

О МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ В АТМОСФЕРЕ СЛУЧАЙНО НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе рассматривается вопрос об энергетических характеристиках оптического сигнала при бистатистическом зондировании в атмосфере случайно неровной локально-зеркальной поверхности узким лазерным пучком. Получено аналитическое выражение для средней мощности, регистрируемой приемником. Показано, что средняя принимаемая мощность может существенно зависеть от дисперсии высот и наклонов случайно неровной поверхности.

Вопрос об энергетических характеристиках излучения, рассеянного случайно неровной поверхностью, рассматривался в ряде работ (см., например, [1–3]) в отсутствие атмосферы для моностатической схемы зондирования. Ниже исследуется мощность лидарного сигнала, регистрируемая приемником при зондировании в атмосфере случайно неровной поверхности узким лазерным пучком в бистатистической схеме (когда источник и приемник разнесены в пространстве).

Рассмотрим отражение излучения от поверхности S , состоящей из случайно ориентированных элементарных плоских площадок с зеркальным законом отражения. Размеры неровностей поверхности значительно превосходят длину волны излучения. Такая модель характерна для взволнованной морской поверхности в отсутствие пены и рассеяния света в толще воды. Запишем выражение для яркости $I_0(\mathbf{m}, \mathbf{R})$ излучения зеркально отраженного элементарной площадкой случайно неровной поверхности S (считая, что углы зондирования велики по сравнению с характерными углами наклона поверхности, так что затенениями одних элементов поверхности другими можно пренебречь):

$$I_0(\mathbf{m}, \mathbf{R}) = A(\mathbf{R}) I_{\Pi}(\mathbf{s}, \mathbf{R}), \quad (1)$$

где $\mathbf{m} = \mathbf{s} - 2\mathbf{n}(\mathbf{n}\mathbf{s})$; $A(\mathbf{R})$ — коэффициент отражения; $I_{\Pi}(\mathbf{s}, \mathbf{R})$ — яркость излучения, падающего на поверхность с направления \mathbf{s} в точке \mathbf{R} ; \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности S в точке \mathbf{R} .

По распределению $I_0(\mathbf{m}, \mathbf{R})$ можно определить яркость $I(\tilde{\mathbf{m}}, \mathbf{r})$ излучения, приходящего на приемник [4], и затем, используя теорему взаимности [4] и результаты [5], получить выражение для мощности, регистрируемой приемником. Усредняя это выражение по ансамблю поверхностей и переходя от интегрирования по неровной поверхности S к интегрированию по поверхности S_0 (проекция S на плоскость $Z = 0$) [6], для узкого пучка подсвета имеем (считая для простоты поверхность однородной: $A(\mathbf{R}) \equiv A$, а источник и приемник расположенными в одной плоскости XOZ):

$$P \simeq \frac{Aq^4}{4q_z^4} \int_{-\infty}^{\infty} dz W(\zeta) \int_{S_0} dR E_{\Pi}(R'_z) E_{\Pi}(R''_z) \times W \left[\gamma_x = -\frac{q_x}{q_z} + \frac{R_x \zeta}{q_z} \left(\frac{\sin^2 \psi}{L_{\Pi}} + \frac{\sin^2 \chi}{L_{\Pi}} \right); \gamma_y = \frac{R_y \zeta}{q_z} \left(\frac{1}{L_{\Pi}} + \frac{1}{L_{\Pi}} \right) \right],$$

где

$$q_z = \kappa (\sin \psi + \sin \chi); \quad q_x = -\kappa (\cos \psi + \cos \chi); \quad q^2 = q_x^2 + q_z^2;$$

$$R'_z = \{ [R_x \operatorname{tg} \psi + \zeta(\mathbf{R})] \cos \psi, R_y \}; \quad R''_z = \{ [R_x \operatorname{tg} \chi + \zeta(\mathbf{R})] \cos \chi, R_y \};$$

$\mathbf{R} = \{R_x, R_y\}$ — вектор в плоскости S_0 ; $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; $\zeta(\mathbf{R})$ — высота случайно неровной поверхности S в точке \mathbf{R} ; $\gamma = \nabla \zeta(\mathbf{R})$ — вектор случайных наклонов поверхности S ; $W(\gamma_x, \gamma_y)$, $W(\zeta)$ — плотности распределения наклонов и высот случайно неровной поверхности S ; $E_{\Pi}(\mathbf{R})$, $E_{\Pi}(\mathbf{R})$ — освещенности от источника и фиктивного источника (с параметрами приемника) в атмосфере в плоскостях, перпендикулярных оптическим осям источника и приемника соответственно (см. [5]); ψ , χ — угол падения излучения и угол наблюдения (отсчитываются от оси OX); L_{Π} , L_{Π} — расстояния от центра сектора наблюдения (на поверхности S_0) до источника и приемника соответственно.

Интегралы, входящие в формулу (2), можно вычислить и получить явное аналитическое выражение для P . В частности, для средней мощности, регистрируемой приемником при зондировании случайно неровной локально зеркальной поверхности в прозрачной аэрозольной атмосфере, имеем (считая распределение высот и наклонов случайных неровностей гауссовским, что характерно для взволнованной морской поверхности [7]):

$$P \approx \frac{q^4}{qz} \frac{a_{\Pi} a_{\Pi} A}{4L_{\Pi}^2 L_{\Pi}^2} \frac{1}{\sigma \sqrt{2}} \frac{1}{2(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}} \left[C_{\Pi} + C_{\Pi} + \frac{1}{R_0^2} + \frac{\kappa^2}{2\gamma_y^2 qz^2} \left(\frac{1}{L_{\Pi}} + \frac{1}{L_{\Pi}} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \\ \times d^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{qz^2}{2\gamma_x^2 qz^2} \left[1 - \frac{n}{n+m} \left(1 + \frac{(C_{\Pi} \sin \psi \cos \psi + C_{\Pi} \sin \chi \cos \chi)^2}{d} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где

$$d = \frac{1}{2\sigma^2} (n+m) + C_{\Pi} C_{\Pi} \sin^2(\psi - \chi) + (C_{\Pi} \cos^2 \psi + C_{\Pi} \cos^2 \chi) \left(\frac{1}{R_0^2} + n \right);$$

$$n = \frac{1}{2\gamma_x^2} \left(\frac{\sin^2 \psi}{L_{\Pi}} + \frac{\sin^2 \chi}{L_{\Pi}} \right)^2 \left(\frac{\kappa}{qz} \right)^2; \quad m = C_{\Pi} \sin^2 \psi + C_{\Pi} \sin^2 \chi + \frac{1}{R_0^2};$$

$$a_{\Pi} = \frac{P_0 \exp(-\tau_1)}{\pi \alpha_{\Pi}^2}; \quad C_{\Pi} = \frac{1}{\alpha_{\Pi}^2 L_{\Pi}^2}; \quad \tau_1 = \int_0^{L_{\Pi}} \sigma(z) dz;$$

$$a_{\Pi} = \pi r_{\Pi}^2 \exp(-\tau_2); \quad C_{\Pi} = \frac{1}{\alpha_{\Pi}^2 L_{\Pi}^2}; \quad \tau_2 = \int_0^{L_{\Pi}} \sigma(z) dz;$$

P_0 — мощность, излучаемая лазерным источником; $\sigma^2, \overline{\gamma_{x,y}^2}$ — дисперсии высот и наклонов случайно неровной поверхности S ; z_{Π}, R_0 — эффективные размеры приемной апертуры и лоцируемой поверхности; $2\alpha_{\Pi}, 2\alpha_{\Pi}$ — угол расходимости лазерного источника и угол обзора приемника; $\sigma(z)$ — коэффициент ослабления среды.

Если размеры освещенного пятна от источника и сектора обзора приемника на поверхности S_0 много больше σ , то в случае обратного рассеяния ($\psi = \chi, L_{\Pi} = L_{\Pi}$), при $R_0^2 \rightarrow 0$ формула (3) упрощается и в отсутствие атмосферы совпадает с результатами работ [2, 3].

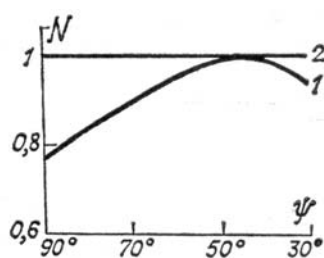


Рис. 1

На приведенном рисунке показана зависимость отношения N (принимаемой мощности P к принимаемой мощности $P(\sigma = 0)$, рассчитанной при $\sigma = 0$) от угла подсвета ψ . Расчеты проводились по формуле (3) при следующих значениях параметров:

$$C_{\Pi} = C_{\Pi} = C; \quad C \gg R_0^{-2}; \quad C \sin^2 \psi \gg \frac{1}{2\gamma_{x,y}^2} \left(\frac{1}{L_{\Pi}} + \frac{1}{L_{\Pi}} \right)^2 \left(\frac{\kappa}{qz} \right)^2;$$

$\chi = 45^\circ$; $\sigma C^{1/2} = 1$ (кривая 1); $\sigma C^{1/2} = 0,1$ (кривая 2).

Из рисунка видно, что в отличие от моностатического случая при бистатическом зондировании случайно неровной поверхности средняя принимаемая мощность существенно зависит от σ в случае, когда размеры освещенного пятна от лазерного источника и сектора обзора приемника сравнимы со среднеквадратическим значением высот случайно неровной поверхности.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе работы оптических локаторов и систем дистанционного зондирования [1, 2, 5].

1. Зурабян А.З., Тибилев А.С., Яковлев В.А. //Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 57. Вып. 6. С. 1066.
2. Лучинин А.Г. //Известия АН СССР. ФАО. 1980. Т. 16. № 3. С. 305.
3. Андреев Г.А., Черная Л.Ф. //Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 6. С. 1198.
4. Кейз К., Цвайфель П. Линейная теория переноса. М.: Мир, 1972. 384 с.
5. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Матвиенко Г.Г. и др. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация. Новосибирск: Наука. 1982. 224 с.
6. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. 1972. 424 с.
7. Оптика океана. Т. 2 /Отв. ред. А.С. Монин. М.: Наука. 1983. 325 с.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
морского рыбного хозяйства и океанографии, Москва
Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступило в редакцию
21 июля 1988 г.

M.L. Belov, V.M. Orlov, I.V. Samokhvalov. The Optical Signal Power at the Sounding of Rough Surface in the Atmosphere.

In this paper optical signal power characteristics are considered for narrow laser beam at the bistatic sounding of locally specular rough surface in the atmosphere. The expression for average received power has been obtained. It is shown that average received power may sufficiently depend on dispersion of heights of rough surface.