

М.Л. Белов

О влиянии покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром на настильных трассах зондирования морской поверхности

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
НИИ радиоэлектроники и лазерной техники

Поступила в редакцию 14.09.2004 г.

Получена формула, описывающая влияние пены на мощность лазерного сигнала на настильных трассах зондирования, и проводится ее сравнение с результатами численных расчетов для разных моделей покрытия моря пеной. Показано, что наличие пены на морской поверхности сильно влияет на мощность лазерного сигнала. Степень этого влияния существенно зависит от модели пены и углов зондирования.

Влияние покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром при непрерывном облучении морской поверхности с авиационного носителя (когда можно пренебречь затенениями одних элементов поверхности другими), исследовалось в [1, 2].

Ниже рассматривается случай настильных (близких к горизонтальным) трасс, что характерно для зондирования морской поверхности с берега. В условиях сильных затенений одних элементов морской поверхности другими получена формула, описывающая влияние покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала. Проводится сравнение полученной формулы с результатами численных расчетов для разных моделей покрытия моря пеной.

Среднюю мощность P , принимаемую лидаром при зондировании морской поверхности, частично покрытой пеной, можно представить в следующем виде [1]:

$$P = (1 - C_{\Pi})P_M + C_{\Pi}P_{\Pi}, \quad (1)$$

где P_M , P_{Π} — средние мощности эхосигнала при зондировании морской поверхности без пены и сплошь покрытой пеной; C_{Π} — доля поверхности моря, покрытой пеной.

Будем считать, что длина волны зондирующего излучения лежит в ИК-диапазоне, где поглощение водой велико, так что основная доля эхосигнала создается светом, зеркально отраженным границей «воздух — вода», а долей света, диффузно отраженного толщей воды, можно пренебречь. Модель морского волнения представляем в виде гауссовской случайной поверхности (гауссовское распределение для наклонов морской поверхности близко к экспериментально полученному [3]) с локально-зеркальным отражением элементарных участков. Участки пены считаем ламбертовскими отражателями (см., например, [4, 5]), расположенными на склонах волн,

а распределение наклонов пятен пены считаем таким же, как и распределение наклонов морских волн [5] (т.е. модель морской поверхности, сплошь покрытой пеной, представляем в виде гауссовской случайной поверхности с локально-ламбертовским отражением элементарных участков).

Интегральные формулы для $P_{M,\Pi}$ в условиях сильных затенений одних элементов морской поверхности другими представлены в [6] (считается, что источник и приемник и их оптические оси находятся в одной плоскости XOZ):

$$P_M = V^2 \frac{q^4}{4q_z^4} \int_{-\infty}^{\infty} W_a(\zeta; \theta_{\Pi}, \theta_{\Pi}) d\zeta \int_{S_0} d\mathbf{R}_0 E_{\Pi}^n(\mathbf{R}'_{0\zeta}) E_{\Pi}^n(\mathbf{R}''_{0\zeta}) \times \\ \times W \left(\gamma_x = -\frac{q_x}{q_z} - \frac{R_{0x}}{q_z} T; \gamma_y = -\frac{R_{0y}}{q_z} s \right), \quad (2)$$

$$P_{\Pi} \equiv \frac{A}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\zeta \int_{-\infty}^{\infty} W_a(\zeta; \gamma, \theta_{\Pi}, \theta_{\Pi}) d\gamma \times \\ \times \int_{S_0} \frac{d\mathbf{R}_0}{n_z} E_{\Pi}(\mathbf{R}'_{0\zeta}) E_{\Pi}(\mathbf{R}''_{0\zeta}), \quad (3)$$

где

$$s = \frac{1}{L_{\Pi}} + \frac{1}{L_{\Pi}}; \quad T = \frac{\cos^2 \theta_{\Pi}}{L_{\Pi}} + \frac{\cos^2 \theta_{\Pi}}{L_{\Pi}};$$

$$E_{\Pi}(\mathbf{R}'_{0\zeta}) = E_{\Pi}^n(\mathbf{R}'_{0\zeta})(\mathbf{nm}_{\Pi}); \quad E_{\Pi}(\mathbf{R}''_{0\zeta}) = E_{\Pi}^n(\mathbf{R}''_{0\zeta})(\mathbf{nm}_{\Pi});$$

$$q_x = \sin \theta_{\Pi} + \sin \theta_{\Pi}; \quad q_z = -(\cos \theta_{\Pi} + \cos \theta_{\Pi});$$

$$q^2 = q_x^2 + q_z^2;$$

$$\mathbf{R}'_{0\zeta} = \{[R_{0x} \text{ctg} \theta_{\Pi} - \zeta] \sin \theta_{\Pi}, R_{0y}\};$$

$$\mathbf{R}''_{0\zeta} = \{[R_{0x} \text{ctg} \theta_{\Pi} - \zeta] \sin \theta_{\Pi}, R_{0y}\};$$

если источник и приемник по одну сторону от нормали к поверхности S_0 , то

$$W_a(\zeta, \boldsymbol{\gamma}; \theta_n, \theta_n) \equiv W_a(\zeta; \theta_n, \theta_n) \Theta(\text{ctg}\theta - \gamma_x) W(\boldsymbol{\gamma}),$$

$$W_a(\zeta; \theta_n, \theta_n) \equiv W(\zeta) \exp \left\{ -\Lambda(a) \int_{\zeta}^{\infty} W(\zeta') d\zeta' \right\};$$

$$a = \frac{\text{ctg}\theta}{(\gamma_x^2)^{1/2}};$$

$$\Lambda\left(\frac{\text{ctg}\theta}{(\gamma_x^2)^{1/2}}\right) = \text{tg}\theta \int_{\text{ctg}\theta}^{\infty} (\gamma_x - \text{ctg}\theta) W(\gamma_x) d\gamma_x;$$

$$\theta = \max(\theta_n, \theta_n);$$

$\Theta(x)$ — ступенчатая функция, определяемая следующим образом:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Λ — параметр, характеризующий степень затенений. Для сильных затенений ($\Lambda \gg 1$)

$$\Lambda \approx (\overline{\gamma_x^2})^{1/2} / \sqrt{2\pi} \text{ctg}\theta,$$

где ζ , $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_x, \gamma_y)$, $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ — случайные высота, вектор наклонов и единичный вектор нормали к морской поверхности; $E_{n,n}(\mathbf{R})$ — освещенности в поперечном сечении пучков от действительного и фиктивного (с параметрами приемника) источников; $\mathbf{m}_{n,n}$ — единичные векторы, определяющие направление облучения и приема; $W(\zeta)$, $W(\boldsymbol{\gamma}) = (\gamma_x, \gamma_y)$ — функции распределения высот и наклонов поверхности; V^2 — коэффициент отражения Френеля морской поверхности без пены; A — альbedo участка поверхности, покрытого пеной; $L_{n,n}$ — наклонные расстояния от источника и приемника до поверхности; $\theta_{n,n}$ — углы между нормалью к плоскости $z = 0$ и оптическими осями источника и приемника; $W(\gamma_x)$, $\overline{\gamma_x^2}$ — функция распределения и дисперсия наклонов взволнованной морской поверхности по оси X .

В интегральных выражениях (2), (3) интегрирование проводится по поверхности S_0 (проекция случайно-неровной взволнованной морской поверхности на плоскость $z = 0$).

Интегралы в (2), (3) можно вычислить (используя ряд приближений) и получить формулы для принимаемой мощности от морской поверхности без пены (случайно-неровной локально-зеркальной поверхности) и сплошь покрытой пеной (случайно-неровной локально-лаббертовской поверхности) в условиях сильных затенений одних элементов поверхности другими (когда параметр $\Lambda \gg 1$).

В схеме моностатического зондирования ($\theta_n = \theta_n = \theta$, $L_n = L_n = L$) аналитические формулы для величин P_m , P_n имеют вид (в случае, когда высота зондирующего лазерного пучка над морской поверх-

ностью много больше среднеквадратического значения высот морского волнения; при обычно выполняющемся для лазерных систем условии — среднеквадратическое значение наклонов взволнованной морской поверхности много больше угла расходимости источника и углового поля зрения приемника):

$$P_m \equiv \frac{q^4 V^2 a_n a_n}{q_z^4 \tilde{L}^4 (\tilde{C}_n + \tilde{C}_n)} W \left(\gamma_x = -\frac{q_x}{q_z}, \gamma_y = 0 \right) \times \frac{[1 - \exp(-\Lambda(a))]}{\Lambda(a)}, \quad (4)$$

$$P_n \equiv \frac{A a_n a_n \omega}{\tilde{L}^4 (\tilde{C}_n + \tilde{C}_n)} \frac{[1 - \exp(-\Lambda(a))]}{\Lambda(a)}, \quad (5)$$

где

$$\tilde{L} = L - \mu \sin \theta; \quad \mu = \zeta_m \text{tg}\theta; \quad \zeta_m = \frac{\Lambda \sigma F(\alpha)}{\sqrt{2\pi}}; \quad \alpha = \frac{\Lambda^2}{4\pi};$$

$$F(\alpha) \approx \left\{ \frac{1}{2\alpha} \left[\ln \alpha - \ln \ln 2\alpha - \ln \left(1 - \frac{\ln \ln \alpha}{\ln \alpha} \right) \right] \right\}^{1/2}.$$

В прозрачной атмосфере

$$\tilde{C}_{n,n} = (\alpha_{n,n} \tilde{L})^{-2}; \quad a_n = \pi r_n^2, \quad a_n = \frac{P_0}{\pi \alpha_n^2};$$

σ — среднеквадратическое значение высот взволнованной морской поверхности; $\alpha_{n,n}$ — углы расходимости излучения источника и поля зрения приемника; P_0 — мощность, излучаемая источником; r_n — эффективный радиус приемной апертуры.

В приближении изотропного морского волнения (дисперсии наклонов взволнованной морской поверхности по осям X и Y равны: $\overline{\gamma_x^2} \approx \overline{\gamma_y^2} = \overline{\gamma^2}$) приближенная формула для ω в условиях сильных затенений ($\text{ctg}\theta \ll (\overline{\gamma^2})^{1/2}$) имеет вид

$$\omega \equiv \exp \left(\frac{1}{4\gamma^2} \right) \left[0,5 \cos^2 \theta \left(\frac{1}{2\gamma^2} \right)^{1/4} W_{-1/4, -1/4} \left(\frac{1}{2\gamma^2} \right) + \sin \theta \cos \theta \frac{1}{\sqrt{\pi}} W_{-1/2, -1/2} \left(\frac{1}{2\gamma^2} \right) + \sin^2 \theta (\overline{\gamma^2})^{1/2} 2^{-7/4} W_{-3/4, -3/4} \left(\frac{1}{2\gamma^2} \right) \right], \quad (6)$$

где $W_{m,n}(x)$ — функция Уиттекера.

В общем случае для ω получается более громоздким в виде ряда по степеням параметра, характеризующего анизотропность волнения:

$$\omega \equiv \frac{1}{4\sqrt{\pi} (\overline{\gamma_x^2} \overline{\gamma_y^2})^{1/2}} \exp \left(\frac{1}{2\gamma_y^2} \right) \left\{ \cos^2 \theta \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\delta^k}{k!} \left(\frac{1}{4\gamma_y^2} \right)^k \right\} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \Gamma(k+0,5) G_{12}^{20} \left(\frac{1}{2\gamma_y^2} \middle| \begin{matrix} 0,5 \\ -k-0,5; 0 \end{matrix} \right) + 2 \cos \theta \sin \theta \times \\ & \times \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\delta^k}{k!} \left(\frac{1}{4\gamma_y^2} \right)^k \Gamma(k+1) G_{23}^{30} \left(\frac{1}{2\gamma_y^2} \middle| \begin{matrix} 0; 0,5 \\ -k-1; 0; 0 \end{matrix} \right) + \sin^2 \theta \times \\ & \times \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\delta^k}{k!} \left(\frac{1}{4\gamma_y^2} \right)^k \Gamma(k+1,5) G_{12}^{20} \left(\frac{1}{2\gamma_y^2} \middle| \begin{matrix} 0,5 \\ -k-1,5; 0 \end{matrix} \right) \}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\delta = 2 \left(\frac{\gamma_y^2}{\gamma_x^2} - 1 \right)$; $\Gamma(k)$ — гамма-функция;

$G_{p,q}^{m,n} \left(z \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right)$ — функция Мейера.

Для расчета P_m и P_n , как и в работе [2], использованы результаты статистической обработки данных наблюдений (в различных климатических зонах Мирового океана) относительных площадей покрытия поверхности моря пеной C_n . Полученные в результате статистической обработки данных эмпирические соотношения (они сильно зависят от региона измерения и температуры поверхности воды T_b) представлены в виде трех моделей зависимости C_n от скорости приводного ветра U в таблице [7, 8].

В третьем столбце таблицы параметр U_b — некоторая величина скорости приводного ветра, начиная с которой на поверхности моря появляется пена. Параметр T_b — температура поверхности воды, определяющая значение U_b согласно приведенной эмпирической формуле.

Отражение пены измерялось в работе [9], и оказалось, что в диапазоне длин волн 0,5–1 мкм альbedo пены $A \approx 0,5$.

На рис. 1 показано, как изменяется величина принимаемой мощности $P = (1 - C_n)P_m + C_nP_n$ в зависимости от скорости ветра U . Расчеты проводились при моностатическом зондировании для моделей пены, приведенных в таблице, при следующих значениях параметров: $V^2 = 0,02$; $A = 0,5$; $P_0 = 1$ Вт; $\alpha_n = 0,5$ мрад; $\alpha_n = 1$ мрад.

В диапазоне скоростей приводного ветра, для которого проведены расчеты (6–18 м/с), среднеквадратическое значение наклонов морской поверхности меняется от 0,14 до 0,24 [3], что при $\theta = 89^\circ$ соответствует значениям параметра Λ (характеризующего затенения) примерно от 2,5 до 5, а при $\theta = 89,5^\circ$ — от 5 до 10.

При расчете по аналитической формуле (5) учитывали, что морская поверхность — плавноровная ($(\gamma^2)^{1/2} \ll 1$), и величину ω аппроксимировали следующим выражением (на основе асимптотического ряда для функций Уиттекера $W_{m,n}(x)$):

$$\omega \approx 0,5 \cos^2 \theta + 2 \sqrt{\frac{\gamma^2}{2\pi}} \sin \theta \cos \theta + 0,5 \gamma^2 \sin^2 \theta.$$

Дисперсии наклонов морской поверхности $\overline{\gamma_{x,y}^2}$ вычислялись по формулам Кокса и Манка [3], а среднеквадратическое значение высот по формуле [10]: $\sigma \approx 0,016U^2$.

Результаты расчетов величины P по формулам (1), (4), (5) показаны на рис. 1 сплошными линиями. Кружки — результаты численных расчетов по формулам (1)–(3). Пунктирные линии — результаты расчетов величины P без учета затенений (с использованием результатов [1, 2]).

Зависимость C_n от скорости приводного ветра

Номер модели	$T_b, ^\circ\text{C}$	$U, \text{ м/с}$	$C_n \cdot 10^2$
1	6–22	9–23	$C_n = 0,009U^3 - 0,3296U^2 + 4,54U - 21,33$
2	3	9–16	$C_n = 0,189U - 1,285$
3	> 14	$U > U_b$	$C_n = 2,95 \cdot 10^{-4} U^{3,52}$; $U_b = 3,36 \cdot 10^{-0,00309T_b}$

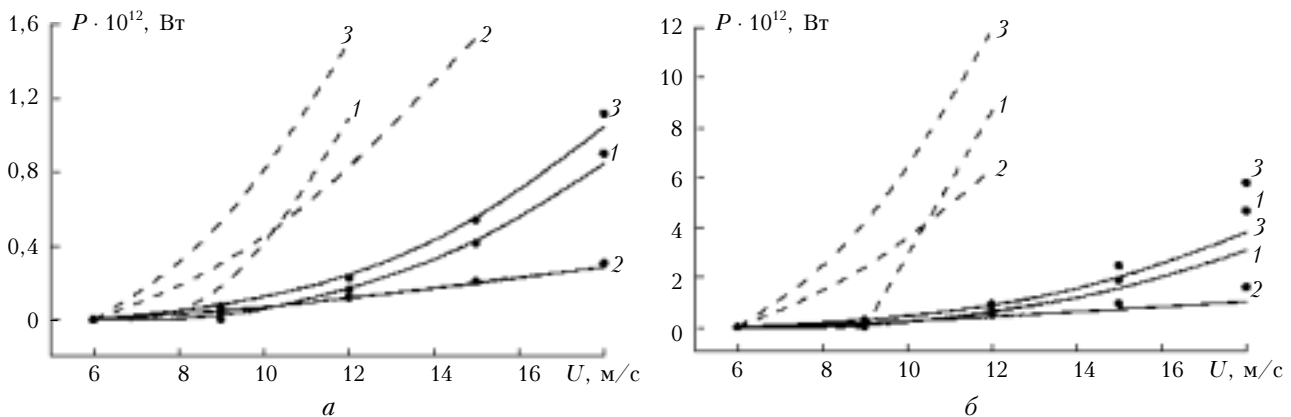


Рис. 1. Зависимость P от скорости приводного ветра: $a - \theta = 89^\circ, L = 10$ км; $b - \theta = 89,5^\circ, L = 5$ км

Из рис. 1 видно, что наличие пены на морской поверхности сильно влияет на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром на настильных трассах зондирования морской поверхности. Принимаемая мощность заметно отличается от нуля только начиная с некоторой (для каждой модели пены своей) скорости приводного ветра, при которой на поверхности моря появляется пена. С увеличением скорости приводного ветра площадь покрытия моря пеной возрастает, что приводит к увеличению принимаемой мощности. При этом степень влияния величины скорости приводного ветра на принимаемую мощность существенно зависит от модели пены (т.е. от температуры водной поверхности, региона, в котором проводятся измерения, и т.п.).

Неучет затенений на настильных трассах зондирования морской поверхности приводит к сильному (на порядок и более) завышению значений принимаемой мощности (это хорошо видно при сравнении на рис. 1 пунктирных и сплошных линий).

Если выполнены все условия, при которых получены формулы (4), (5), результаты расчетов величины P по аналитическим формулам (сплошные линии) хорошо согласуются с результатами численных расчетов (кружки) — см. рис. 1, *a*. Если некоторые из условий не выполняются, совпадение результатов расчетов по аналитическим формулам с результатами численных расчетов все равно остается удовлетворительным — см. рис. 1, *b* (для рис. 1, *b* на значительной части трассы зондирования среднеквадратическое значение высот морского волнения сравнимо с высотой лазерного пучка над морской поверхностью).

1. Белов М.Л., Балякин В.А., Орлов В.М. О мощности, регистрируемой лидаром при зондировании в атмосфере морской поверхности, покрытой пеной // Оптика атмосф. 1989. Т. 2. № 10. С. 1113–1117.
2. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. О влиянии покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром при зондировании морской поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 13. № 1. С. 68–70.
3. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44. N 11. P. 838–850.
4. Koepke P. Effective reflectance of oceanic whitecaps // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 11. P. 1816–1824.
5. Wald L., Monget J.M. Remote sensing of the sea state using the 0,8–1,1 nm spectral band // Int. J. Remote Sens. 1983. V. 4. N 2. P. 433–446.
6. Белов М.Л. Рассеяние узкого волнового пучка при импульсном облучении случайно-неровной поверхности в атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1997. Т. 40. № 6. С. 713–721.
7. Бортковский Р.С. Пространственно-временные характеристики барашков и пятен пены, образующихся при обрушении ветровых волн // Метеорол. и гидрол. 1987. № 5. С. 68–75.
8. Monahan E.C., O'Muircheartaigh I. Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface // Int. J. Remote Sens. 1986. V. 7. N 5. P. 627–642.
9. Whitlock C.H., Bartlett D.S., Gurganus E.A. Sea foam reflectance and influence on optimum wavelength for remote sensing of ocean aerosols // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. N 6. P. 719–722.
10. Tsai B.M., Gardner C.S. Remote sensing of sea state using laser altimeter // Appl. Opt. 1982. V. 21. N 21. P. 3932–3240.

M.L. Belov. On the influence of sea covering by foam on the power received by a lidar at small-angle sounding of the sea surface.

The formula expressing the influence of foam on the power of laser signal at small-angle sounding is obtained and compared with numerical calculations for different models of sea cover by foam. It is shown that foam influences hardly the laser signal power. The degree of this influencing essentially depends on the model of foam and sounding angles.