«Оптика атмосферы», **1**, № 10 (1988) УДК 551.521.3:535.36

В.В. Белов, И.Ю. Макушкина

О МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНО-СИСТЕМНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКЦИЙ КАНАЛА ВИДЕНИЯ

Рассматриваются импульсные переходные характеристики линейных систем видения, полученные при решении уравнения переноса методом Монте-Карло. Исследуется влияние рассеивающих свойств мутных сред на крылья функций размытия точки. В области «больших» значений аргумента предлагается однопараметрическая аппроксимация этой функции. На основе некоторых свойств импульсных реакций предлагается методика измерения функций размытия точки в экспериментах.

Лабораторное моделирование, основанное на принципах подобия, широко применяется в различных областях науки. В теории распространения коротковолнового оптического излучения через рассеивающие среды лабораторные эксперименты успешно осуществляются для оценки границ применимости закона Бугера—Беера, для исследования теплового самовоздействия лазерных пучков, для анализа пространственно-угловых и временных распределений фона многократного рассеяния, поляризационной структуры помехи обратного рассеяния и т.д.

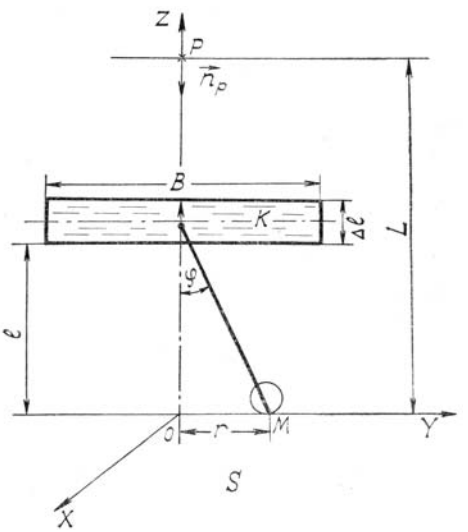

Рис. 1. Геометрическая схема определения импульсных реакций в лабораторных и численных экспериментах

В теории видения можно выделить эксперименты по наблюдению через рассеивающие среды тест-объектов (типа равноярких белых или цветных дисков Чиальди и Секки, фрагментов светящихся текстов и т.п.) и исследованию специальных системных характеристик (таких, как функции размытия точки (ФРТ), линии (ФРЛ) и т.п.). Эти характеристики, так же как и оптические передаточные функции (ОПФ), широко используются при анализе линейных оптических систем и могут быть измерены по известным методикам. Так, например, ФРТ оптических систем является изображением точечного светящегося объекта, т.е. соответствует распределению освещенности (в случае некогерентного излучения) в плоскости наблюдения. Для функции рассеяния точки оптических систем характерно то, что угловые размеры φ_0 пятна изображения (из центра выходного зрачка) $\varphi_0 \ll 1°$. В теории видения в мутных средах (таких, как атмосферный аэрозоль, гидрозоль), как правило, характерный угловой размер ФРТ $\varphi_0 \gg 1°$. Поэтому функция размытия точки $h(x, y)$ не всегда соответствует изображению точечного источника и возникают сложности измерения этих характеристик в экспериментах. Их поясняет рис. 1, где изображена геометрическая схема типичного лабораторного эксперимента по измерению ФРТ линейной системы видения, образованной предметной плоскостью (S), рассеивающей средой (K) и приемником (P). Рассеивающая среда заполняет кювету [1] или непосредственно помещается между приемником и точечным источником, в случае, например, среды типа фторопластовой пленки [2], молочного стекла [1] и т.п.

Измерение ФРТ в общем случае должно происходить по следующей схеме: фиксируется направление $\vec{n}_p$ визирования приемника с малым углом поля зрения; точечный источник M перемещается в плоскости S, измеряется яркость пропущенного в направлении приемника излучения как функции координат источника в плоскости S (возможен вариант фиксации положения точечного источника и перемещения приемника с сохранением направления визирования $\vec{n}_p$). Если в экспериментах $l \to 0$ (рис. 1), то требуемые для измерения крыльев ФРТ размеры B кюветы (или образца рассеивающей среды) и расстояния R, где $h(x, y) \neq 0$, лежат в практически осуществимых пределах. При эти требования, как правило, выполнить невозможно, если не уменьшать трассу наблюдения L. Это неизбежно ведет к существенному влиянию на ФРТ пятен рассеяния, обусловленных конечностью глубины резкости оптических систем [3], и не позволяет в полной мере воспользоваться принципом подобия для обобщения результатов экспериментальных исследований. Именно поэтому в настоящее время в лабораторных экспериментах измеряются усеченные импульсные реакции систем видения, что, если не принять специальных мер, ведет к неточностям определения ОПФ.

Рассмотрим способы устранения в лабораторных экспериментах ошибок усечения, следующих из свойств функций размытия точки линейных систем видения. Эти свойства проиллюстрируем на примерах результатов серии численных экспериментов, выполненных методом Монте-Карло. Они проведены для геометрической схемы, изображенной на рис. 1 ($B \to \infty$), для ортотропной поверхности наблюдения и оптических характеристик рассеивающей среды K, подобных аэрозольной дымке H, облаку C.1 и развитому туману (длина волны $\lambda = 0{,}55$ мкм). Методом Монте-Карло (с помощью алгоритма, построенного по сопряженной схеме с применением метода локального счета [4]) рассчитывались функции размытия точки $h(r)$ с учетом многократного рассеяния при $l \to 0$, средних значениях $0 < l < L{-}\Delta l$ и $l \to L - \Delta l$. Оптическая толщина рассеивающего слоя варьировалась в диапазоне 0,5÷12. Рассеивающие свойства модельных сред соответствовали средам со «слабой» (дымка H), «средней» (облако) и «сильной» (туман) вытянутостью индикатрисы рассеяния $g(\varphi)$ (φ — угол рассеяния). Так, для дымки H $\gamma_H = g_H(0)/g_H(\pi) \approx 143$ и коэффициента симметрии $\eta_H \approx 22{,}7$, для облачной модели $\gamma_0 \approx 4480$, $\eta_0 \approx 28{,}4$ и для модели тумана эти характеристики принимали значения $\gamma_T \approx 202778$, $\eta_T \approx 32$.

Далее рассмотрим свойства импульсных характеристик $h(r)$.

П е р в о е с в о й с т в о импульсных реакций $h(r)$ для схем наблюдения, изображенных на рис. 1, состоит в том, что

$$F(l) = 2\pi \int_0^\infty r h(r,\ l)\, dr = F_0 = \mathrm{const}, \tag{1}$$

т.е. полный боковой подсвет, который создается светящейся (отражающей) однородной поверхностью, не зависит от положения слоя на трассе наблюдения. Этот вывод следует также из работы [5]. Он становится очевидным, если для определения $h(r)$ воспользоваться следствием теоремы оптической взаимности [6, с. 291], которое утверждает, что ФРТ эквивалентна распределению освещенности, создаваемой в плоскости предметов мононаправленным источником, помещенным в точку расположения приемника в прямой схеме наблюдения.

В т о р о е с в о й с т в о $h(r)$ может быть сформулировано следующим образом:

$$h(r,\ l) = h(0,\ l)h(\varphi), \tag{2}$$

где $\varphi = \mathrm{arctg}(r/(l + \Delta l/2)$. То есть для любых произвольных значений l_1, l_2

$$\frac{h(r,l_1)}{h(r,l_2)} = \frac{h(0,l_1)}{h(0,l_2)}.$$

На рис. 2 приведены функции $h(\varphi)$, рассчитанные нами методом Монте-Карло для $t = 1/L = 0{,}05$; 0,5; 0,9 при $\tau = 1$ (кривая *1*), $\tau = 6$ (*2*) и $\tau = 12$ (*3*). Для среды со слабо выраженной вытянутостью индикатрисы рассеяния (дымка H) функции размытия точки изображены на рис. 2, *а*, для облачной среды — на рис. 2,*б* и для модели среды с сильней вытянутостью индикатрисы рассеяния (туман) на рис. 2,*в*. Расчеты показали, что в пределах их точности, характеризуемой среднеквадратическим отклонением результатов $\varepsilon \lesssim 1\%$ при $\varphi \to 1^\circ$ и $\varepsilon \lesssim 10{\div}20\%$ при $\varphi \to 90^\circ$, функции $h(\varphi)$, найденные для различных значений параметра t, совпадают.

Свойства (1)–(2) могут стать основой методики измерения импульсных переходных характеристик каналов видения, которая сводится к следующему.

Предположим, что существует интервал значений $[0,\ l_1]$ (рис. 1), где удается выполнить измерение характеристик $h(r,\ l)$ во всем диапазоне $[0,\ R]$, где $h(r,\ l) \neq 0$. В этом случае можно ограничиться измерением $h(r,\ l)$ для одного (любого) значения $\tilde{l} \in [0,\ l_1]$ и определить функцию $h(\varphi)$. При любом другом $\hat{l}$ характеристика $h(r,\ l)$ может быть построена на основе (2) с помощью найденной функции $h(\varphi)$ и дополнительного измерения $h(0,\ \hat{l}\,)$. Свойством (1) можно воспользоваться для контроля точности восстановления характеристики $h(r,\ \hat{l}\,)$.

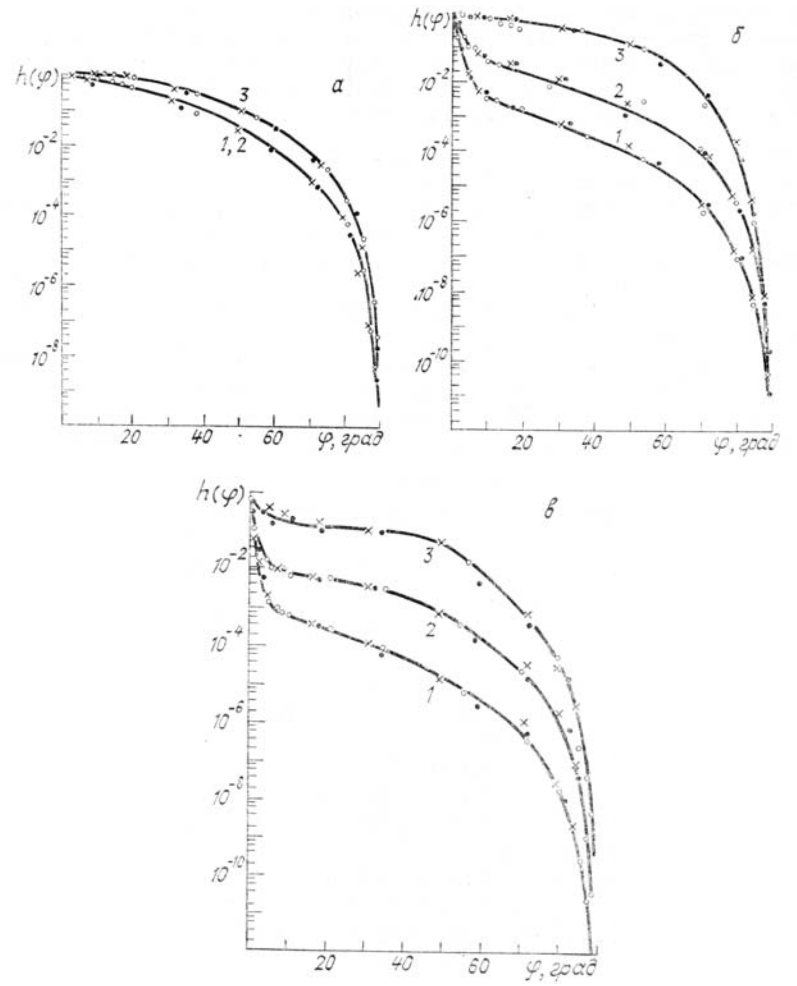

Рис. 2. Влияние геометрических условий наблюдения, оптической толщины и модели рассеивающих свойств на функцию $h(\varphi)$: *а* — дымка H, *б* — облако С.1, *в* — радиационный туман. Параметр t: —○— $t = 0{,}05$, —×— $t = 0{,}5$, —•— $t = 0{,}9$

Рассмотренный случай не исчерпывает всех возможных особенностей измерения импульсных характеристик систем видения в лабораторных условиях. Так, при работе со средами, помещенными в стеклянную кювету, отражение и переотражение от ее стенок приводит к тому, что функцию $h(r,\ l)$ с контролируемой точностью (без проведения специальных и достаточно сложных экспериментов) удается измерить только при $r \le R_1 < R$ ($\varphi \le \varphi_0 < \pi/2$).

Для мутных сред, близких по рассеивающим свойствам к атмосферным образованиям типа дымок, туманов, облаков (т.е. при значениях параметров γ и η, лежащих в интервалах 150÷200000 и 28÷32), при длинах волн излучения видимого диапазона, вероятностях выживания кванта $\Lambda \to 1$ и оптических толщинах сред $0{,}5 \lesssim \tau \lesssim 12$ проблема доопределения функций $h(\varphi)$ при $\varphi \gtrsim 15°$ может быть решена с использованием полученных нами аппроксимаций функций $h(\varphi)$. На рис. 3 приведены результаты оценивания методом Монте-Карло импульсных реакций $h(\varphi)$ при $\varphi \gtrsim 15°$, $\lambda = 0{,}53$ мкм для $\tau = 1$ (кривая *1*) и $\tau = 6$ (при этом истинные значения $h(\varphi;\ \tau = 6) = \hat{h}\,(\varphi) \cdot 10^2$, где $\hat{h}\,(\varphi)$ — кривая *2*). Значками на рис. 3 обозначены модели рассеивающих сред, для которых выполнены расчеты; функции $h(\varphi)$ нормированы на их значения при $\varphi = 15°$. Рис. 3 убеждает, что в пределах точности расчетов и графического представления результатов крылья функций $h(\varphi)$ слабо зависят от модели рассеивающей среды, если фиксированы длина волны излучения, вероятность выживания кванта и оптическая толщина среды.

$\mathrm{Lg}\,h(\varphi)$ ($15° \lesssim \varphi \lesssim 80°$) можно аппроксимировать функцией

$$f(\varphi) = -a(\varphi - \varphi_0)^2, \tag{3}$$

где $\varphi_0 = 15°$. В таблице приведены коэффициенты аппроксимации $\bar{a}$, найденные методом наименьших квадратов и усредненные по трем рассмотренным моделям рассеивающих сред. Там же приведены значения ошибок квадратичной аппроксимации (3)

$$\varepsilon = \sum_i (h(\varphi_i - f(\varphi_i))^2$$

для среды типа дымки H.

Таблица

Значения коэффициентов аппроксимации $\bar{a}$ (τ) и ошибок ε(τ)

τ	0,005	0,5	1,0	3,0	6,0	12,0
$\bar{a}$	3,30	3,25	3,19	2,87	2,74	2,30
ε	0,15	0,14	0,16	0,13	0,15	0,21

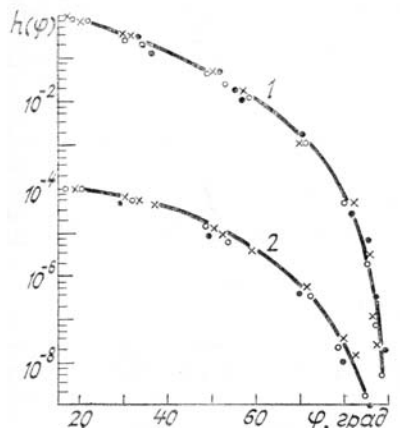

Рис. 3. Крылья функций $h(\varphi)$ при $\varphi > \varphi_0 = 15°$ для $\tau = 1$ (кривая *1*), $\tau = 6$ (истинные значения $h(\varphi, \tau = 6) = \hat{h}(\varphi, \tau = 6) \times 10^2$, где $\hat{h}(\varphi, \tau = 6)$ — кривая *2*. Обозначения: —○— дымка H, —•— облако С.1, —×— радиационный туман

Причину слабой зависимости функций $h(\varphi)$ ($15° \lesssim \varphi \lesssim 80°$) от рассеивающих свойств модельных сред поясняет рис. 4, где приведены фрагменты использованных в расчетах индикатрис рассеяния $\tilde{g}(\varphi = g(\varphi)/g(\varphi_0 = 15°)$. В то время как параметры γ и η, характеризующие степень вытянутости индикатрис рассеяния, изменяются при переходе от дымки H к туману в 1500 и 1,5 раза соответственно, относительная угловая зависимость коэффициента направленного светорассеяния в этом диапазоне углов рассеяния меняется незначительно.

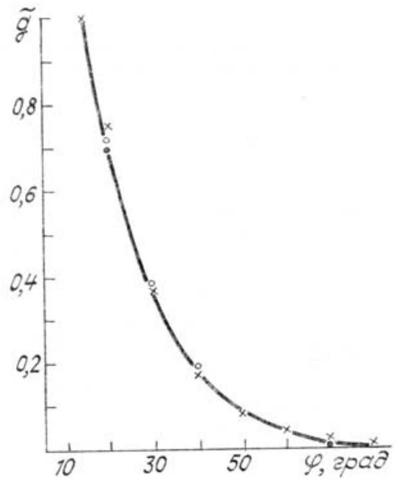

Рис. 4. Индикатрисы рассеяния $\tilde{g}(\varphi) = g(\varphi)/g(\varphi_0)$ для трех моделей рассеивающих сред. Обозначения те же, что и на рис. 3

Рассмотрим влияние аппроксимации (3) на точность определения ОПФ и сравним возникающую при этом ошибку с ошибкой «усечения» [2]. С этой целью были найдены оптические передаточные функции $K(\omega)$ по «усеченным» $h(\varphi)$ $(0° \le \varphi \le 15°)$, дополненным в области $15° \le \varphi \lesssim 80°$ функцией (3) и найденным методом Монте-Карло во всем диапазоне изменения угла φ. Пример этих функций приведен на рис. 5. Будем характеризовать ошибку вычислений $K(\omega)$ величиной

$$\delta = \frac{K(\omega) - \tilde{K}(\omega)}{K(\omega)} 100\%,$$

где $K(\omega)$ — значения ОПФ, найденные по «усеченным» ФРТ или доопределенным в области $15°° \le \varphi \lesssim 80°$ функцией $f(\varphi)$ (3). Расчеты $\delta = \delta(\tau)$ для всех рассмотренных сред и оптических толщин $0{,}005 \le \tau \le 12$ показали, что почти во всех случаях использование аппроксимации (3) приводит к заметному уменьшению ошибок вычисления $K(\omega)$по крайней мере для тех $\omega \in [0, \omega^*]$, где $K(0)/K(\omega^*) \lesssim 10 \div 20$.

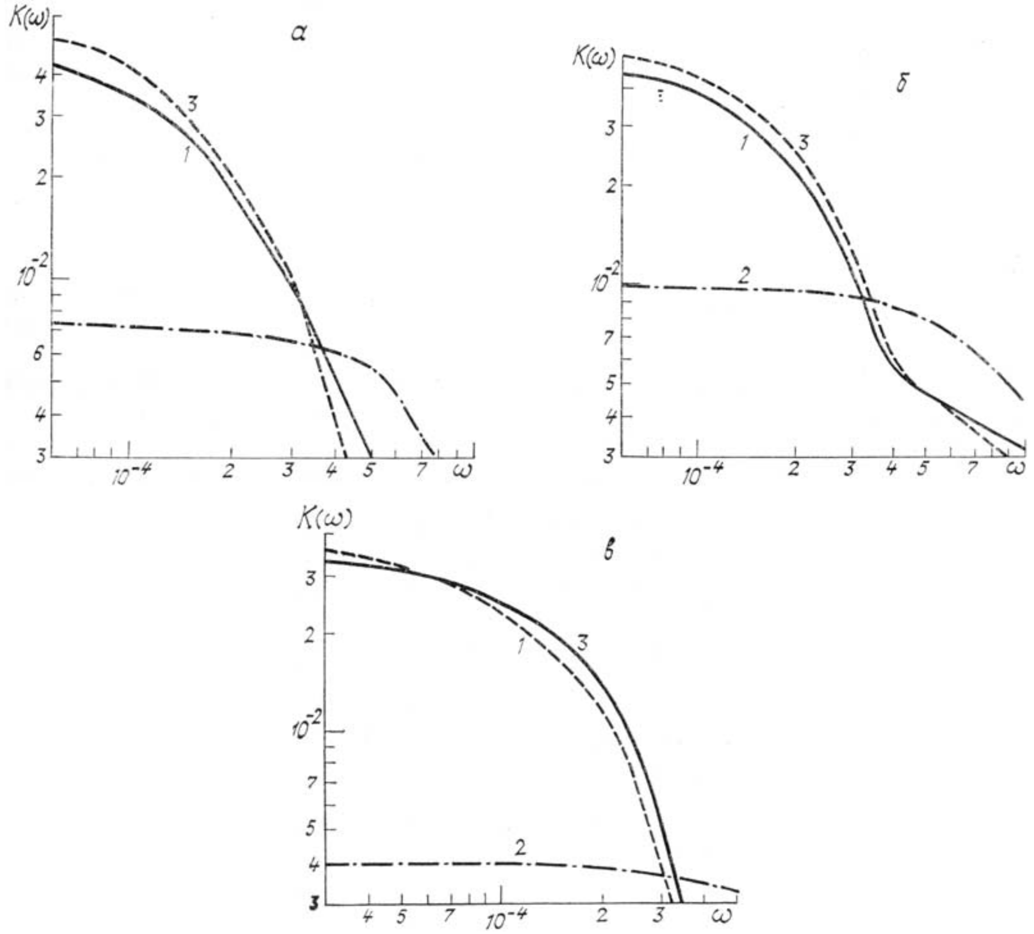

Рис. 5. Фрагменты ОПФ, соответствующих точным $h(\varphi)$ (кривые *1*), «усеченным» (кривые *2*) и доопределенным функцией (3) при $15° \le \varphi \lesssim 80°$ (кривая *3*). (*а*) — дымка *H*, $\tau = 3$, $t = 0{,}9$; (*б*) — туман, $\tau = 6$, $t = 0{,}9$; (*в*) — облако С.1, $\tau = 12$, $t = 0{,}9$

На рис. 6 приведены средние в диапазоне $[0, \omega^*]$ значения ошибок $\bar{\delta}(\tau)$ определения $K(\omega)$ по «усеченным» (кривые *1′*, *2′*) и доопределенным импульсным реакциям при $15° \le \varphi \lesssim 80°$ функциями (3) (кривые *1*, *2*). Сравнение кривых *1*, *2* и *1′*, *2′* показывает, что использование аппроксимации (3) позволяет уменьшить ошибку вычисления $K(\omega)$ более чем в 2—3 раза при $\tau \gtrsim 3 \div 4$ независимо от модели рассеивающей среды. Влияние вытянутости индикатрисы рассеяния на ошибки $\bar{\delta}(r)$ становится более заметным при $\tau \lesssim 1$, где, очевидно, аппроксимация (3) с меньшей точностью соответствует функции $h(\varphi)$.

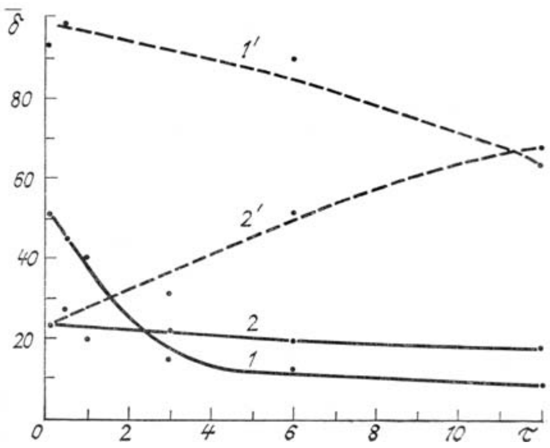

Рис. 6. Ошибки $\bar{\delta}$ оценок $K(\omega)$, найденных по «усеченным» $h(\varphi)$ (кривые *1'*, *2'*) и доопределенным функцией (3) при $15° \le \varphi \lesssim 80°$ (кривые *1*, *2*). Кривые *1*, *1'* соответствуют среде типа дымки H, кривые *2*, *2'* — туману

Выводы

На основе свойств импульсных реакций линейных систем видения в схеме наблюдения через локализованный рассеивающий слой удается построить методику их измерений, не требующую многократного повторения экспериментов при изменении положения слоя мутной среды на трассе наблюдения.

С помощью численных экспериментов установлена слабая зависимость крыльев функций размытия точки $h(\varphi)$ от степени вытянутости индикатрисы рассеяния.

В диапазоне углов $15° \lesssim \varphi \lesssim 80°$ найдена аппроксимация функции $h(\varphi)$, независящая от рассеивающих свойств рассмотренных модельных сред. Показано, что ее использование для доопределения «усеченных» функций размытия точки приводит к существенно меньшим ошибкам при расчете оптических передаточных функций систем видения.

1. Зуев В.Е., Белов В.В., Борисов Б. Д. и др. //ДАН СССР. 1982. Т. 268. № 2. С. 321—324.
2. Волнистова Л.П., Дрофа А.С. //Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 1. С. 50—57.
3. Белов В.В. //Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 4. С. 435—437.
4. Thomas R.W.L. //Adv. Space Res. 1983. V. 2. № 5. P. 157—166.
5. Дрофа А.С. //Изв. АН СССР. ФАО. 1984. Т. 20. № 10. С. 939—946.
6. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника. 1975. 503 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
11 июля 1988 г.

V.V. Belov, I.Yu. Makushkina. **On Measurement Procedure for Pulse Responses of Linear Image Transfer Systems.**

Certain properties of pulse responses inherent in linear image transmission systems are estimated on the basis of the solution to the transfer equation using the Monte-Carlo method. The effect of the scattering characteristics of turbid media on the wings of the point spread function is examined. A one-parameter approximation for the pulse responses in the range of «large» argument values is proposed. An experimental procedure for measuring the point spread function and a way to reduce the cut-off error due to the incomplete determination of pulse responses are discussed.