

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 53.072; 53.004; 535.31; 681.7; 53.082.5; 004.932

Передаточные свойства внешних каналов и изопланарность изображений в системах видения

В.В. Белов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 20.01.2009 г.

Уточняются некоторые аспекты применения линейно-системного подхода и метода функций Грина в теории видения в рассеивающих средах. Обсуждается физический смысл функций влияния и оптических передаточных функций рассеивающих сред и систем видения. Утверждается, что физический смысл понятия оптической передаточной функции, импульсной реакции (функции размытия точки или функции влияния) рассеивающих сред или канала формирования изображений в рассеивающих средах не определен, если не определены отражательные (излучательные) свойства плоскости (поверхности) объектов. Подчеркиваются основные отличия линейно-системных характеристик оптических систем формирования изображения и систем видения. Предложен критерий оценки размера периферийных зон изопланарности изображений в системах видения.

Ключевые слова: теория видения, изопланарность изображений, функции Грина; theory of vision, image isoplanarity zones, Green's functions.

Введение

Развитию современной теории видения в рассеивающих средах (началом которой послужили в том числе работы [1, 2]) посвятили свои исследования научные коллективы во Франции [3, 4], Израиле [5, 6], Беларуси [7, 8], США [9, 10], России [11–13] и других странах. Можно считать, что изучение механизмов формирования изображений, закономерностей влияния рассеивающих сред на характеристики качества изображения объектов выполнено достаточно полно и накопленные знания позволили перейти к решению задач следующего уровня, в частности, например, к более точному решению задач атмосферной коррекции многоканальных аэрокосмических изображений [14, 15].

Тем не менее остается ряд общих вопросов теории, требующих однозначного толкования. Один из них можно сформулировать следующим образом. Можно ли и как определить оптическую передаточную функцию (импульсную реакцию, или функцию размытия точки, или функцию влияния) рассеивающей среды или канала формирования изображения в рассеивающей среде, не зависящую от каких-либо свойств объектов наблюдения и характеристик пусть даже идеальных оптических систем и позволяющую построить с помощью этих характеристик изображения любых объектов? Или, иначе, — можно ли опре-

делить общие, присущие данной конкретной рассеивающей среде ее передаточные свойства (по аналогии с ее оптическими характеристиками), которые можно использовать для построения изображения объектов с любыми оптическими свойствами и любыми характеристиками пусть даже идеальных оптических систем?

Еще один вопрос возникает в связи с тем, что функция размытия точки (ФРТ), используемая в теории видения, не является, как это принято в теории оптических систем [16], изображением точечного объекта (хотя по теории видения их иногда, например в [7], отождествляют). Однако если ФРТ не является изображением точки, то как построить ее изображение, используя аппарат теории линейных систем? Решив эту задачу, мы одновременно ответим и на вопрос о том, сколько оптических передаточных функций (ОПФ) или функций влияния нужно определить, чтобы корректно осуществить реконструкцию или фильтрацию (например, атмосферную коррекцию) широкоугольных изображений объектов, наблюдаемых через рассеивающие среды.

Ответам на эти вопросы и посвящается данная статья.

Функции влияния и оптические передаточные функции рассеивающих сред

Основным уравнением, используемым в теории видения для построения ключевых функций

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

и характеристик, позволяющих выполнять анализ влияния рассеивающей среды на процесс формирования и переноса изображений, является стационарное уравнение переноса излучения

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

где ω – направление распространения излучения; I – интенсивность светового потока; β_{ext} и β_{sc} – коэффициенты ослабления и рассеяния соответственно; \mathbf{r} – координаты точки в пространстве; ω' – направление распространения излучения после рассеяния; g – индикатриса рассеяния; Φ_0 – функция источников.

Конкретная постановка задачи теории видения определяется, как известно, граничными условиями. Общее решение уравнения (1) – функция Грина $G(\mathbf{r}_0, \omega_0; \mathbf{r}, \omega)$, когда граничные условия задаются в виде мононаправленного точечного источника $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)\delta(\omega - \omega_0)$, помещенного в точку \mathbf{r}_0 и излучающего в направлении ω_0 . Пусть они соответствуют схеме «ночного» (внешние источники подсвета отсутствуют) наблюдения объектов на поверхности $z = 0$ с помощью оптической системы проективного типа, находящейся на поверхности $z = z_1$ и ориентированной, например, перпендикулярно плоскости объектов (наблюдение в надир). Тогда их можно записать в виде

$$\begin{cases} I(\mathbf{r}, \omega; z = 0) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)\delta(\omega - \omega_0), & (\omega, n) < 0, \\ I(\mathbf{r}, \omega; z = z_1) = 0, & (\omega, n_1) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где n, n_1 – внешние нормали к поверхностям $z = 0$ и $z = z_1$.

Для построения проективного или сканерного изображения объекта, наблюдаемого через рассеивающую среду в этих условиях наблюдения, достаточно знать (по крайней мере, для центральной зоны изопланарности изображения) функцию $G(\mathbf{r}_0, \omega_0; \mathbf{r}^*, \omega^*)$ лишь в центре входного зрачка оптической системы, т.е. в точке \mathbf{r}^* и для одного заданного направления ω^* . Если фиксировать ω_0 , то функция $G = G(\mathbf{r}_0, \omega_0; \mathbf{r}^*, \omega^*) = G(\mathbf{r}_0)$, с точки зрения теории линейных систем (она в данном случае применима в силу линейности уравнения (1) относительно интенсивности I), тождественна функции размытия точки $h(\mathbf{r})$, а двумерное Фурье-преобразование от нее

$$F^2[G(\mathbf{r})] \equiv F^2[h(\mathbf{r})] = \dot{H}(\omega, \gamma)$$

является оптической передаточной (в общем случае комплексной) функцией, ω, γ – пространственные частоты. Индекс «0» при \mathbf{r} здесь и далее в этом разделе, как правило, будем опускать, чтобы подчеркнуть, что это аргумент функции Грина или ФРТ, а не фиксированная точка на линии визирования оптической системы.

Являются ли функции $G(\mathbf{r}) \equiv h(\mathbf{r})$ и $\dot{H}(\omega, \gamma)$ индивидуальными характеристиками данной конкрет-

ной среды, не зависящими от свойств объектов и оптических (даже идеальных) систем? Можно ли построить с помощью функции $G(\mathbf{r})$ (или $\dot{H}(\omega, \gamma)$) изображения каких-либо объектов? Безусловно, да, но только для центральной точки плоскости изображения идеальной оптической системы, ориентированной в направлении ω^* и *только* для тех объектов, у которых каждая точка излучает световую энергию строго в направлении ω_0 . Очевидно, в окружающей нас природе сложно найти объекты, обладающие такими свойствами. Исключением может быть лишь тривиальный случай наблюдения через рассеивающую среду коллимированного лазерного пучка, распространяющегося вдоль оптической оси системы формирования изображения.

Как правило, элементарные участки природных объектов характеризуются заметно отличной от $\delta(\omega - \omega_0)$ угловой диаграммой излучения. Далее, для упрощения рассуждений будем считать, что рассматриваются однородные в оптическом смысле поверхности объектов, т.е. те объекты, у которых излучение каждой точки описывается одной и той же угловой диаграммой $Q(\omega, \mathbf{r}) = Q(\omega)$.

Таким образом, для того чтобы с помощью функций Грина описать процесс формирования изображения объектов при наблюдении через рассеивающую среду, нужно решить уравнение (1) для каждого i -го из N мононаправленных $\delta(\omega - \omega_i, \mathbf{r})$ -излучателей. Этот набор излучателей должен позволять воспроизвести реальную угловую диаграмму $Q(\omega)$ направленности излучения элементов поверхности объектов, т.е.

$$Q(\omega) \approx p_i \delta(\omega - \omega_i), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

что, в свою очередь, позволит построить суммарную ФРТ:

$$h(\mathbf{r}) = h_{\Sigma}(\mathbf{r}) \approx \sum_{i=1}^N p_i G_i(\mathbf{r}) \Delta\Omega_i, \quad (4)$$

где p_i – «вес» i -го направления излучения точечного мононаправленного источника в (3); $G_i(\mathbf{r})$ – соответствующая этому направлению функция Грина; $\Delta\Omega_i$ – телесный угол, в пределах которого предполагается, что $G_i(\mathbf{r}) = \text{const}$. Очевидно, что точность воспроизведения $h(\mathbf{r})$ зависит как от точности метода оценки $G_i(\mathbf{r})$, так и от выбора N и $\Delta\Omega_i$ в (4).

В тех случаях, когда для построения изображения требуется учет размеров кружков рассеяния, возникающих из-за особенности построения проективными системами изображений объемных объектов [17], функции Грина необходимо найти уже не для единственной точки \mathbf{r}^* и выделенного направления ω^* , а для всей плоскости входного зрачка и всех направлений в пределах полусферы. То есть необходимо найти или $G = G(\mathbf{r}, \omega; \mathbf{r}^*, \omega^*)$, где $\mathbf{r}^* \in \{R\}$ (точка в пространстве координат); $\omega^* \in \{\Omega_{1/2}\}$ (единичный вектор в полупространстве направлений), или $G = G(\mathbf{r}, \omega; \xi)$, ξ – текущая координата вдоль отрезка оптической оси приемника между центром входного зрачка и ее пересечением с плоскостью объектов.

Напомним, что в линейно-системном подходе, как он был определен, например в [18], под функцией размытия точки понимается решение уравнения (1) при следующем граничном условии:

$$\begin{cases} I(\mathbf{r}, \omega; z = 0) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)Q(\omega), & (\omega, n) < 0, \\ I(\mathbf{r}, \omega; z = z_1) = 0, & (\omega, n_1) < 0, \end{cases} \quad (5)$$

т.е. в этом случае уравнение (1) решается один раз, и это решение является функцией размытия точки, позволяющей построить, используя интеграл свертки, изображение любых оптически однородных объектов (по крайней мере, в центральной изопланарной зоне), каждая точка которых излучает по закону $Q(\omega)$.

Таким образом, метод функций Грина позволяет решать задачи теории видения в более общем виде, чем в рамках линейно-системного подхода. Однако реализовать его на практике удается далеко не всегда, учитывая, что точного решения уравнения (1), как правило, в аналитическом виде не существует (с чем приходится сталкиваться при решении конкретных задач теории видения, например в атмосфере или через нее). В тех случаях, когда трудоемкость решения уравнения (1) при граничных условиях (2) для единственного заданного направления ω_i сравнима с решением этого уравнения при граничных условиях (5), линейно-системный подход становится более эффективным. Несложно показать, как это сделано в [17], что в рамках этого подхода можно достаточно просто учесть, если необходимо, конечную глубину резкости изображаемого пространства оптической системой. В полной мере преимущества линейно-системного подхода в этом случае реализуются при решении уравнения (1) методом Монте-Карло.

Очевидно, что сделанные выше утверждения распространяются и на случай наблюдения в дневных условиях. Аналогичные рассуждения можно привести в отношении передаточных свойств канала дополнительной подсветки плоскости объектов [11] с той лишь разницей, что для этого канала нет необходимости учитывать какие-либо характеристики оптической системы, формирующей изображение. Эта функция влияния (или соответствующая ей оптическая передаточная функция) позволяет учесть процессы отражения (переотражения) излучения поверхностью объектов с последующим его рассеянием в среде в направлении этой поверхности.

Критерии оценки размеров периферийных зон изопланарности изображений

Обратимся к проблеме изопланарности изображений, сформированных при наблюдениях через рассеивающие среды. Напомним, что для идеальных оптических систем под импульсной реакцией $h(\mathbf{r})$ понимается изображение точки и она применима для описания изображения по всему кадру или полю ее зрения. Для систем видения это, как правило, не так, даже если предполагается идеальность оптического приемника. ФРТ систем видения характеризуются

значительно большей полушириной, которая можеткратно превышать размеры кадра [19].

Если известна функция влияния, определенная для центральной точки кадра, то далеко не всегда можно с требуемой точностью реконструировать изображение элементарного объекта – светящейся точки на фоне поглощающей поверхности. Этот теоретически и экспериментально установленный факт был использован в [18] для построения критериев размеров центральной зоны изопланарности в системах видения. Одновременно этот факт указывает и на принципиальное отличие физического смысла функции размытия точки, которой оперирует теория анализа оптических систем с этой же характеристикой, используемой в теории видения, где функция размытия точки не всегда соответствует изображению точечного источника.

Пусть наблюдение осуществляется через рассеивающую среду с помощью оптической (или оптико-электронной) системы с большим углом поля зрения. В этом случае уместен вопрос о том, сколько зон изопланарности можно выделить на данном изображении или сколько линейно-системных характеристик (импульсных реакций или оптических передаточных функций) нужно использовать, чтобы корректно построить с требуемой точностью изображение объектов или осуществить процедуру устранения из изображений «следа» рассеивающей среды.

Ответим на этот вопрос, используя предложенные в [18] критерии оценки размеров *центральной* зоны изопланарности изображений. Заметим, что даже если известен весь необходимый для конкретной постановки задачи набор функций Грина, мы не ответим на этот вопрос, пока не определим, используя эти функции, соответствующие импульсные реакции канала формирования изображений, т.е. пока не учтем реальных отражательных (излучательных) свойств плоскости объектов.

Изображение того или иного объекта может быть получено различными способами. Наиболее известными являются следующие процедуры [20]:

а) регистрируется яркость излучения в одном и том же фиксированном направлении в различных точках плоскости, где расположен приемник (пространственное сканирование);

б) регистрируется угловое распределение яркости в одной фиксированной точке пространства (проективные изображения);

в) изображение формируется с помощью системы растрового типа, когда по одной координате производится угловое сканирование, а по другой осуществляется перемещение самого приемника.

В общем случае при наличии рассеивающей среды между объектом и приемным устройством все три изображения будут разными, даже если предполагать идеальность оптики.

Итак, для изопланарной системы видения (или инвариантной к сдвигу [16]) при построении изображения объекта вместо бесконечного множества функций $h(x, y; x', y')$ может быть использована только одна:

$$h(x, y; x', y') = h(x - x'; y - y'). \quad (6)$$

Это существенно облегчает процесс реконструкции изображений. Однако свойством изопланарности, строго говоря, обладает лишь система, формирующая изображение по процедуре «а» и при условии горизонтальной однородности среды. Тем не менее в большинстве прикладных задач теории видения для процедур «б» и «в» можно указать области значений (x, y) , в пределах которых с определенной степенью точности выполняется соотношение (6).

В [18] предложены два критерия оценки размеров центральной изопланарной зоны (изозоны) для схемы наблюдения объектов через рассеивающий слой. Рассмотрим изображение простейшего объекта $Q(\omega; \xi, \eta) = Q(\omega)\delta(x - \xi)\delta(y - \eta)$ — точечного источника излучения, помещенного в точку (ξ, η) , формируемого методом пространственного сканирования. Тогда можем записать (предполагаем, что координаты в плоскости предметов и изображений приведены к одному масштабу):

$$\begin{aligned} q(x - \xi, y - \eta) &= \\ &= Q(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x' - \xi)\delta(y' - \eta)h(x - x', y - y')dx'dy' = \\ &= h(x - \xi, y - \eta), \end{aligned} \quad (7)$$

где ξ и η — координаты в плоскости изображений или в плоскости предметов.

Это значит, что при формировании изображения по процедуре «а» изображением точки является (с точностью до константы) ее функция размытия и изображение изопланарно по всему кадру.

Определенная для центра кадра функция размытия точки (или ОПФ) в схемах «б», «в» позволяет воспроизвести изображение любого оптически однородного объекта в единственной, а именно в центральной точке кадра. Или, иначе, если условие (6) не выполняется, т.е. изображения, сформированные по процедурам «б», «в», не являются в строгом смысле изопланарными.

На рис. 1 приведены схема формирования изображения точки через рассеивающую среду проективной оптической системой L (рис. 1, а) и схема определения ФРТ системы видения (рис. 1, б) для центральной точки кадра.

Предположим, что оптическая ось системы L направлена вдоль вектора ω_0^* (рис. 1, б), $Q(\omega) = Q(v, \varphi) = Q(v)$ (v — зенитный и φ — азимутальный угол направления ω), рассеивающая среда однородна вдоль плоскостей $z = \text{const}$. Тогда $h(\theta; \omega_0^*) = h(x, y; \omega_0^*) = h(r; \omega_0^*)$, где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, т.е. эта импульсная реакция обладает осевой симметрией и монотонно убывает с ростом аргумента:

$$0^\circ < \theta_i = \arctg(r_i/H) < 180^\circ. \quad (8)$$

Здесь θ_i — угол между направлениями ω_0^* и ω_i^* на точку A_i из центра входного зрачка оптической системы; H — расстояние между плоскостью входного зрачка оптической системы и плоскостью предметов.

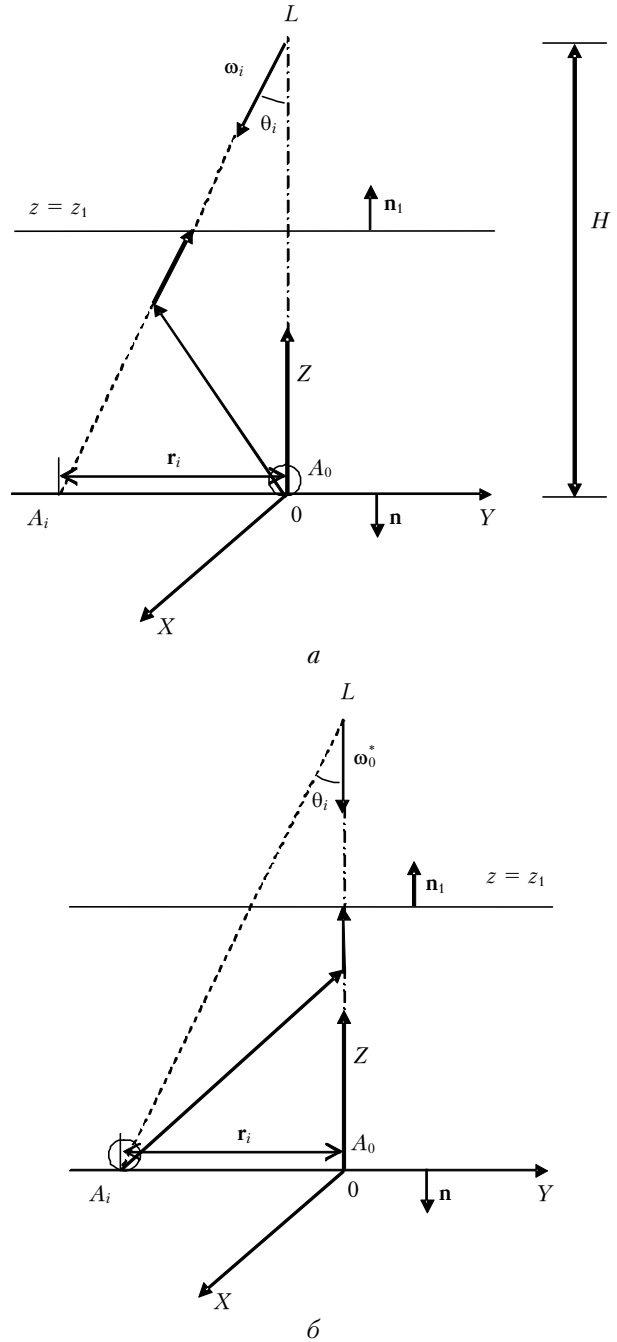


Рис. 1. Схема формирования изображения точки (а) и ФРТ для центральной изопланарной области (б)

Если определить ФРТ как зависимость яркости от угла θ_i , то меру несовпадения ФРТ $h(\theta)$ с изображением точки $q(\theta)$ можно ввести следующим образом:

$$\varepsilon(\theta) = |h(\theta; \omega_0^*) - q(\theta; \omega_0^*)| / q(\theta; \omega_0^*). \quad (9)$$

Заметим, что в данном случае $h(0) = q(0)$. Тогда угловой размер θ_{iso} центральной зоны изопланарности можно найти из условия

$$\varepsilon(\theta_{iso}; \omega_0^*) = \varepsilon_0, \quad (10)$$

а воспользовавшись (8), определить радиус $R_{iso}^0 = R_{iso}^0(\omega_0^*)$ этой области вокруг точки A_0 или (используя масштабный коэффициент) вокруг центра плоскости изображения. Увеличение уровня погрешности ε_0 предопределяет очевидным рост R_{iso}^0 .

Из приведенных в [11] данных следует, что критерий (9) очень восприимчив к вариациям оптико-геометрических параметров схемы наблюдения. Несколько более устойчив в этом отношении интегральный критерий, следуя которому размер зоны изопланарности определяется из условия

$$\delta(R_{iso}^0) = \left| \eta(R_{iso}^0) - \mathfrak{h}(R_{iso}^0) \right| / \mathfrak{h}(R_{iso}^0) = \delta_0, \quad (11)$$

где

$$\eta(R_{iso}^0) = \int_0^{R_{iso}^0} rh(r)dr, \quad \mathfrak{h}(R_{iso}^0) = \int_0^{R_{iso}^0} rq(r)dr.$$

Здесь r и θ связаны соотношением (8).

Приведенные в [11] результаты лабораторных (наблюдение через кювету с рассеивающей средой) и численных экспериментов (для схемы вертикального наблюдения через безоблачную атмосферу и при наличии сплошного облачного слоя) позволяют сделать следующие выводы. Размер центральной изозоны является сложной неоднозначной функцией оптико-геометрических условий наблюдения. Он зависит от оптической толщи среды, распределения коэффициентов рассеяния и поглощения на линии визирования, индикатрисы рассеяния. Область изопланарности $D(x, y)$ стягивается к ее центру с уменьшением ε_0 или δ_0 . В частности, в рассмотренной в [11] схеме численных экспериментов при $\varepsilon_0 \approx 20\%$ угловые размеры радиуса области $D(x, y)$ в зависимости от исходных оптико-геометрических условий принимали значения в диапазоне от единиц до десятков градусов.

Предположим, что радиус центральной изозоны меньше размеров кадра. Это значит, что мы не можем построить с требуемой точностью изображение даже точечного объекта, начиная со значений $r > R_{iso}^0$.

Следовательно, оставаясь в рамках теории линейных систем, нам нужно построить следующую импульсную реакцию $h_1(x, y; \omega_1^*)$, т.е. ФРТ для направления ω_1^* (рис. 2, б), ориентированного, например, на границу центральной изопланарной зоны. Это позволит построить изображение точечного объекта при $r > R_{iso}^0$, причем при $r = R_{iso}^0$ оно точно будет совпадать с $h_1(0, 0; \omega_1^*)$. Отметим, что ФРТ для этой изопланарной области существенно отличается от $h(r; \omega_0^*)$, определенной для центра изображения. Это отличие состоит, прежде всего, в том, что функция $h_1(x, y; \omega_1^*)$ не обладает осевой симметрией (даже если предполагать однородность оптических свойств среды в направлениях, перпендикулярных вектору ω_0^* , и осевую симметрию функции $Q(\omega)$), хотя и не зависит от азимутального угла между проекцией направления ω_1^* на плоскость $z = 0$ и любой точкой на окружности радиуса R_{iso}^0 на этой плоскости.

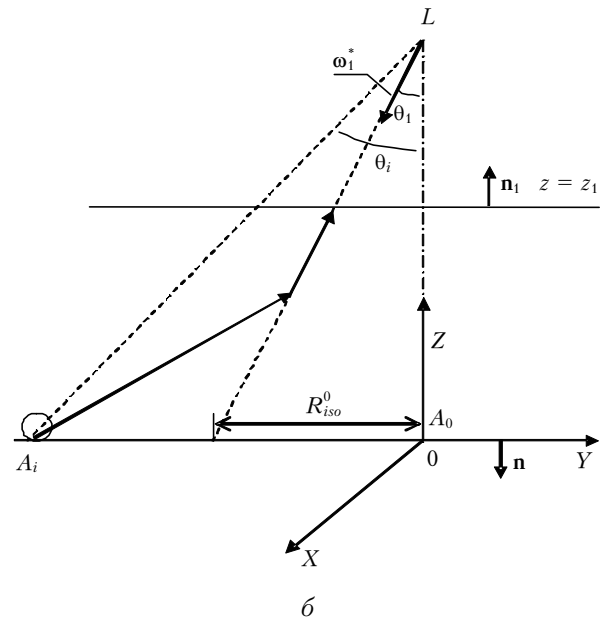
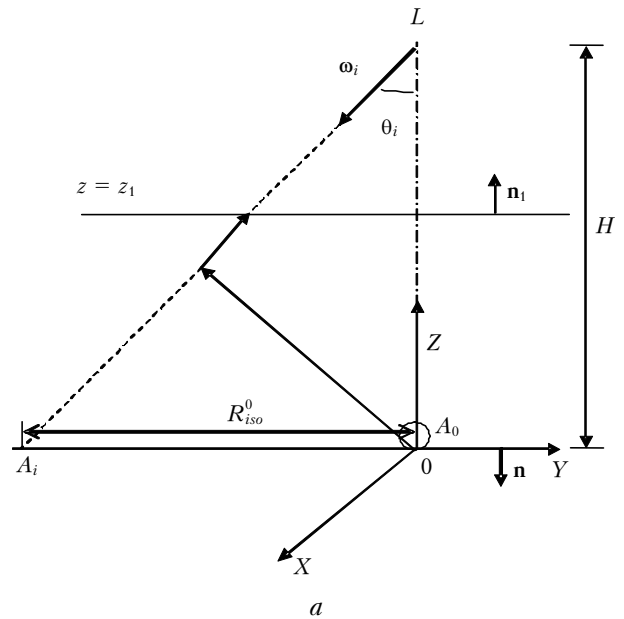


Рис. 2. Схема формирования изображения точки (а) и ФРТ для периферийной изопланарной области (б)

На рис. 3 приведен пример моделирования функции $h_1(x, y; \omega_1^*)$ для схемы наблюдения ортотропной земной поверхности из космоса через замутненную аэрозольную атмосферу, когда угол оптической оси к горизонту равен 45° .

Как видим, эта функция не обладает осевой симметрией, у нее существуют два максимума. Один из них обусловлен нерассеянным, другой – рассеянным в атмосфере излучением.

Как определить размер следующей изопланарной области изображения? На рис. 2 приведены схемы формирования изображения точки для второй изопланарной зоны (рис. 2, а) и определения импульсной реакции $h_1(x, y; \omega_1^*)$ для этой области

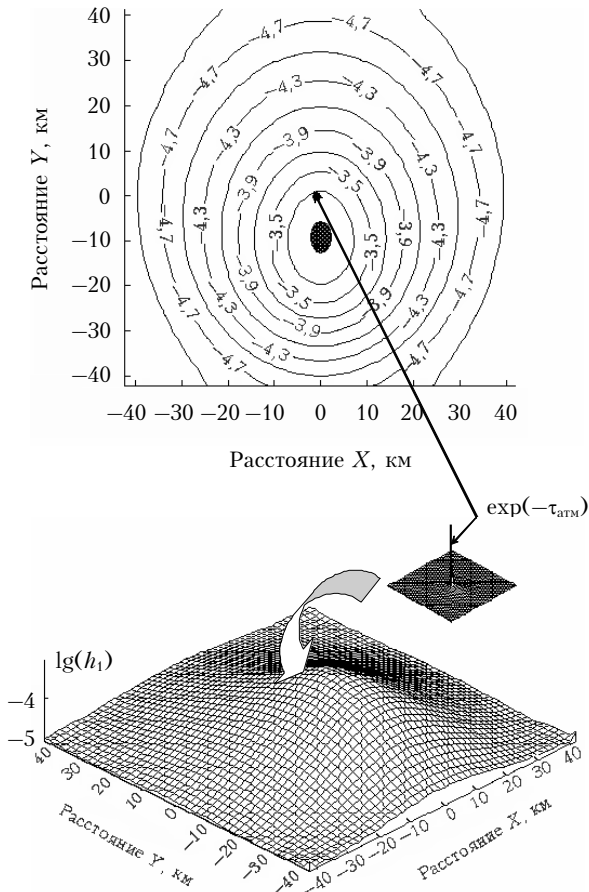


Рис. 3. Пример моделирования функции $h_i(x, y; \omega_i^*)$

(рис. 2, б). Для определения углового или линейного размера второй изопланарной области можно воспользоваться критерием (9), заменив в нем $h(\theta) = h(\theta; \omega_0^*) = h(x, y) = h(r)$ на $h_i(\theta; \omega_i^*)$. Тогда критерий оценки размеров этой зоны будет иметь вид

$$\varepsilon(\theta_{iso}^1) = \min_{\varphi} |q(\theta_{iso}^1) - h_i(\theta_{iso}^1, \varphi, \omega_i^*)| / q(\theta_{iso}^1, \omega_i^*), \quad (12)$$

где φ — азимутальный угол.

Тогда угловой размер θ_{iso}^1 второй зоны изопланарности можно найти из условия

$$\varepsilon(\theta_{iso}^1, \omega_i^*) = \varepsilon_0,$$

а линейный размер радиуса R_{iso}^1 — используя или (8), или выражение

$$\varepsilon(R_{iso}^1) = \frac{\min_{x,y} |q(R_{iso}^1) - h_i(R_{iso}^1)|}{q(R_{iso}^1)} = \varepsilon_0. \quad (13)$$

Интегральный критерий в этом случае примет вид

$$\delta(R_{iso}^1) = \frac{|\eta(R_{iso}^1, \omega_i^*) - \mathfrak{H}(R_{iso}^1, \omega_i^*)|}{\mathfrak{H}(R_{iso}^1, \omega_i^*)} = \delta_0, \quad (14)$$

где

$$\eta(R_{iso}^1, \omega_i^*) = \int_{R_{iso}^0}^{R_{iso}^1} \int_{R_{iso}^0}^{R_{iso}^1} h_i(x, y) dx dy;$$

$$\mathfrak{H}(R_{iso}^1) = 2\pi \int_{R_{iso}^0}^{R_{iso}^1} r q(r) dr.$$

Заметим, что, используя для оценки размеров всех зон изопланарности одни и те же значения ε_0 (или δ_0), мы восстановим изображение точки с одной и той же погрешностью.

Аналогично рассуждая, можно сформулировать критерии оценки размеров следующих зон изопланарности изображений. Реконструировать изображение $P(x, y)$ протяженного объекта $p(x, y)$, наблюдаемого через рассеивающую среду, в этом случае можно следующим образом:

$$P(x, y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x', y') h_0(x - x', y - y') dx' dy', & |x| \leq R_{iso}^0, \quad |y| \leq R_{iso}^0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x', y') h_1(x - x', y - y') dx' dy', & R_{iso}^0 \leq |x| \leq R_{iso}^1, \quad R_{iso}^0 \leq |y| \leq R_{iso}^1, \\ \dots \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x', y') h_n(x - x', y - y') dx' dy', & R_{iso}^{n-1} \leq |x| \leq R_{iso}^n, \quad R_{iso}^{n-1} \leq |y| \leq R_{iso}^n, \end{cases} \quad (15)$$

или, используя понятия оптических передаточных функций и пространственных спектров объектов:

$$P(x, y) = \begin{cases} F^{-2} \left[\dot{H}_0(\omega, \gamma) k(\omega, \gamma) \right], & |x| \leq R_{iso}^0, \quad |y| \leq R_{iso}^0, \\ F^{-2} \left[\dot{H}_1(\omega, \gamma) k(\omega, \gamma) \right], & R_{iso}^0 \leq |x| \leq R_{iso}^1, \quad R_{iso}^0 \leq |y| \leq R_{iso}^1, \\ \dots \\ F^{-2} \left[\dot{H}_n(\omega, \gamma) k(\omega, \gamma) \right], & R_{iso}^{n-1} \leq |x| \leq R_{iso}^n, \quad R_{iso}^{n-1} \leq |y| \leq R_{iso}^n, \end{cases} \quad (16)$$

где $H_i(\omega, \gamma)$ – ОПФ i -й изопланарной области ($i = 1, 2, \dots, n$); $k(\omega, \gamma)$ – пространственный спектр объекта; F^{-2} – обратное двумерное Фурье-преобразование.

Эти же рассуждения можно повторить, рассматривая процесс формирования изображения оптически неоднородных объектов. В этом случае плоскость объектов следует разбить на области их оптической однородности и для каждой из них определить необходимое количество оптических передаточных функций (функций размытия точки), изображение объектов сформировать, используя выражения типа (15) или (16).

Заключение

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Понятие оптической передаточной функции (импульсной реакции, функции размытия точки, или функции влияния) внешних каналов формирования и переноса изображения не определено, если не определены отражательные (излучательные) свойства поверхностей объектов.

Не существует характеристики рассеивающей среды, определяющей ее передаточные свойства и не зависящей от оптических свойств поверхности объектов.

Внешние каналы формирования и переноса изображения объектов, наблюдаемых через мутные среды, могут описываться не одной, а семейством оптических передаточных функций (функций размытия точки) в зависимости от поля зрения (или угловой амплитуды скана) оптической (оптико-электронной) системы и от количества классов оптической однородности объектов, образующих наблюдаемую сцену.

Автор благодарен к.ф.-м.н. Б.Д. Борисову, к.ф.-м.н. С.В. Афонину и к.ф.-м.н. И.Ю. Гендриной за проведение численных и лабораторных экспериментов по программе совместных исследований по теории видения.

1. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Лучинин А.Г., Савельев В.А. Некоторые вопросы теории видения в мутных средах // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1969. Т. 5. № 7. С. 672–684.
2. Левин И.М. О наблюдении объектов, освещенных узким световым пучком, в рассеивающей среде // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1969. Т. 5. № 1. С. 62–76.
3. Tanre D., Herman M., Deschamps P.Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 20. P. 3676–3684.

4. Tanre D., Herman M., Deschamps P.Y., de Leffe A. Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 21. P. 3587–3594.
5. Kopeika N.S., Solomon S., Gencay Y. Wavelength variation of visible and near-infrared resolution through the atmosphere: dependence on aerosol and meteorological conditions // J. Opt. Sci. Atmos. 1981. V. 71. N 7. P. 892–901.
6. Kopeika N.S. Effects of aerosols on imaging through the atmosphere: a review of spatial frequency and wavelength dependent effects // Opt. Engineering. 1985. V. 24. N 4. P. 707–712.
7. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1995. 328 с.
8. Кацев И.Л. Оценка характеристик видения в теплых облаках по данным об их микроструктуре // Изв. АН БССР. Сер. Физ.-мат. 1984. № 2. С. 93–98.
9. Ishimaru A. Limitation on image resolution imposed by a random medium // Appl. Opt. 1978. V. 17. N 3. P. 348–352.
10. Frazer R.S., Kaufman Y. The relative Importance of Aerosol Scattering absorption in Remote Sensing // IEEE. Trans. and Geosci. and Remote Sens. 1985. V. 23. N 5. P. 625–633.
11. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 1997. 402 с.
12. Belov V.V. Statistical modeling of imaging process in active night vision systems with gate-light detection // Appl. Phys. 2002. V. 75. N 4–5. P. 571–576.
13. Сущевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристики в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
14. Fraser R.S., Ferrare R.A., Kaufman Y.J., Mattoo S. Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery // Int. J. Remote Sens. 1992. V. 13. N 3. P. 541–557.
15. Белов В.В., Афонин С.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. 266 с.
16. Панулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 496 с.
17. Белов В.В. Статистическое моделирование изображения трехмерных объектов в задачах теории видения // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1982. Т. 18. № 4. С. 435–437.
18. Белов В.В. Теория линейных систем видения; моделирование линейно-системных характеристик // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 8. С. 787–799.
19. Белов В.В., Креков Г.М., Макушкина И.Ю. Изопланарность в системах видения // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 10. С. 1011–1018.
20. Долин Л.С., Савельев В.А. Уравнение переноса оптического изображения в рассеивающей среде // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1979. Т. 15. № 7. С. 717–723.

V. V. Belov. Optical transfer functions of external channels and image isoplanarity in vision systems.

Some aspects of application of the linear systems approach and method of the Green's functions to the theory of vision in scattering media are refined. Physical meaning of the influence function and optical transfer function of scattering media and vision systems are discussed. It is stated that the physical meaning of concepts of the optical transfer function and impulse response (point spread function or influence function) of scattering media or channel of image formation in the scattering media is uncertain if the reflection (radiation) properties of the object plane (surface) are undetermined. The main differences between the linear systems characteristics for optical imaging and vision systems are emphasized. A criterion for estimating the dimensions of peripheral image isoplanarity zones for vision systems is suggested.