения, $h(x)$ — общая функция рассеяния всей системы, приведенная к плоскости объекта.

Полагаем оптическую систему безаберрационной, а тест-объект ламбертовским с синусоидальным распределением интенсивности

$$i(x) = C(1 + A \cos 2\pi\nu x),$$

где C — коэффициент пропорциональности, A — амплитуда синусоиды, ν — пространственная частота, x — текущая координата.

Если функция $h(x)$ четная и действительная, а тест-объект неограничен по протяженности, то после подстановки значения $i(x)$ в выражение (3) и соответствующих преобразований для объекта, расположенного на конечном расстоянии получаем

$$i(x') = C \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx + A \cos(2\pi\nu x') \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \cos(2\pi\nu x) dx \right\}. \quad (4)$$

Первое слагаемое в правой части выражения (4) характеризует постоянную составляющую, а второе слагаемое пропорционально косинус-преобразованию Фурье-функции рассеяния или модулю ОПФ дисперсной системы.

В реальных оптических системах протяженность тест-объекта конечна. Это ограничение можно ввести в выражение (4) с помощью функции $P(x)$

$$P(x) = \begin{cases} 1, & -l \leq x \leq +l, \\ 0, & x < -l; x > +l. \end{cases}$$

Тогда

$$i(x') \sim \cos(2\pi\nu x') \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) P(x) \cos(2\pi\nu x) dx = \cos(2\pi\nu x') \int_{-l}^{+l} h(x) \cos(2\pi\nu x) dx. \quad (5)$$

Возможна такая ситуация, при которой пределы изменения функции $h(x)$ можно ограничить интервалом, охватываемым функцией $P(x)$, вне которого функция $h(x)$ стремится к нулю. В этом случае выражение (4) остается справедливым.

Для оценки степени влияния оптической системы на измеряемую ОПФ дисперсной системы и определения условия независимости были проведены эксперименты. При этом предполагалось, что нецелесообразно рассматривать влияние всех параметров регистрирующей оптической системы, от которых зависит измеряемая ОПФ, так как степень влияния каждого из них зависит от оптической схемы измерений.

В конечном итоге предполагалось, что, если оптическая система, в которую входит элементом ДС, идеальна, то при любой схеме эксперимента по измерению ОПФ дисперсной системы влияние оптической системы можно свести к изменению пределов интегрирования в выражении (4) либо за счет ограничения объекта, либо благодаря конечности приемной апертуры и из-за вариации соотношения между диаметрами зрчков передающего и приемного объективов в случае распространения через ДС коллимированного пучка света, либо по каким-нибудь еще причинам, зависящим от конкретной схемы измерений. Поэтому в эксперименте определялся ход графиков ОПФ в зависимости от регистрируемого размера тест-объекта l .

С помощью лабораторной установки, разработанной в ЛИТМО специально для исследования ОПФ дисперсных систем были проведены эксперименты на моделях ДС. Моделями служили водные растворы молока с медианным радиусом частиц $\bar{a}=1$ мкм и монодисперсные суспензии латекса с $\bar{a}=2$ мкм, сумчатых грибов *Endomycetaceae* с $\bar{a}=3$ мкм и ликоподия с $\bar{a}=15$ мкм. Частицы этих моделей непрозрачны и имеют форму, близкую к сферической. Измерения проводились для некогерентного излучения с длиной волны $\lambda=550$ нм. Исследовались как протяженные объемы ДС вплоть до 1 м, так и тонкие слои толщиной 7 мм. Для обеспечения однородности ДС в малых слоях, где концентрация дисперсной фазы могла достигать больших значений, тонкие слои моделировались в специальных кюветках с изотропной прокачкой, причем ДС предварительно диспергировались ультразвуком, чтобы исключить коагуляцию дисперсной фазы. Этим обеспечивалась и стационарность ДС во времени.

Для исключения влияния удаленности слоя ДС от приемного объектива на ОПФ и уменьшения влияния границы раздела двух сред воздух—вода тест-объект располагался в фокальной плоскости передающего объектива. Благодаря этому через слой ДС распространялся коллимированный пучок света, расхожимость которого определялась линейным размером тест-объекта и фокусным расстоянием передающего объектива.

В качестве тест-объекта использовался одномерный тест с синусоидальным распределением интенсивности, причем период синусоиды плавно менялся в пределах, необходимых для регистрации ОПФ дисперсной системы.

Изображение теста перемещалось в направлении синусоиды и сканировалось приемной щелью перпендикулярной направлению перемещения.

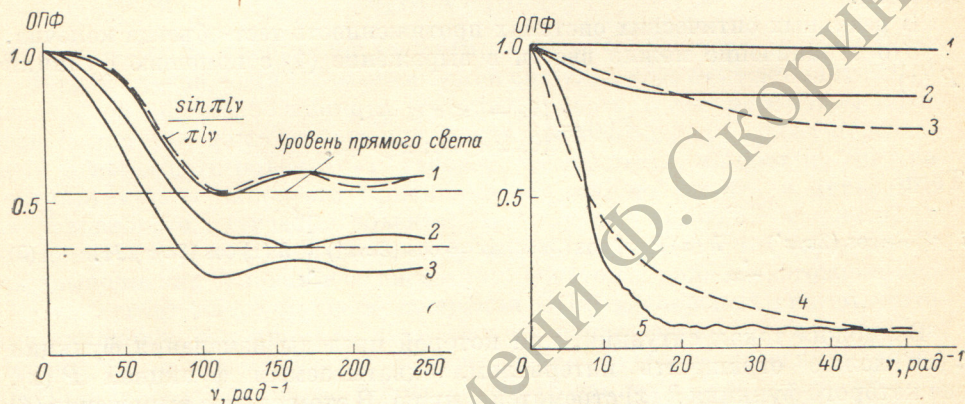


Рис. 1. Графики суммарных ОПФ оптической и дисперсной систем для оптической системы с диаметром входного зрачка приемного объектива $D_{пр.} = 50$ мм и $f' = 500$ мм при $\tau = \epsilon R = 5$.

1 — дисперсная система с радиусом частиц 1 мкм, 2 — с радиусом частиц 2 мкм, 3 — с радиусом 3 мкм.

Рис. 2. Графики ОПФ.

1 — оптическая система с $D_{пр.} = 50$ мм, $f' = 500$ мм и угловым размером теста $l = 0.1$ рад; 2, 3 — суммарные ОПФ $H_{\Sigma}(\nu)$ оптической системы с теми же параметрами и дисперсных систем с радиусами частиц 3 и 15 мкм соответственно; 4, 5 — ОПФ дисперсных систем, записанные при тех же параметрах оптической системы, что и предыдущие кривые, но для $l = 0.35$ рад.

Ширина щели была 0.01 мм. За щелью располагался ФЭУ-114. Электрический сигнал после ФЭУ анализировался (определялась постоянная составляющая и глубина модуляции) и подавался на двухкоординатный самописец ПДП-4, где глубина модуляции записывалась как функция угловой пространственной частоты ν (рад⁻¹).

На рис. 1 приводятся графики кривых суммарной ОПФ измеренные при расстоянии между передающим и переменным объективами 1500 мм, световом диаметре приемника $D_{пр.} = 50$ мм, коллиматора $D_k = 30$ мм, фокусных расстояниях передающего и приемного объективов $f' = 500$ мм и угловом размере тест-объекта 0.009 рад. Все три кривые сняты для $\tau = \epsilon R = 5$ (ϵ — показатель направленного ослабления, R — путь света в ДС), $R = 1000$ мм.

Постоянство τ обеспечивалось тем, что дисперсная фаза добавлялась в ДС при непрерывном контроле параметра и интенсивном перемешивании.

Нетрудно заметить, что форма кривых незначительно меняется при изменении размеров частиц. Существенно лишь изменение уровня асимптоты, к которой они стремятся при увеличении ν . Уровень асимптоты определяется уровнем прямого света относительно рассеянного в пределах угла 0.009 рад. Поскольку с ростом размера частиц в пределах этого угла концентрируется все больше рассеянного света, то относительный вклад прямого уменьшается. Форму кривых можно объяснить, если допустить,

что функция $h(x)$ в пределах интервала $(-l; +l)$ постоянна. Тогда, согласно уравнению (5),

$$i(x') \sim \cos(2\pi\nu x') \int_{-l}^{+l} \cos(2\pi\nu x) dx = \frac{\sin(2\pi l\nu)}{\pi l\nu} \cos(2\pi x'\nu).$$

График этой функции приведен на том же рис. 1 (штриховые кривые) и хорошо совпадает с экспериментальным.

Следовательно, общая ОПФ в этом случае определяется в основном параметрами оптической системы, в данном случае фокусом коллиматора и линейным размером теста. Еще нагляднее влияние оптической системы на дисперсную систему представлено на рис. 2, где приводятся графики кривых ОПФ оптической системы — 1 (в отличие от предыдущих кривых здесь угловой размер тест-объекта равен 0.1 рад, все остальные параметры оптической системы сохранены), кривые 2 и 3 характеризуют суммарную ОПФ в случае дисперсных систем с радиусами частиц 3 и 15 мкм

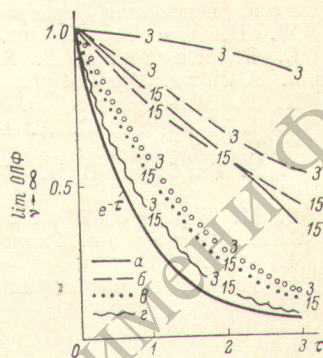


Рис. 3. Графики зависимости уровня ОПФ, к которому она стремится как к пределу при увеличении пространственной частоты ν , от оптической толщины τ для различных значений углового размера тест-объекта l .

a — 0.01, $б$ — 0.075, $в$ — 0.15, $г$ — 0.35 рад, приемная апертура имеет соответственно те же значения.

соответственно и, наконец, кривые 4 и 5 характеризуют ОПФ только ДС с теми же, что и предыдущие кривые радиусами частиц и при тех же концентрациях дисперсной фазы, которые сняты при таких условиях, когда пределы интегрирования в выражении (5) заведомо больше эффективной ширины функции $h(x)$.

Как видно по поведению кривой 1, ОПФ оптической системы для выбранного частотного диапазона практически идеальна. Сравнение суммарной ОПФ и ОПФ дисперсной системы позволяет сделать вывод, что и те и другие реагируют на изменение размера частиц (с ростом радиуса частиц полоса пропускания пространственных частот расширяется, что естественно следует из уменьшения ширины функции рассеяния). ОПФ для ДС с радиусом частиц 15 мкм (кривая 3) идет несколько ниже по тем же причинам, что и на рис. 1. В то же самое время ОПФ дисперсных систем (кривые 4 и 5) значительно чувствительнее к изменению концентрации дисперсной фазы и уровень их падения одинаков для моделей с радиусом частиц 3 и 15 мкм, поскольку одинаково ослабление.

Более наглядно характер изменения уровня падения ОПФ в зависимости от оптической толщины τ при увеличении углового размера тест-объекта представлен на рис. 3, где кривыми с цифрой 3 отмечен ход уровня ОПФ дисперсной системы с частицами радиусом 3 мкм для предельной пространственной частоты, а кривыми с цифрой 15 — с частицами радиусом 15 мкм. Для построения графиков взяты значения ОПФ на минимальном уровне и нормированы относительно чистой воды. Все измерения проводились для $\lambda = 550$ нм.

Хорошо видно, что по мере роста кривые, характеризующие ДС с различным размером частиц, сближаются и в пределе стремятся к экспоненте $e^{-\tau}$, которая приведена на том же графике. Этот предел можно рассматривать как границу влияния оптической системы. Следовательно, для соблюдения условия независимости при данной схеме эксперимента необходимо

обеспечить угловую величину объекта больше эффективной угловой ширины функции $h(x)$.

Таким образом, независимо от размера частиц предел, к которому стремится ОПФ ДС, при $\nu \rightarrow \infty$ имеет величину коэффициента пропускания $e^{-\varepsilon R}$, где ε — ослабление, характеризующееся фактором эффективности ослабления $Q=1$, т. е. когда ослабление происходит только за счет экранирования света частицами, а основная часть рассеянного в переднюю полу-сферу света собирается приемной апертурой. В этом случае оптическая система и дисперсная система становятся независимыми и возможно применение формулы (1). Это, конечно, справедливо только до той поры, пока преобладает однократное рассеяние.

Литература

- [1] В. В. Смирнов. Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения», вып. 6, 109, 1965.
- [2] Э. В. Бабак, П. Д. Иванов, В. Н. Котлецов, С. А. Родионов. Подводная фотография. «Машиностроение», Л., 1969.
- [3] W. H. Wells. J. Opt. Soc. Am., 59, 725, 1969.
- [4] L. E. Mertens, F. S. Replogle. J. Opt. Soc. Am., 67, 967, 1977.
- [5] J. Akiya. Appl. Opt., 17, 565, 1978.
- [6] R. T. Modgson, D. R. Caldwell. J. Opt. Soc. Am., 62, 1434, 1972.
- [7] П. Я. Ганич, С. А. Макаревич. Физика атмосферы и океана, 3, 325, 1972.
- [8] Э. В. Бабак, В. Н. Котлецов. Изв. вузов, приборостроение, № 9, 136, 1967.
- [9] Д. М. Браво-Животовский, Л. Б. Гордеев, Л. С. Долин, С. В. Моченов. Гидрофизические и гидрооптические исследования. «Наука», М., 1974.
- [10] А. Папулис. Теория систем и преобразований в оптике. «Мир», М., 1974.

Поступило в Редакцию 31 марта 1980 г.