

Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений

В.В. Белов^{1,2}, М.В. Тарасенков^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634034, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 31.12.2009 г.

Предложен алгоритм моделирования методом Монте-Карло функций размытия точки для внешних каналов формирования изображений при сферической модели системы «атмосфера–земная поверхность». Рассмотрен новый способ выделения зон изопланарности изображений оптически однородных протяженных объектов. Показано, что для реконструкции с заданной погрешностью изображений таких объектов на земной поверхности, наблюдаемых с помощью идеальной оптической системы из космоса, может потребоваться определение набора функций размытия точки.

Ключевые слова: статистическое моделирование функций размытия точки, сферическая геометрия, критерий выделения зон изопланарности; statistical simulation of the point spread functions, spherical geometry, criterion for detecting the isoplanarity zones.

При реконструкции изображений земной поверхности, формируемых оптической системой через атмосферу, часто используется подход, основанный на теории линейных систем [1–6]. Этот подход (например, [3, 6]) позволяет для оптически однородных поверхностей (когда диаграмма отражения или излучения не зависит от пространственных координат) определять интенсивность излучения, приходящего на входной зрачок оптической системы, при произвольном распределении коэффициента отражения по поверхности. Как правило, этот подход реализуется для случая плоской модели атмосферы. Для многих практических приложений этого приближения вполне достаточно. Однако если оптическая система ориентирована вдоль направлений, близких к горизонту, то учет сферичности геометрии необходим [7].

В связи с этим нами была поставлена задача разработки алгоритмических средств и подхода, позволяющего реконструировать аэрокосмические изображения протяженных участков земной поверхности с учетом сферической геометрии.

Постановка задачи

Геометрическая схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

Требуется восстановить изображение поверхности, регистрируемое оптической системой, распо-

ложенной на высоте h_d . Ориентация оптической системы задается углами (θ_d, φ_d) , наблюдаемая точка имеет поверхностные координаты (x_w, y_w) . Оптически однородная сферическая поверхность радиуса R_e с произвольным распределением коэффициента отражения $\rho(x_w, y_w)$ освещается Солнцем и отражает излучение по ламбертовскому закону (закон отражения может быть любым).

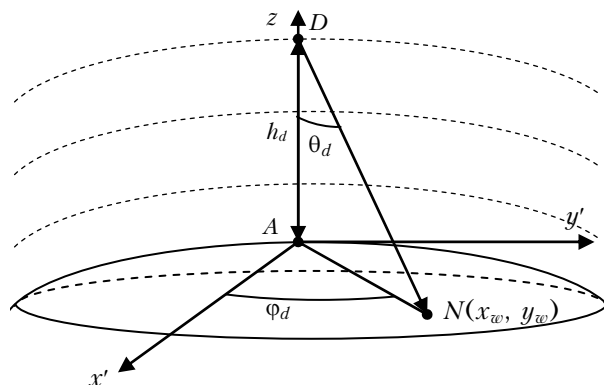


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи

Модель атмосферы задана набором оптически однородных слоев, ограниченных сферическими поверхностями, в каждом из которых для аэрозольной и молекулярной составляющих определены коэффициенты рассеяния, поглощения и индикатрисы рассеяния. Оптические характеристики молекулярной составляющей атмосферы определены из [8].

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru).

Требуется создать в рамках линейно-системного подхода алгоритм статистического моделирования функции размытия точки (ФРТ), позволяющий учесть сферичность земной поверхности и предложить методику построения изображения протяженных объектов *без ограничений на поле зрения* оптического приемника (*или поля обзора для сканирующих систем*). Напомним, что суть линейно-системного подхода, позволяющего решить поставленную задачу, сводится к следующему.

Пусть $Q(\omega)$ – диаграмма направленности отраженного излучения; $\rho(x_w, y_w)$ – распределение коэффициента отражения по поверхности; $E_0(x_w, y_w)$ – распределение освещенности Земли Солнцем, тогда светимость поверхности определится выражением

$$E(x_w, y_w) = E_0(x_w, y_w) \rho(x_w, y_w). \quad (1)$$

В этом случае пространственно-угловое распределение интенсивности излучения по поверхности будет изменяться по закону

$$I(x_w, y_w, \omega) = E_0(x_w, y_w) \rho(x_w, y_w) Q(\omega). \quad (2)$$

Используя δ -функцию Дирака, выражение (1) можно представить как

$$E(x_w, y_w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) \delta(x_w - x'_w, y_w - y'_w) dx'_w dy'_w. \quad (3)$$

Тогда (2) будет иметь вид

$$I(x_w, y_w, \omega) = Q(\omega) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) \delta(x_w - x'_w, y_w - y'_w) dx'_w dy'_w. \quad (4)$$

Канал формирования изображений через рассеивающую среду (в данном случае через атмосферу) можно рассматривать как линейную систему, так как в рамках линейной оптики интенсивность приходящего излучения изменяется пропорционально изменению интенсивности источника. Следовательно, действие линейной системы – это действие линейного оператора и тогда интенсивность в точке $(0, 0, h_d)$ в направлении (θ_d, φ_d) можно определить через интенсивность излучения поверхности по формуле

$$I'(x_w, y_w, h_d) = L[I(x_w, y_w, \omega)](x_w, y_w, h_d), \quad (5)$$

где L – линейный оператор.

Подставляя (4) в (5) и используя свойство линейности оператора L , получим

$$\begin{aligned} I'(x_w, y_w, h_d) &= L \left[Q(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) \times \right. \\ &\times \delta(x_w - x'_w, y_w - y'_w) dx'_w dy'_w \left. \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) \times \\ &\times L[Q(\omega) \delta(x_w - x'_w, y_w - y'_w)] dx'_w dy'_w = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) h(x_w, x'_w, y_w, y'_w) dx'_w dy'_w. \quad (6) \end{aligned}$$

Функция h называется функцией размытия точки. В теории линейных систем существенную роль играет свойство изопланарности, или, иначе, – инвариантности к сдвигу. Оно сводится к следующему.

Если $I'(x, y) = L[I(x, y)]$, то

$$I'(x - x_1, y - y_1) = L[I(x - x_1, y - y_1)]. \quad (7)$$

Видно, что при выполнении (7) выражение (6) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} I'(x_w, y_w, h_d) &= \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x'_w, y'_w) \rho(x'_w, y'_w) h(x_w - x'_w, y_w - y'_w) dx'_w dy'_w. \quad (8) \end{aligned}$$

Из (8) следует, что ФРТ не зависит от координат точки (x_w, y_w) . При наблюдении через рассеивающие среды это условие не всегда выполняется [3]. В этих случаях зондируемую поверхность можно разделить на области, где условие (7) приближенно выполнено. Тогда в пределах каждой из областей достаточно определить ФРТ для одной точки области, чтобы восстановить изображение фрагмента объекта в данной области. В связи с этим возникает задача разделения зондируемой поверхности на зоны изопланарности и определения ФРТ для каждой из них. Сделав это, можно, используя интеграл свертки (8), восстановить изображение всей поверхности при любом распределении коэффициента отражения по поверхности. Рассмотрим алгоритм расчета ФРТ в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности, отличный от предложенного в [6].

Алгоритм статистического моделирования импульсных реакций и подход к определению границ изопланарных зон

Алгоритм моделирования ФРТ несложно построить с помощью предложенного в [7] алгоритма расчета интенсивности отраженного от поверхности излучения для оптически однородной поверхности в сферической геометрии. Статистическое моделирование ФРТ сводится к следующему (рис. 2).

Из точки $A(0, 0, R_e)$ по закону отражения (например, ламбертовскому) с единичным весом строятся траектории движения фотонов и модели-

руется их распространение в среде по стандартному алгоритму из [9]. При каждом столкновении фотона в среде производится поворот траектории фотона так, чтобы точка последнего столкновения оказалась на линии визирования DN (рис. 2).

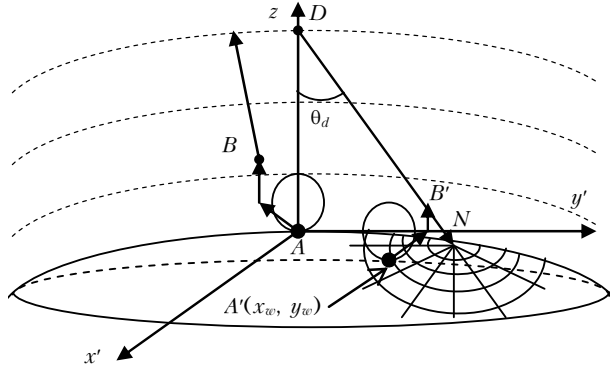


Рис. 2. Геометрическая схема статистического моделирования ФРТ

При этом точка A переместится в некоторую точку A' на поверхности с координатами (x_w, y_w) . Предварительно поверхность Земли разбивается полярной системой координат (R_w, φ_w) с центром в зондируемой точке N на ячейки. Далее определяется, в какую из ячеек попала точка A после поворота, и осуществляется локальная оценка интенсивности излучения по формуле

$$I_k = \omega_k \frac{\beta_{sc,a} g_a(\cos(\mathbf{B}\mathbf{D}, \mathbf{a}')) + \beta_{sc,m} g_m(\cos(\mathbf{B}\mathbf{D}, \mathbf{a}'))}{\beta_{ext,a} + \beta_{ext,m}} \times \exp(-\tau_{BD}), \quad (9)$$

где ω_k — вес фотона при k -м столкновении; $\beta_{sc,a}$, $\beta_{sc,m}$, $\beta_{ext,a}$, $\beta_{ext,m}$ — соответственно коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния, аэрозольного и молекулярного ослабления в точке столкновения; \mathbf{a}' — вектор направления движения фотона после поворота траектории; g_a , g_m — индикатрисы аэрозольного и молекулярного рассеяния.

Статистической оценкой интенсивности излучения в точке приема как функции $(R_{w,i}, \varphi_{w,j})$ будет

$$I_{i,j} = \frac{1}{S_{i,j}} \left(\frac{1}{N} \sum_k I_{i,j,k} \right), \quad (10)$$

где $S_{i,j}$ — площадь соответствующей ячейки; N — общее число траекторий; k — индекс суммирования по всем столкновениям; $I_{i,j,k}$ — интенсивность излучения, приходящая в точку D из ячейки (i, j) при k -м столкновении.

Очевидно, что в выбранной системе координат при наблюдении в надир и при слоисто-однородной модели атмосферы ФРТ характеризуется осевой симметрией.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма были созданы две вспомогательные программы в плоской геометрии: программа моде-

лирования ФРТ методом Монте-Карло и программа расчета ФРТ в однократном приближении на основе решения уравнения переноса излучения (УПИ).

Для плоской геометрии алгоритм статистического моделирования ФРТ строился так же, как и для сферической, за исключением того, что вместо поворота в плоской геометрии производился параллельный перенос.

В однократном приближении в осесимметричном случае это решение приводится, например, в [4] и имеет вид

$$h_1(R_w) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{h_d} \frac{\beta_{sc}(z)}{s^2(z)} \mu(R_w, z) \times \exp[-(\tau_1(z) + \tau_2(z))] g(\mu(R_w, z)) dz, \quad (11)$$

где τ_1 , τ_2 — оптические расстояния от точки столкновения до источника на поверхности и до оптической системы соответственно; h_d — высота расположения оптической системы; μ — косинус угла между вертикалью и направлением от источника в точку столкновения; s — расстояние от точки рассеяния до источника.

С использованием этих вспомогательных программ было проведено четыре серии расчетов для проверки правильности предложенного алгоритма.

Первая серия расчетов в приближении однократного рассеяния была осуществлена для сравнения интегральных характеристик ФРТ:

$$m_{00}(h_d, \theta'_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_w, y_w, h_d, \theta'_d) dx_w dy_w, \quad (12)$$

где θ'_d — угол между направлением на оптическую систему D и вертикалью в зондируемой точке N .

Расчеты проведены для следующего диапазона оптико-геометрических параметров: $\lambda = 0,35$ и $0,8$ мкм, метеорологическая дальность видимости $S_M = 1, 10, 50$ км, $h_d = 100$ км, $\theta'_d = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$.

Сравнение расчетов показало, что отличие статистических расчетов в плоской и сферической геометрии составляет не более 3%, а отличие расчетов, полученных аналитически, от статистических расчетов в сферической геометрии — не более 5%. Несколько большее отличие результатов статистического моделирования от решения по формуле (11) связано с тем, что при использовании решения УПИ интеграл в (12) определяется приближенно методом трапеций.

Во второй серии расчетов в приближении однократного рассеяния сравнивались ФРТ для частного случая: $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км, $\theta'_d = 0^\circ$. Сравнение показало, что отличие расчетов методом Монте-Карло от аналитического решения для сферической геометрии не превышает 5%, а для плоской геометрии — 2,5%.

Таким образом, эти численные эксперименты позволяют утверждать, что в данном диапазоне оптико-геометрических параметров результаты

расчетов, полученные методом Монте-Карло (при учете только первой кратности рассеяния) в плоской и сферической геометриях, и результаты, полученные при решении УПИ в приближении однократного рассеяния, совпадают в пределах погрешностей расчетов.

По результатам *третьей серии расчетов* методом Монте-Карло проведено сравнение оценок интегрального бокового подсвета m_{00} с учетом всех кратностей рассеяния для плоской и сферической геометрий. Сравнение производилось для следующего диапазона значений оптико-геометрических параметров: $\lambda = 0,35$ и $0,8$ мкм, $S_M = 1, 10, 50$ км, $h_d = 100$ км, $\theta'_d = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$. Сравнение показало, что отличие не превышает 2,5%.

Результаты *заключительной серии* расчетов позволили сравнить ФРТ, рассчитанные методом Монте-Карло для плоской и сферической ($R_e = 6371$ и 10^5 км) геометрий при $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км, $\theta'_d = 0; 75^\circ$ (табл. 1).

Таблица 1
Отличие (%) ФРТ, рассчитанных для сферической и плоской геометрий

R_e , км	θ'_d , град	
	0	75
6371	3	10
10^5	2	7

Из данных табл. 1 следует: 1) при $R_e \rightarrow \infty$ значения ФРТ для сферической геометрии стремятся к значениям ФРТ для плоской геометрии; 2) при увеличении угла θ'_d отличие расчетов плоской и сферической геометрий растет и становится существенным при $\theta'_d > 75^\circ$. На рис. 3 приведены ФРТ, полученные для сферической геометрии и нормированные на значения функции в наблюдаемой точке для $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км, $\varphi_w = 0$ и 180° , $\theta'_d = 0; 75^\circ$.

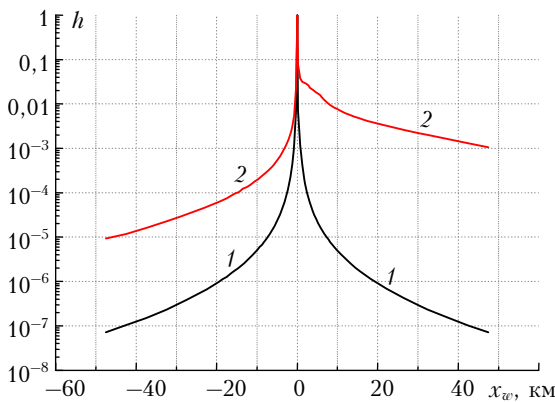


Рис. 3. Нормированные ФРТ при $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км, $\varphi_w = 0; 180^\circ$; 1 — расчет при $\theta'_d = 0^\circ$; 2 — расчет при $\theta'_d = 75^\circ$

Критерий определения границ зон изопланарности

Как уже указывалось, существуют ситуации, когда наблюдаемую поверхность необходимо разделить на области изопланарности. Если рассматривается сферически однородная атмосфера, то зоны изопланарности являются кольцами вокруг центра наблюдаемого фрагмента поверхности. В [6] предложен один из способов оценки границ изопланарных зон. Для его реализации нужно знать изображение точки. Рассмотрим другой критерий, не требующий этого знания.

Предположим, что оптическая система направлена на границу i -й зоны изопланарности и использование ФРТ предыдущей зоны для построения изображений в i -й зоне приведет к недопустимой погрешности. Эту погрешность можно определить по формуле

$$\frac{I'_i(x_w, y_w) - I'_{i+1}(x_w, y_w)}{I'_{i+1}(x_w, y_w)} = \frac{(E * h_i)(x_w, y_w) - (E * h_{i+1})(x_w, y_w)}{(E * h_{i+1})(x_w, y_w)}, \quad (13)$$

$$(E * h_i)(x_w, y_w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x_w - x'_w, y_w - y'_w) \times \rho(x_w - x'_w, y_w - y'_w) h_i(x'_w, y'_w) dx'_w dy'_w. \quad (14)$$

Здесь I'_i — интенсивность излучения, восстановленная с использованием ФРТ предыдущей зоны; I'_{i+1} — точное значение интенсивности, восстановленное с помощью ФРТ при ориентировке оптической системы на границу зоны; E — светимость поверхности; E_0 — освещенность поверхности; ρ — распределение коэффициента отражения по поверхности.

Если в (13) разложить $E(x_w - x'_w, y_w - y'_w)$ в ряд Тейлора, то получится

$$\frac{I'_i(x_w, y_w) - I'_{i+1}(x_w, y_w)}{I'_{i+1}(x_w, y_w)} = \frac{E(m_{00}^{(i)} - m_{00}^{(i+1)}) - \frac{\partial E}{\partial x_w}(m_{10}^{(i)} - m_{10}^{(i+1)}) - \frac{\partial E}{\partial y_w}(m_{01}^{(i)} - m_{01}^{(i+1)}) + \dots}{Em_{00}^{(i+1)} - \frac{\partial E}{\partial x_w}m_{10}^{(i+1)} - \frac{\partial E}{\partial y_w}m_{01}^{(i+1)} + \dots}, \quad (15)$$

где

$$m_{00}^{(i)} = m_{00}(\theta_{d,i}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(x_w, y_w) dx_w dy_w = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_w, y_w, \theta_{d,i}) dx_w dy_w, \quad (16)$$

$$m_{10}^{(i)} = m_{10}(\theta_{d,i}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(x_w, y_w) x_w dx_w dy_w = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_w, y_w, \theta_{d,i}) x_w dx_w dy_w, \quad (17)$$

$$m_{01}^{(i)} = m_{01}(\theta_{d,i}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(x_w, y_w) y_w dx_w dy_w =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_w, y_w, \theta_{d,i}) y_w dx_w dy_w. \quad (18)$$

Подобное разложение свертки встречается, например, в [2, с. 36]. Пренебрегая всеми членами разложения, кроме первого, приближенно получим выражение

$$\frac{I_i(x_w, y_w) - I_{i+1}(x_w, y_w)}{I_{i+1}(x_w, y_w)} \approx \frac{m_{00}^{(i)} - m_{00}^{(i+1)}}{m_{00}^{(i+1)}} \equiv \delta, \quad (19)$$

используя которое можно оценить относительное отличие интенсивностей, восстановленных с помощью разных ФРТ.

Интеграл $m_{00}(\theta_d)$, в свою очередь, можно аппроксимировать по углам ориентации приемной системы θ_d . Как показали расчеты, для диапазона оптико-геометрических параметров $\lambda = 0,35 \div 0,8$ мкм, $S_M = 1 \div 50$ км, $h_d \geq 10$ км, $\theta_d = 0 - 60^\circ$ можно использовать следующую аппроксимационную формулу:

$$m_{00}(\lambda_0, S_{M,0}, h_{d,0}, \theta_d) =$$

$$= m_{00}(\lambda_0, S_{M,0}, h_{d,0}, \theta_d = 0) - \exp(c)(1 - \cos \theta_d)^n, \quad (20)$$

где c, n — константы аппроксимации, определяемые методом наименьших квадратов. Для их оценки предварительно методом Монте-Карло с помощью программы, описанной в [7], проводился расчет m_{00} при $\theta_d = 0, 15, \dots, 75^\circ$.

Аппроксимация (20) при $0^\circ \leq \theta_d \leq 60^\circ$ в указанном выше диапазоне оптико-геометрических параметров характеризуется погрешностью не более 4% от расчетного значения.

Далее, если преобразовать (19) с учетом (20), то можно получить

$$\theta_{d,i+1} = m_{00}^{-1} \left[\frac{m_{00}(\theta_{d,i})}{\delta + 1} \right]. \quad (21)$$

Здесь m_{00}^{-1} — функция, обратная $m_{00}(\theta_{d,i})$.

Подставив выражение (20) в формулу (21), получим

$$\theta_{d,i+1} = \arccos \left\{ 1 - \left[\left(m_{00}(\theta_{d,0}) - \frac{m_{00}(\theta_{d,i})}{1 + \delta} \right) / \exp(c) \right]^{1/n} \right\}. \quad (22)$$

Из (22) следует критерий выделения зон изопланарности:

$$\begin{cases} m_{00}(\theta_{d,i}) = m_{00}(\theta_{d,0}) - \exp(c)(1 - \cos \theta_{d,i})^n, \\ \theta_{d,i+1} = \arccos \left\{ 1 - \left[\left(m_{00}(\theta_{d,0}) - \frac{m_{00}(\theta_{d,i})}{1 + \delta} \right) / \exp(c) \right]^{1/n} \right\}. \end{cases} \quad (23)$$

Используя (23), получим значения углов ориентации оптической системы $\theta_{d,i}$, которые и определяют границы зон изопланарности. Осуществив

расчет ФРТ для заданных $\theta_{d,i}$ и используя формулу (8), можно получить изображение наблюдаемой поверхности.

Пример восстановления изображения тестового объекта

Чтобы проиллюстрировать предложенный критерий, рассмотрим следующий пример. Пусть поверхность Земли освещена равномерно и освещенность $E_0 = 1$ Вт/(м² · мкм), $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км. Предположим также, что распределение коэффициента отражения по поверхности имеет вид (рис. 4, светлый треугольник):

$$\rho(x_w, y_w) = \begin{cases} 1, & (y_w \leq |x_w|/2) \cap (x_w \geq 0) \cap (x_w \leq 200), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (24)$$

Требуется восстановить изображение объекта вдоль оси x_w (под изображением в данном случае будем понимать угловое распределение интенсивности излучения, падающего на центр входного зрачка оптической системы).

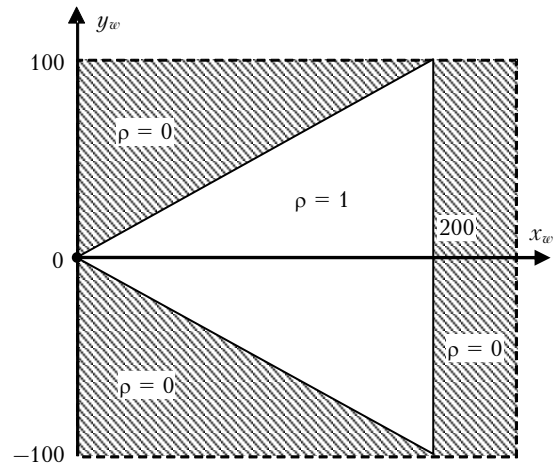


Рис. 4. Распределение коэффициента отражения по поверхности

Искомое распределение интенсивности можно получить непосредственно, не привлекая к этому теории линейных систем, а используя модифицированную программу на основе алгоритма из [7]. Эта возможность нами была реализована методом Монте-Карло, и соответствующее угловое распределение интенсивности было получено с шагом 1 км вдоль оси x . Среднеквадратическое отклонение расчетов не превышало 0,5%.

Далее нами были рассчитаны интегралы m_{00} методом Монте-Карло для набора узловых точек $\theta_d = 0, 15, \dots, 75^\circ$. Результаты расчета приведены на рис. 5 (отмечены точками). Затем определялись константы c и n методом наименьших квадратов. Они имеют следующие значения: $c = -1,868$, $m_{00}(\theta_{d,0}) = 0,201$. Получившаяся зависимость m_{00} от θ_d представлена на рис. 5 (кривая).

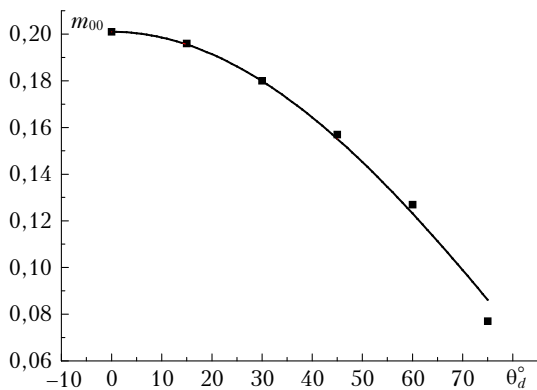


Рис. 5. Сравнение расчетных значений m_{00} (квадраты) и полученных по формуле (20) (кривая) как функции угла θ_d при $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км

Используя критерий (23), выделим зоны изопланарности для $\delta = 0,05$ (табл. 2).

Методом Монте-Карло для каждой из зон были рассчитаны ФРТ на внутренней границе зоны (в данном примере 10 функций). При расчете каждой ФРТ границы ячеек на поверхности R_w задавались с шагом 0,01; 0,5; 1; 5 км на интервалах $0 \div 0,5$; $0,5 \div 10$; $10 \div 20$; $20 \div 50$ км соответственно, φ_w выбиралась с шагом 5° .

Таблица 2

Границы зон изопланарности при $\delta = 0,05$, $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км

№ зоны изопланарности	Внешняя граница зоны	
	θ_d , град	R_w , км
1	20,6	37,6
2	29,3	56,1
3	36,0	72,7
4	41,5	88,5
5	46,3	104,6
6	50,6	121,7
7	54,4	139,7
8	57,9	159,4
9	61,1	181,1
10	>61,1	>181,1

На рис. 6 приведены результаты восстановления изображения вдоль оси x_w объекта (24) с применением ФРТ и прямым расчетом с использованием программы на основе алгоритма из [7]. Там же приведено изображение, которое получится, если использовать только первую осесимметричную ФРТ, полученную для центральной (первой) изозоны.

Из рис. 6 следует, что выбранных по критерию 10 зон изопланарности достаточно для восстановления изображения тестового объекта с погрешностью в пределах 6% при $0 \leq x_w \leq 200$ км. Также можно видеть, что использование только первой осесимметричной ФРТ приведет к большим относительным погрешностям (в пределах 25%) при восстановлении изображения.

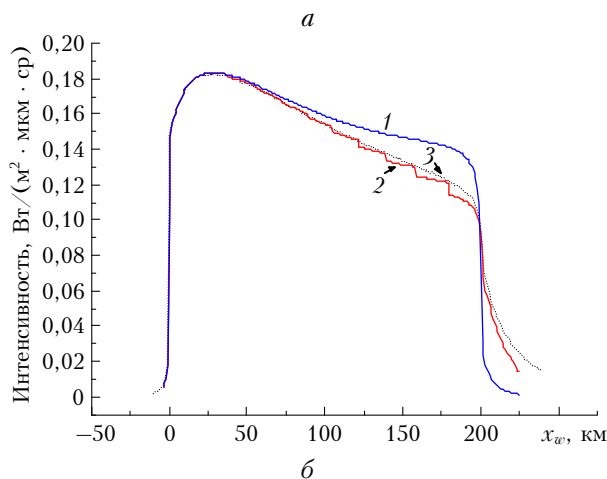
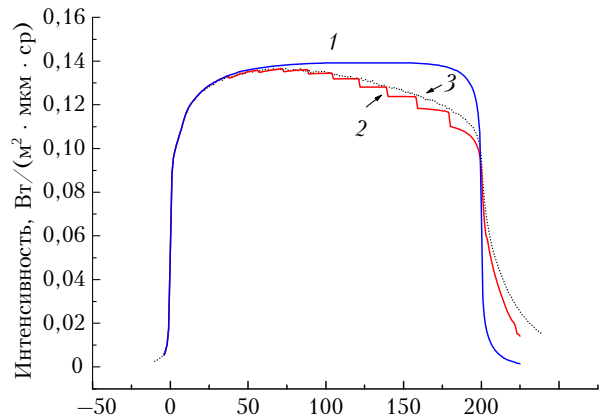


Рис. 6. Изображение тестового объекта вдоль оси x_w при $\lambda = 0,35$ мкм, $S_M = 10$ км, $h_d = 100$ км: *a* – рассеянная часть излучения; *b* – суммарное излучение (рассеянное и нерассеянное); кривая 1 – изображение, восстановленное с помощью 1-й ФРТ ($\theta_d = 0^\circ$); кривая 2 – изображение, восстановленное с помощью 10 ФРТ (см. табл. 2); кривая 3 – изображение, рассчитанное с помощью программы [7] для неоднородной поверхности с распределением коэффициента отражения поверхности (24)

Таким образом, предложенные нами алгоритм расчета методом Монте-Карло функций размытия точки для сферических моделей системы «атмосфера–земная поверхность» и критерий выделения зон изопланарности, основанный на аппроксимации интегрального бокового подсвета для набора узловых значений исходных оптико-геометрических параметров, могут быть использованы для построения изображений пространственно протяженных объектов на поле зрения оптического приемника.

1. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
2. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 496 с.
3. Зув 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.
4. Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю. Некоторые закономерности формирования помехи бокового

- подсвета в системе видения // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1. № 2. С. 18–24.
5. Белов В.В., Креков Г.М., Макушкина И.Ю. Изопланарность в системах видения // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 10. С. 1011–1018.
 6. Белов В.В. Передаточные свойства внешних каналов и изопланарность изображений в системах видения // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 12. С. 1101–1107.
 7. Белов В.В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отраженных сферической земной поверхностью // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 14–20.
 8. Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O. User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010 / Hansom AFB. MA 01731.
 9. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkov. Statistical simulation of the point spread function in the spherical atmosphere and criterion for detecting the image isoplanarity zones.

A Monte Carlo algorithm is suggested for simulation of the point spread functions of external imaging channels for the spherical model of the atmosphere – Earth's surface system. A new method for detecting the image isoplanarity zones of optically uniform extended objects is considered. It is demonstrated that a set of point spread functions can be required to restore the images of such spaceborne objects, formed on the Earth's surface by an ideal optical system, with a specified error.