

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

М.Л. Белов

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОСВЕЩЕННОСТИ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИЕМНИКА ЛИДАРА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ В АТМОСФЕРЕ СЛУЧАЙНО-НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ИНДИКАТРИСОЙ РАССЕЯНИЯ

Исследуется пространственное распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара при бистатистическом зондировании в атмосфере случайно-неровной поверхности со сложной индикатрисой рассеяния элементарных локально-плоских участков. Получены выражения для средней освещенности, размера изображения и сдвига изображения относительно центра фотодетектора при зондировании в оптически плотной аэрозольной атмосфере поверхности с локальной индикатрисой рассеяния, имеющей диффузную и квазизеркальную компоненты. Показано, что структура освещенности существенно зависит от соотношения диффузной и квазизеркальной компонент индикатрисы рассеяния поверхности, статистических характеристик неровностей поверхности и состояния атмосферы.

Пространственная структура освещенности в плоскости изображения приемника лидара при зондировании плоской поверхности со сложной индикатрисой рассеяния исследовалась в [1]. Ниже рассматривается распределение освещенности в плоскости изображения при лидарном зондировании в атмосфере случайно-неровной поверхности с комбинированной индикатрисой рассеяния элементарных локально-плоских площадок, имеющей квазизеркальную и диффузную компоненты.

Яркость излучения, отраженного от элементарной площадки, равна [2]

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

где $E(\mathbf{R}) = AE_n(\mathbf{R})$; $E_n(\mathbf{R})$ – освещенность на площадке, создаваемая излучением, падающим от источника; A – коэффициент отражения; \mathbf{R} – пространственная координата, характеризующая положение элементарной рассеивающей площадки; α, β – коэффициенты, определяющие долю диффузного и квазизеркального отражения; n, Δ – параметры, характеризующие угловую ширину диффузной и квазизеркальной компонент индикатрисы отражения; формула (1) получена при $\Delta \ll 1$; $(\theta, \theta_0), (\varphi, \varphi_0)$ – зенитные углы и азимуты направления наблюдения и направления максимума отраженного излучения (квазизеркальной компоненты отражения) в локальной системе координат, связанной с элементарной отражающей площадкой. Углы θ_0, φ_0 связаны с соответствующими углами, характеризующими направление падающего излучения, законами геометрической оптики.

Используя результаты [2–6] и считая распределение высот и наклонов зондируемой поверхности гауссовским, аналогично [1] можно получить интегральное выражение для средней (по ансамблю поверхностей) освещенности $\bar{E}(\mathbf{R}_\psi)$ в плоскости изображения приемника лидара в общем случае бистатистического зондирования, когда источник и приемник разнесены. При этом считается, что приемник расположен достаточно далеко от рассеивающей поверхности, так что угол ψ , под которым видна приемная апертура из точек на рассеивающей поверхности (в прозрачной атмосфере $\psi \sim r_n/L_n$, где r_n – эффективный размер приемной апертуры; L_n – наклонное расстояние от приемника до освещенного пятна на рассеивающей поверхности), много меньше угловой ширины квазизеркальной компоненты индикатрисы поверхности, характерного масштаба изменения углов наклона поверхности и углового разрешения приемника.

В частном случае однородной рассеивающей атмосферы с сильно вытянутой индикатрисой [4, 5] выражение для $\overline{E}(\mathbf{R}_\phi)$ имеет вид (поверхность плавно-неровная – $\overline{\gamma}_0^2 \ll 1$; малоугловое приближение для источника и приемника; источник, приемник и их оптические оси лежат в одной плоскости XOZ ; переходим от интегрирования по неровной поверхности к интегрированию по ее проекции S_0 на плоскость $z = 0$)

$$\overline{E}(\mathbf{R}_\phi) \simeq \frac{A}{\pi} \frac{v_p^{-1/2}}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \left[\alpha \omega(\gamma_0) \int_{S_0} d^2 R_0 E_n(\mathbf{R}'_0) E_n(\mathbf{R}''_0, \mathbf{R}_\phi) K(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_\phi) + \beta G \mu^{-1} \times \right. \\ \left. \times \int_{S_0} d^2 R_0 E_n(\mathbf{R}'_0) E_n(\mathbf{R}''_0, \mathbf{R}_\phi) K(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_\phi) \exp \left\{ -\frac{\tilde{S}^2 R_{0x}^2 + (q_x + R_{0x} \tilde{t})^2}{\Delta^2 \mu} \right\} \right], \quad (2)$$

где

$$v_p = 1 + 2\sigma_0^2 \left(\frac{\sin^2 \theta_n}{4B_n^2} + \frac{\sin^2 \theta_p}{4B_p^2} \right);$$

$$\omega(\gamma_0) = m_{nz}^n (2\gamma_0^2)^{-n/4} \exp\left(\frac{1}{4\gamma_0^2}\right) \left[(2\gamma_0^2)^{-1/4} W_{\frac{-(n+1)}{4}, \frac{-(n-1)}{4}} \left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) + \frac{m_{nx} m_{nz} (n+1)}{2 m_{nz} m_{nz}} (2\gamma_0^2)^{1/4} W_{\frac{-(n+3)}{4}, \frac{-(n-3)}{4}} \left(\frac{1}{2\gamma_0^2}\right) \right];$$

$$\mu = 1 + \frac{2\gamma_0^2 q_z^2}{\Delta^2}; \quad G = \frac{(m_{nz} - m_{nx} \gamma_{mx})(m_{nz} - m_{nx} \gamma_{mx})}{m_{nz} m_{nz}};$$

$$\gamma_{mx} = -\frac{q_x q_z}{\frac{\Delta^2}{2\gamma_0^2} + q_z^2}; \quad q_z = -(\cos \theta_n + \cos \theta_p); \quad q_x = (\sin \theta_n - \sin \theta_p);$$

$$\mathbf{R}'_0 = \{R_{0x} \cos \theta_n, R_{0y}\}; \quad \mathbf{R}''_0 = \{R_{0x} \cos \theta_p, R_{0y}\};$$

$$K(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_\phi) = \exp \left\{ \frac{2\sigma_0^2}{v_p} \left[R_{0x} \frac{\sin \theta_n \cos \theta_n}{4B_n^2} + \frac{\sin \theta_n (R_{0x} \cos \theta_n - R_{\phi x} \frac{L_n}{F})}{4B_p^2} \right]^2 \right\};$$

σ_0^2, γ_0^2 – дисперсии высот и наклонов случайно-неровной поверхности;

$$\tilde{s} = A_p/B_p + A_n/B_n; \quad \tilde{t} = A_p \cos^2 \theta_n / B_p + A_n \cos^2 \theta_n / B_n;$$

$$A_{n,p} = 0,5(\alpha_{n,p}^2 + \sigma \langle s^2 \rangle L_{n,p})^{1/2}; \quad B_{n,p} = \frac{0,5 L_{n,p} (\alpha_{n,p}^2 + 0,5 \sigma \langle s^2 \rangle L_{n,p})}{(\alpha_{n,p}^2 + \sigma \langle s^2 \rangle L_{n,p})^{1/2}};$$

\mathbf{R}_ϕ – вектор в плоскости изображения приемника лидара; $E_n(\mathbf{R}), E_n(\mathbf{R}, \mathbf{R}_\phi)$ – освещенности на зондируемой поверхности от действительного и <фиктивного> источников соответственно [3, 4]; L_n, L_p – наклонные расстояния от источника и приемника до зондируемой поверхности; $2\alpha_n, 2\alpha_p$ – угол расходимости источника и угловое разрешение приемника; σ – показатель рассеяния атмосферы; $\langle s^2 \rangle$ – дисперсия угла отклонения при элементарном акте рассеяния в атмосфере; θ_n, θ_p – углы между нормалью к плоскости $z = 0$ и направлением на источник и приемник соответственно; $\mathbf{m}_n = \{m_{nx}, m_{nz}\}, \mathbf{m}_p = \{m_{px}, m_{pz}\}$ – единичные векторы, показывающие направление падающего на поверхность излучения и направление на приемник; $W_{n,m}(x)$ – функция Уиттекера; F – фокусное расстояние приемной линзы.

Вычисляя интегралы, входящие в (2), получим следующее аналитическое выражение для средней освещенности в плоскости изображения приемника лидара при зондировании в атмосфере случайно-неровной поверхности с комбинированной локальной индикатрисой рассеяния:

$$E(\mathbf{R}_\phi) \simeq c \left[c_1 \exp \{ -R_{\phi x}^2 b_{1x} - R_{\phi y}^2 b_{1y} \} + c_2 \exp \{ -R_{\phi y}^2 b_{2y} - (R_{\phi x} + \hat{\delta})^2 b_{2x} \} \right]; \quad (3)$$

где

$$c = \frac{v_p^{-1/2}}{\alpha \frac{2}{n+2} + \beta \Delta^2} \frac{A r_n^2 \alpha_p^2 \cos \theta_n \cos \theta_n P_0 \exp \{ -(\varepsilon - \sigma)(L_n + L_n) \}}{16\pi B_n^2 B_p^2 r_k^2};$$

$$c_1 = \alpha \omega(\gamma_0) q^{-1/2} \bar{p}^{-1/2};$$

$$b_{1y} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 \frac{q_p q_n}{q}; \quad b_{1x} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 q_p \left[1 - \frac{2\sigma_0^2}{v_p} \sin^2 \theta_n q_p - \frac{q_p \bar{G}^2}{\bar{p}} \right];$$

$$c_2 = \beta G \mu^{-1} \left[q + \frac{\tilde{s}^2}{\Delta^2 \mu} \right]^{-1/2} \hat{p}^{-1/2} \exp(\hat{k});$$

$$b_{2y} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 q_p \frac{\left(q_n + \frac{\tilde{s}^2}{\Delta^2 \mu} \right)}{\left(q + \frac{\tilde{s}^2}{\Delta^2 \mu} \right)}; \quad b_{2x} = \left(\frac{L_n}{F} \right)^2 q_p \left[1 - \frac{2\sigma_0^2}{v_p} \sin^2 \theta_n q_p - \frac{q_p \bar{G}^2}{\hat{p}} \right];$$

$$\hat{\delta} = \frac{L_n q_p G q_x \tilde{t}}{F \hat{p} b_{2x} \Delta^2 \mu}; \quad \hat{k} = -\frac{q_x^2 \bar{p}}{\Delta^2 \mu \hat{p}} + \hat{\delta}^2 b_{2x}; \quad \hat{p} = \bar{p} + \frac{\tilde{t}^2}{\Delta^2 \mu}; \quad \bar{p} = p - \hat{G};$$

$$\hat{G} = \frac{2\sigma_0^2}{v_p} (\sin \theta_n \cos \theta_n q_n + \sin \theta_n \cos \theta_n q_p)^2;$$

$$\bar{G} = \cos \theta_n - \sin \theta_n \frac{2\sigma_0^2}{v_p} (\sin \theta_n \cos \theta_n q_n + \sin \theta_n \cos \theta_n q_p); \quad q_p = (4 B_p^2)^{-1}; \quad q_n = (4 B_n^2)^{-1};$$

$$q = q_p + q_n; \quad p = q_p \cos^2 \theta_n + q_n \cos^2 \theta_n;$$

P_0 – мощность, излучаемая источником; r_n – эффективный размер приемной апертуры; r_k – эффективный кружок рассеяния приемной оптической системы; ε – показатель ослабления атмосферы.

При $\sigma_0, \gamma_0 \rightarrow 0$ формула (3) совпадает с формулой для освещенности при зондировании в атмосфере плоской поверхности с комбинированной индикатрисой [1]. При $\beta = 0, n = 0, \langle s^2 \rangle = 0, \sigma = 0$ формула (3) переходит в выражение для средней освещенности при зондировании в прозрачной атмосфере случайно-неровной локально-ламбертовской поверхности [7]. При $\alpha = 0, \Delta \rightarrow 0, \sigma = 0, \langle s^2 \rangle = 0$ формула (3) переходит в выражение для средней освещенности в прозрачной атмосфере от случайно-неровной локально-зеркальной поверхности [8].

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов пространственного распределения освещенности в плоскости изображения приемника при различных значениях параметра β/α и статистических характеристиках неровной поверхности. Расчеты величины $\bar{E}(R_{\phi x}, R_{\phi y} = 0) / \bar{E}(R_{\phi x} = 0, R_{\phi y} = 0)$ проводились по формуле (3) для следующих значений параметров: $n = 0; \theta_n = 60^\circ; \theta_n = 55^\circ; L_n = 10^4 \text{ м}; L_n = 10^2 \text{ м}; \alpha_n = 10^{-2}; \alpha_p = 10^{-2}; \Delta = 0,3; \sigma \langle s^2 \rangle = 0$ (рис. 1); $\sigma \langle s^2 \rangle = 10^{-6}$ (рис. 2); кривые 1, 3 – $\beta/\alpha = 0$; кривые 2, 4 – $\beta/\alpha = 0,3$; кривые 1, 2 – $\sigma_0^2 = 0, \gamma_0^2 = 0$; кривые 3, 4 – $\sigma_0^2 = 2 \text{ м}^2; \gamma_0^2 = 10^{-2}$.

Из рисунков видно, что соотношение квазизеркальной и диффузной компонент индикатрисы рассеяния зондируемой поверхности (параметр β/α) оказывает существенное влияние на структуру освещенности в плоскости изображения при углах приема, близких к зеркальным как в прозрачной (рис. 1), так и в замутненной (рис. 2) атмосфере. Случайная неровность поверхности приводит к уменьшению этого эффекта, что связано с <размытием> квазизеркальной компоненты индикатрисы рассеяния поверхности.

Замутненность атмосферы (рис. 2) приводит к относительному (по сравнению с размером всего изображения) уменьшению области на изображении, где существен вклад квазизеркальной компоненты индикатрисы рассеяния поверхности. Это связано с увеличением в атмосфере абсолютного размера изображения (прежде всего из-за размытия лазерного пучка в атмосфере и увеличения <освещенного пятна> на рассеивающей поверхности).

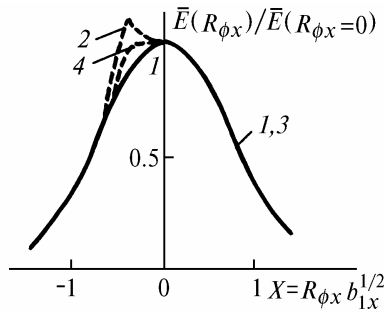


Рис. 1. Распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара в прозрачной атмосфере ($\sigma \langle s^2 \rangle = 0$)

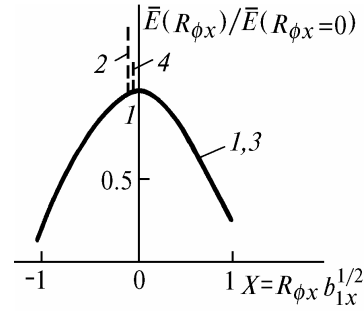


Рис. 2. Распределение освещенности в плоскости изображения приемника лидара в оптически плотной атмосфере ($\sigma \langle s^2 \rangle = 10^{-6}$)

Оценим теперь размер изображения ΔR_x и его сдвиг δR_x по оси x относительно центра фотодетектора.

Определим δR_x и ΔR_x следующим образом:

$$\delta R_x = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R_{\phi x} \bar{E}(R_{\phi x}, R_{\phi y} = 0) d R_{\phi x}}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}(R_{\phi x}, R_{\phi y} = 0) d R_{\phi x}};$$

$$\Delta R_x^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (R_{\phi x} - \delta R_x)^2 \bar{E}(R_{\phi x}, R_{\phi y} = 0) d R_{\phi x}}{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}(R_{\phi x}, R_{\phi y} = 0) d R_{\phi x}}. \quad (4)$$

Тогда из (3) в результате вычислений имеем

$$\delta R_x = - \frac{\hat{\delta} c_2 b_{2x}^{-1/2}}{c_1 b_{1x}^{-1/2} + c_2 b_{2x}^{-1/2}}; \quad (5)$$

$$\Delta R_x^2 = \frac{c_1 b_{1x}^{-1/2} [0,5 b_{1x}^{-1} + \delta R_x^2] + c_2 b_{2x}^{-1/2} [0,5 b_{2x}^{-1} + (\hat{\delta} + \delta R_x)^2]}{c_1 b_{1x}^{-1/2} + c_2 b_{2x}^{-1/2}}. \quad (6)$$

Для получения δR_y и ΔR_y^2 в формулах (5), (6) необходимо положить $\theta_n = \theta_n = 0$.

На рис. 3 приведена зависимость сдвига δR_x от параметра β/α . Расчеты проводились по формуле (5) для следующих значений параметров: $n = 0$; $\theta_n = 60^\circ$; $\theta_n = 55^\circ$; $L_n = 10^4$ м; $L_n = 10^2$ м;

$\alpha_n = 10^{-2}$; $\alpha_p = 10^{-2}$; $\Delta = 0,3$; $r_n = 10^{-2}$ м; $F = 10^{-1}$ м; кривые 1, 3 – $\sigma \langle s^2 \rangle = 0$; кривые 2, 4 – $\sigma \langle s^2 \rangle = 10^{-6}$; кривые 1, 2 – $\sigma_0^2 = 0$, $\gamma_0^2 = 0$; кривые 3, 4 – $\sigma_0^2 = 2$ м²; $\gamma_0^2 = 10^{-2}$.

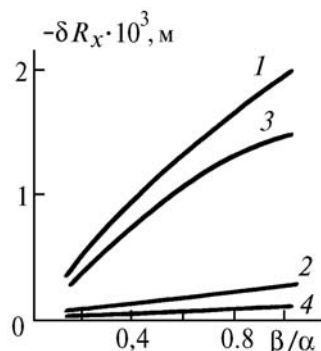


Рис. 3. Зависимость сдвига изображения относительно центра фотодетектора от параметра β/α

Из рисунка видно, что квазизеркальная компонента индикатрисы рассеяния зондируемой поверхности может привести к значительному сдвигу энергетического центра пространственного распределения освещенности в плоскости изображения.

1. Белов М.Л., Орлов В.М. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 4. С. 424–427.
2. Белов М.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 11. С. 1172–1176.
3. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация / Орлов В.М., Самохвалов И.В., Матвиенко Г.Г. и др. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
4. Авербах Б.Л., Орлов В.М. // Труды ЦАО. 1975. Вып. 109. С. 77–83.
5. Долин Л.С., Савельев В.А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1979. Т. 22. N 11. С. 1310–1317.
6. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
7. Белов М.Л., Орлов В.М. // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. Вып. 6. С. 1290–1291.
8. Белов М.Л., Орлов В.М. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 7. С. 778–780.

Всероссийский научно-исследовательский институт
морского рыбного хозяйства и океанографии
(ВНИРО) – НПП <Фирма ЭККОС>

Поступила в редакцию
23 декабря 1992 г.

M.L. Belov. Distribution of Irradiance over the Image Plane of a Lidar Receiver for Sounding in the Atmosphere of a Rough Surface with a Complex Reflectance.

In this paper spatial distribution of the irradiance over the image plane of a lidar receiver is considered for the bistatic sounding in the atmosphere of a rough surface with complex local reflectance. Expressions are obtained for the mean irradiance, dimension and shift of the image for sounding in the turbid aerosol atmosphere of surface with reflectance consisting of diffuse and specular parts. It is shown that structure of irradiance greatly depends on relation between the diffuse and specular parts of the reflectance, statistical characteristics of a surface roughnesses and state of the atmosphere.