

М.Л. Белов, В.М. Орлов

О СТРУКТУРЕ ОСВЕЩЕННОСТИ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ В АТМОСФЕРЕ ПОВЕРХНОСТИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ИНДИКАТРИСОЙ РАССЕЯНИЯ

Исследуется распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара при лазерном зондировании в атмосфере поверхности со сложной индикатрисой рассеяния. Получено выражение для освещенности в плоскости изображения при зондировании в оптически плотной аэрозольной атмосфере поверхности с индикатрисой рассеяния, имеющей диффузную и квазизеркальную компоненты. Показано, что распределение освещенности в плоскости изображения может существенно зависеть от соотношения диффузной и квазизеркальной компонент.

Распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара при зондировании поверхности с зеркальной или ламбертовской индикатрисой рассеяния исследовалось в ряде работ (см., например, [1–4]). Ниже рассматривается распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара при зондировании в атмосфере поверхности со сложной индикатрисой рассеяния.

Пусть зондируемая поверхность характеризуется яркостью $J(\mathbf{R}, \mathbf{m})$ [5]:

$$J(\mathbf{R}, \mathbf{m}) = \frac{E(\mathbf{R})}{\alpha \frac{2\pi}{n+2} + \beta\pi\Delta^2} \left[\alpha \cos^n \theta + \beta \exp \left\{ \frac{(\theta - \theta_0)^2 \cos^2 \theta_0 + (\varphi - \varphi_0)^2 \sin^2 \theta_0}{\Delta^2} \right\} \right], \quad (1)$$

где $E(\mathbf{R}) = AE_n(\mathbf{R})$, $E_n(\mathbf{R})$ — освещенность на поверхности, создаваемая излучением, падающим от источника; A — коэффициент отражения; α , β — коэффициенты, определяющие долю диффузного и квазизеркального отражения; n , Δ — параметры, характеризующие угловую ширину индикатрисы диффузной и квазизеркальной компонент отражения; (θ, θ_0) , (φ, φ_0) — зенитные углы и азимуты направления наблюдения и направления максимума отраженного излучения (квазизеркальной компоненты отражения). Углы θ_0 , φ_0 связаны с соответствующими углами θ_n , φ_n , характеризующими направление падающего излучения, законами геометрической оптики.

По распределению яркости $J(\mathbf{R}, \mathbf{m})$ на рассеивающей поверхности S можно определить яркость излучения, приходящего на приемник [6], и распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара [1]. Используя далее теорему взаимности в рассеивающей среде [6] и проводя вычисления, аналогичные [1], получим следующее интегральное выражение для освещенности $I(\mathbf{R}_\phi)$ в плоскости изображения приемника лидара:

$$I(\mathbf{R}_\phi) = \int_S d\mathbf{R} \int d\Omega(\mathbf{m}) \cos \theta_n J(\mathbf{R}, \mathbf{m}) J_n(\mathbf{R}, \mathbf{R}_\phi, \mathbf{m}), \quad (2)$$

где $J_n(\mathbf{R}, \mathbf{R}_\phi, \mathbf{m})$ — яркость излучения в точке \mathbf{R} поверхности S от «фиктивного» источника (с параметрами приемника, регистрирующего освещенность [1]); \mathbf{R}_ϕ — вектор в плоскости изображения приемника лидара; θ_n — угол между нормалью к поверхности S в точке \mathbf{R} и направлением на приемник.

В случае однородной рассеивающей атмосферы с сильно вытянутой индикатрисой, если угол, под которым видна приемная апертура из точек на рассеивающей поверхности, много меньше угловой ширины индикатрисы отраженного от поверхности излучения и углового разрешения приемника, выражение (2) для освещенности $I(\mathbf{R}_\phi)$ в плоскости изображения приемника лидара имеет вид (считая, что зондируемая поверхность плоская и совпадает с плоскостью XOY , а источник, приемник и их оптические оси лежат в плоскости XOZ , и используя результаты [1, 7, 8]):

$$I(\mathbf{R}_\phi) \simeq \frac{A}{\pi} \frac{1}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta\Delta^2} \left[\alpha \cos^n \theta_n \int_S d\mathbf{R} E_n(\mathbf{R}') E_n(\mathbf{R}'', \mathbf{R}_\phi) + \beta \int_S d\mathbf{R} E_n(\mathbf{R}') E_n(\mathbf{R}'', \mathbf{R}_\phi) \exp \left\{ -\frac{1}{\Delta^2} [(\sin \theta_0 - \sin \theta_n + d^2 R_x^2)^2 + s^2 R_y^2] \right\} \right], \quad (3)$$

где

$$d = \frac{A_n \cos^2 \theta_n}{B_n} + \frac{A_p \cos^2 \theta_p}{B_p}; \quad s = \frac{A_n}{B_n} + \frac{A_p}{B_p};$$

$$A_{n,p} = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha_{n,p}^2 + \sigma L_{n,p} \langle \gamma^2 \rangle}; \quad B_{n,p} = \frac{L_{n,p} \left[\frac{\alpha_{n,p}^2}{2} + \frac{\sigma L_{n,p} \langle \gamma^2 \rangle}{4} \right]}{\sqrt{\alpha_{n,p}^2 + \sigma L_{n,p} \langle \gamma^2 \rangle}};$$

$$R' = \{R_x \cos \theta_n, R_y\}; \quad R'' = \{R_x \cos \theta_p, R_y\},$$

$E_n(\mathbf{R}), E_n(\mathbf{R}, \mathbf{R}_\Phi)$ — освещенности излучения, падающего в атмосфере на поверхность от действительно-го и «фиктивного» (с параметрами приемника, регистрирующего освещенность) источников соответственно [1, 7]; L_n, L_p — расстояние от источника и приемника до поверхности; $2\alpha_n, 2\alpha_p$ — угол расходимости источника и угловое разрешение приемника; σ — показатель рассеяния атмосферы; $\langle \gamma^2 \rangle$ — дисперсия угла отклонения при элементарном акте рассеяния.

При $\beta = 0, n = 0$ формула (3) переходит в выражение для освещенности в плоскости изображения приемника при зондировании ламбертовской поверхности [1, 2]. Проведя вычисления и используя результаты [1, 2, 7], получим из (3) следующую аналитическую формулу для освещенности в плоскости изображения приемника лидара при бистатическом зондировании в атмосфере поверхности с комбинированной индикатрисой рассеяния:

$$I(\mathbf{R}_\Phi) = c [c_1 \exp \{ -R_{\Phi x}^2 b_{1x} - R_{\Phi y}^2 b_{1y} \} + c_2 \exp \{ -(R_{\Phi x} + \delta)^2 b_{2x} - R_{\Phi y}^2 b_{2y} \}], \quad (4)$$

где

$$c = \frac{1}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \frac{AP_0 \cos \theta_n \cos \theta_p r_n^2 \alpha_p^2 \exp \{ -(\varepsilon - \sigma)(L_n + L_p) \}}{\pi G_n G_p r_k^2};$$

$$c_1 = \alpha(pq)^{-1/2} \cos^n \theta_n; \quad c_2 = \beta(m\bar{n})^{-1/2} \exp(\kappa);$$

$$G_n = 4(D_n + C_n + B_n^2); \quad G_p = 4(D_p + C_p + B_p^2); \quad m = p + \frac{d^2}{\Delta^2};$$

$$p = \frac{\cos^2 \theta_n}{G_n} + \frac{\cos^2 \theta_p}{G_p}; \quad q = \frac{1}{G_n} + \frac{1}{G_p}; \quad \delta = \frac{F \cos \theta_n (\sin \theta_0 - \sin \theta_n) d}{L_n \left(\frac{\cos^2 \theta_n}{G_n} + \frac{d^2}{\Delta^2} \right) \Delta^2};$$

$$\bar{n} = q + \frac{s^2}{\Delta^2}; \quad \kappa = \frac{\cos^2 \theta_n (\sin \theta_0 - \sin \theta_n)^2 d^2}{\Delta^4 \left(p + \frac{d^2}{\Delta^2} \right) G_p \left(\frac{\cos^2 \theta_n}{G_n} + \frac{d^2}{\Delta^2} \right)} - \frac{(\sin \theta_0 - \sin \theta_n)^2 p}{\Delta^2 \left(p + \frac{d^2}{\Delta^2} \right)};$$

$$C_{n,p} = \frac{\alpha_{n,p}^2 \sigma L_{n,p}^3 \langle \gamma^2 \rangle}{16(\alpha_{n,p}^2 + \sigma L_{n,p} \langle \gamma^2 \rangle)}; \quad D_{n,p} = \frac{r_{n,p}^2}{4} + \frac{\sigma L_{n,p}^3 \langle \gamma^2 \rangle}{48};$$

$$b_{1x} = \left(\frac{L_n}{F \cos \theta_n} \right)^2 \left(\frac{G_n}{\cos^2 \theta_n} + \frac{G_p}{\cos^2 \theta_n} \right)^{-1}; \quad b_{1y} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 (G_p + G_n)^{-1};$$

$$b_{2x} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 \left(\frac{\cos^2 \theta_n}{G_n} + \frac{d^2}{\Delta^2} \right) \left(p + \frac{d^2}{\Delta^2} \right)^{-1} \frac{1}{G_p}; \quad b_{2y} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 \left(1 + \frac{s^2}{\Delta^2} G_n \right) \left(G_n + G_p + G_n G_p \frac{s^2}{\Delta^2} \right)^{-1};$$

P_0 — мощность, излучаемая источником; r_n, r_p — эффективные размеры апертур источника и приемника; r_k — эффективный кружок рассеяния приемной оптической системы; ε — показатель ослабления атмосферы.

При $\beta = 0$, $n = 0$, $\sigma = 0$ формула (4) переходит в выражение для освещенности от плоской ламбертовской поверхности в прозрачной аэрозольной атмосфере [1, 2].

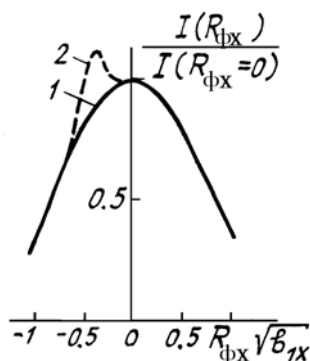


Рис. 1. Пространственное распределение освещенности в прозрачной атмосфере

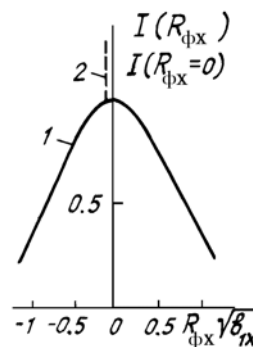


Рис. 2. Пространственное распределение освещенности в оптически плотной атмосфере

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов пространственного распределения освещенности в плоскости изображения приемника при различных значениях параметра $\gamma = \beta/\alpha$ (различном соотношении диффузной и квазизеркальной компонент индикатрисы отражения зондируемой поверхности).

Расчеты $I(\mathbf{R}_{\phi x}, \mathbf{R}_{\phi y})/I(\mathbf{R}_{\phi x} = 0, \mathbf{R}_{\phi y})$ проводились по формуле (4) при следующих значениях параметров: $n = 1$; $\theta_n = -60^\circ$; $\theta_n = 55^\circ$; $L_n = 10^4$ м; $L_n = 10^2$ м; $\alpha_n = 10^{-2}$; $\alpha_p = 10^{-2}$; $\Delta = 0,3$ $\theta_0 = -\theta_n$; $\sigma\langle\gamma^2\rangle = 0$ (рис. 1), а $\sigma\langle\gamma^2\rangle = 10^{-6}$ (рис. 2); кривая 1 — $\gamma = 0$; кривая 2 — $\gamma = 0,3$.

Из рисунков видно, что соотношение квазизеркальной и диффузной компонент индикатрисы рассеяния зондируемой поверхности оказывает значительное влияние на распределение освещенности в плоскости изображения при углах приема, близких к зеркальным. Замутненность атмосферы приводит к увеличению размера изображения (из-за увеличения освещенного пятна на рассеивающей поверхности) и относительно (по сравнению с размером всего изображения) уменьшению области на изображении, где существен вклад в эхосигнал квазизеркальной компоненты индикатрисы рассеяния поверхности.

1. Орлов В. М., Самохвалов И. В., Матвиенко Г. Г. и др. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
2. Орлов В. М., Самохвалов И. В., Креков Г. М. и др. Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
3. Белов М. Л., Орлов В. М. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 7. С. 778.
4. Белов М. Л., Орлов В. М. // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. Вып. 6. С. 1290.
5. Белов М. Л., Орлов В. М. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. № 3. С. 309–312.
6. Кейз К., Цвайфель П. Линейная теория переноса. М.: Мир, 1972. 384 с.
7. Авербах Б. Л., Орлов В. М. // Труды ЦАО. 1975. Вып. 109. С. 77.
8. Долин Л. С., Савельев В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 11. С. 1310.

Всесоюзный НИИ морского рыбного хозяйства
и океанографии, Москва

Поступила в редакцию
19 октября 1991 г.

M. L. Belov, V. M. Orlov. **Spatial Structure of Irradiance in the Image Plane of a Lidar Sounding the Surface with a Complex Reflectance through the Atmosphere.**

In this paper spatial distribution of irradiance in the image plane of a lidar receiving optics is considered for the case of laser sounding of a surface with complex reflectance through the atmosphere. An expression for the irradiance in the image plane is obtained for sounding, in a turbid aerosol atmosphere, of a surface with the reflectance composed of a diffuse and specular components. It is shown that spatial distribution of irradiance in the image plane can essentially depend on the relationship between the diffuse and specular components.