

М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев

О влиянии покрытия моря пеной на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром при зондировании морской поверхности

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию 17.07.2003 г.

Получена формула, описывающая влияние пены на мощность лазерного сигнала, 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.

Методы лазерного зондирования являются косвенными и не позволяют напрямую измерять характеристики морской поверхности. Значения последних определяются по результатам измерений лазерного сигнала, зависящим от многих факторов. Одним из таких факторов является покрытие моря пеной (см., например, [1, 2]).

Мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром при непрерывном облучении морской поверхности с пеной, исследовалась в работе [3]. Здесь была получена приближенная формула, учитывающая влияние пены на принимаемую мощность. Ниже получена более точная формула, описывающая влияние пены на мощность лазерного сигнала, и проводится ее сравнение с результатами численных расчетов для разных моделей покрытия моря пеной.

Модель морского волнения обычно представляется в виде гауссовского случайного процесса (гауссовское распределение для наклонов морской поверхности близко к экспериментально полученному [4]). При высоких скоростях ветра поверхность моря покрывается пеной. Обычно участки пены считают изотропными отражателями (см., например, [1, 2]), расположенными на склонах волн. Причем при не очень большой скорости ветра пятна пены расположены почти параллельно склонам волн, так что можно считать распределение наклонов пятен пены таким же, как и распределение наклонов морских волн [2].

Среднюю мощность P , принимаемую лидаром при зондировании морской поверхности, частично покрытой пеной, можно представить в следующем виде [3]:

$$P = (1 - C_n) P_m + C_n P_n, \quad (1)$$

где P_m , P_n — средние мощности эхосигнала при зондировании морской поверхности без пены и сплошь покрытой пеной; C_n — доля поверхности моря, покрытой пеной.

Интегральные формулы для $P_{m,n}$ получены в работах [5, 6]:

$$P_m \equiv V^2 \frac{q^A}{4q_z^A} \int_{-\infty}^{\infty} W(\zeta) d\zeta \int_{S_0} d\mathbf{R}_0 E_n^n(\mathbf{R}'_{0\zeta}) \times E_n^n(\mathbf{R}''_{0\zeta}) W(\boldsymbol{\gamma} = \tilde{\boldsymbol{\gamma}}), \quad (2)$$

$$P_n \equiv \frac{A}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\zeta) d\zeta \int_{-\infty}^{\infty} W(\boldsymbol{\gamma}) d\boldsymbol{\gamma} \int_{S_0} \frac{d\mathbf{R}_0}{n_z} E_n(\mathbf{R}'_{0\zeta}) E_n(\mathbf{R}''_{0\zeta}), \quad (3)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\gamma}} = \left(-\frac{q_x}{q_z} - \frac{R_{0x}}{q_z} T, -\frac{R_{0y}}{q_z} s \right),$$

где

$$s = \frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_n}; \quad T = \frac{\cos^2 \theta_n}{L_n} + \frac{\cos^2 \theta_n}{L_n};$$

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

$$q_x = \sin \theta_n + \sin \theta_n; \quad q_z = -(\cos \theta_n + \cos \theta_n);$$

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

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

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

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; $E_{n,n}^n(\mathbf{R})$ — освещенности в поперечном сечении пучков от действительного и фиктивного (с параметрами приемника) источников; $\mathbf{m}_{n,n}$ — единичные векторы, определяющие направление облучения и приема; $W(\zeta)$, $W(\boldsymbol{\gamma})$ — функции распределения высот и наклонов поверхности; V^2 — коэффициент отражения Френеля морской поверхности без пены; A — альbedo участка по-

верхности, покрытого пеной; $L_{н,п}$ – наклонные расстояния от источника и приемника до поверхности; $\theta_{н,п}$ – углы между нормалью к плоскости $z = 0$ и оптическими осями источника и приемника.

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 и получить формулы для принимаемой мощности от морской поверхности без пены и сплошь покрытой пеной [3, 5, 6]. Используя эти результаты, найдем выражение для величины

$$N = [(1 - C_n) P_m + C_n P_{п}] / P_m,$$

равной отношению принимаемой мощности с учетом пены на поверхности моря к принимаемой мощности без учета пены (при обычно выполняющемся условии – среднеквадратическое значение наклонов волн много больше угла расходимости источника и углового поля зрения приемника, и, считая, что источник, приемник и их оптические оси расположены в одной плоскости XOZ):

$$N \cong (1 - C_n) + C_n \frac{8Aq_z^4}{V^2 q^4} \exp\left(\frac{q_x^2}{2q_z^2 \gamma_x^2} + \frac{1}{2a}\right) \frac{a}{4} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a^{-k}}{k!} \left(\frac{\beta}{2}\right)^{2k} \left\{ \sin\theta_n \sin\theta_n a^{1/4} \frac{\Gamma(2k+2)}{\Gamma(k+1)} \times \right. \\ \times W_{-k-0,75, k+0,75} \left(\frac{1}{a}\right) - \sin\theta_n \sin\theta_n a^{-1/4} \frac{\Gamma(2k+3)}{\Gamma(k+2)} \frac{\beta}{2} \times \\ \times W_{-k-1,25, k+1,25} \left(\frac{1}{a}\right) + 2\cos\theta_n \cos\theta_n a^{-1/4} \times \\ \left. \times \frac{\Gamma(2k+1)}{\Gamma(k+1)} W_{-k-0,25, k+0,25} \left(\frac{1}{a}\right) \right\}, \quad (4)$$

где

$$a = 4 \left(\frac{1}{\gamma_x^2} + \frac{1}{\gamma_y^2} \right)^{-1}; \quad \beta = \frac{a}{4} \left(\frac{1}{\gamma_x^2} - \frac{1}{\gamma_y^2} \right);$$

$\overline{\gamma_{x,y}^2}$ – дисперсии наклонов взволнованной морской поверхности; $W_{n,m}(x)$ – функция Уиттекера; $\Gamma(k)$ – гамма-функция.

Выражение (4) переходит в формулу, полученную в работе [3], при условии малости наклонов морской поверхности ($\overline{\gamma_{x,y}^2} \ll 1$) и учета в (4) только первого члена ряда.

Для расчета N необходимо знать характеристики отражения пены и величину C_n . В результате многочисленных наблюдений в разных климатических зонах Мирового океана получены различные эмпирические соотношения для относительных площадей покрытия поверхности моря пеной (см., например, [7, 8]). Эти соотношения сильно зависят от региона измерений и температуры поверхности воды T_v . Результаты статистической обработки

данных наблюдений (в виде трех моделей зависимости $C_n(U)$) приведены в таблице [7, 8].

Зависимость C_n от скорости приводного ветра

№ модели	$T_v, ^\circ\text{C}$	$U, \text{ м/с}$	$C_n \cdot 10^2$
1	6–22	9–23	$C_n = 0,009U^3 - 0,329U^2 + 4,54U - 21,33$
2	3	9–16	$C_n = 0,189U - 1,285$
3	>14	$U > U_v$	$C_n = 2,95 \cdot 10^{-4} U^{3,52};$ $U_v = 3,36 \cdot 10^{-0,003097U}$

В третьей строке таблицы параметр U_v – некоторая величина скорости приводного ветра, начиная с которой на поверхности моря появляется пена. Параметр T_v – температура поверхности воды, определяющая значение U_v согласно приведенной эмпирической формуле.

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

На рис. 1 показано, как изменяется N в зависимости от скорости ветра U . Расчеты проводились при моностатическом зондировании (источник, приемник и их оптические оси совмещены) для моделей пены, приведенных в таблице, при следующих значениях параметров: $V^2 = 0,02$; $A = 0,5$; рис. 1,а – $\theta_n = \theta_p = 0$; рис. 1,б – $\theta_n = \theta_p = 40^\circ$.

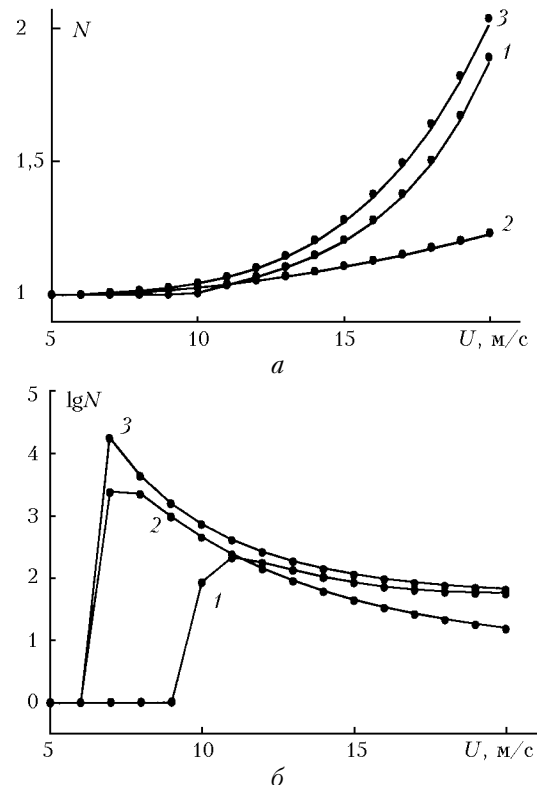


Рис. 1. Зависимость N от скорости приводного ветра

Дисперсии наклонов поверхности $\overline{\gamma_{x,y}^2}$ вычислялись по формулам Кокса и Манка [4].

Результаты расчетов по формуле (4) показаны сплошными линиями. Точки – результаты численных расчетов N по интегральным формулам (2), (3). Формула (4) хорошо описывает зависимость N от скорости приводного ветра – графики расчетов по аналитической формуле практически сливаются с результатами численных расчетов.

Из рис. 1 видно, что наличие пены на морской поверхности сильно влияет на мощность лазерного сигнала, принимаемого лидаром. Степень этого влияния существенно зависит как от модели пены (т.е. от температуры водной поверхности, региона, в котором проводятся измерения и т.п.), так и от углов зондирования. Последнее хорошо видно из сравнения рис. 1, *а* и *б*.

На рис. 1, *а* видно, что для моностатического зондирования вертикально вниз ($\theta_{\text{н}} = \theta_{\text{п}} = 0$) увеличение скорости приводного ветра U приводит к увеличению N (равного отношению принимаемых мощностей с учетом и без учета влияния пены), начиная с некоторой (для каждой модели пены своей) скорости приводного ветра, при которой на поверхности моря появляется пена. Физически это объясняется тем, что коэффициент отражения участков пены много больше коэффициента отражения морской поверхности без пены.

Для моностатического наклонного зондирования (рис. 1, *б*) характер зависимости величины N от U сложнее. При небольших скоростях приводного ветра (когда на поверхности моря пены еще нет) $N = 1$ (как и для рис. 1, *а*). Далее с увеличением скорости приводного ветра U (когда на поверхности моря появляется пена) величина N резко увеличивается. Физически это связано с тем, что для небольших скоростей приводного ветра (пока на поверхности моря пены нет) при угле зондирования $\theta_{\text{н}} = \theta_{\text{п}} = 40^\circ$ мощность, приходящая на приемник лидара, очень мала (из-за близкого к зеркальному характера отражения морской поверхности для малых значений U) и как только на поверхности моря появляется пена (имеющая диффузный характер отражения), принимаемая мощность резко

возрастает. При дальнейшем увеличении U величина N проходит максимум и уменьшается с увеличением скорости приводного ветра (хотя и остается большой, т.е. все равно принимаемая мощность с учетом влияния пены много больше принимаемой мощности без учета пены). Это объясняется тем, что при достаточно больших скоростях приводного ветра характер отражения морской поверхности даже без учета влияния пены приближается к диффузному (из-за увеличения дисперсий высот и наклонов морской поверхности с возрастанием скорости приводного ветра) и поэтому степень влияния пены на принимаемую мощность уменьшается.

1. Koeperke P. Effective reflectance of oceanic whitecaps // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 11. P. 1816–1824.
2. Wald L., Monget J.M. Remote sensing of the sea state using the 0,8–1,1 nm spectral band // Int. J. Remote Sensing. 1983. V. 4. N 2. P. 433–446.
3. 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.
4. 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.
5. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, М.Л. Белов, В.С. Шаманаев, В.М. Климкин, А.В. Белохвостиков, И.Э. Пеннер, Р.Г. Сафин, А.Б. Юдовский. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
6. Белов М.Л., Орлов В.М. О мощности оптического сигнала на трассе с отражением от случайно неровной поверхности // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 63. Вып. 6. С. 1363–1364.
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.

M.L. Belov, V.A. Gorodnichenov, V.I. Kozintsev. On the effect of sea foaming on the power of lidar echo signal when sensing the sea surface.

An equation describing the effect of foam on the power of the laser echo signal is obtained and compared with results of numerical calculations for different models of sea foam coverage. The foam on the sea surface is shown to strongly affect the power of the lidar echo, and the extent of this effect depends on the foam model and sensing angles.