

УДК 551.501

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

МОДЕЛИ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследованы сигналы импульсного лазерного локатора, предназначенного для обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности. Для зондирования вертикально вниз и наклонного моностатического зондирования получены формулы мощности принимаемых лазерных эхо-сигналов. Показано, что результаты расчетов по полученным моделям лазерных локационных сигналов хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Проблема охраны окружающей среды и, в первую очередь, воздушного и водного бассейнов является одной из важнейших на сегодняшний день.

Среди веществ, загрязняющих реки, озера, моря и океаны нашей планеты, одними из наиболее опасных являются нефть и продукты ее переработки. Они являются одним из наиболее серьезных источников загрязнений вод [1, 2].

Для эффективного экологического мониторинга морских, речных и озерных акваторий требуется создание приборов дистанционного зондирования, способных оперативно обнаруживать нефтяные загрязнения на поверхности воды.

Лазерное зондирование с авиационных носителей является одним из наиболее эффективных методов оперативного дистанционного контроля пленок нефтепродуктов.

Мощность оптического сигнала, регистрируемого приемником при рассеянии лазерного пучка в случае импульсного освещения взволнованной морской поверхности, исследовалась в ряде работ (например, в работах [3–8]). Однако в опубликованных работах не рассматривался вопрос о мощности принимаемого сигнала при импульсном зондировании морской поверхности с нефтяными загрязнениями.

Далее рассмотрим модели лазерных локационных сигналов, регистрируемых лидаром при импульсном зондировании чистой водной поверхности и водной поверхности с нефтяными загрязнениями, и срав-

ним результаты расчетов по полученным моделям с результатами численных расчетов.

Пусть лазерным пучком облучается взволнованная морская поверхность S . Полагаем, что длина волны зондирующего излучения лежит в инфракрасном диапазоне, в котором поглощение излучения водой велико, так, что основная доля эхо-сигнала создается светом, зеркально отраженным границей воздух–вода, а долей сигнала, диффузно отраженного толщей воды, можно пренебречь.

Используя результаты работ [5, 8], получим для случая схемы моностатического зондирования, когда источник и приемник совмещены, выражение для средней (за много импульсов зондирующего излучения) мощности $P_{\text{oil}}(t)$ эхо-сигнала, отраженного от участка морской поверхности, покрытого пленкой нефтепродукта:

$$P_{\text{oil}}(t) = V_{\text{oil}}^2 \frac{q^4}{4q_z^4} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\text{oil}}(\zeta) d\zeta \int_{S_0} E_s^n(\vec{R}'_{0\zeta}) E_r^n(\vec{R}'_{0\zeta}) \times \\ \times W_{\text{oil}}(\tilde{\gamma}_x, \tilde{\gamma}_y) f\left(t' + \frac{R_{0x}q_x}{c} - \frac{\zeta q_z}{c} - \frac{R_0^2 + \zeta^2}{2c} s\right) d\vec{R}_0, \quad (1)$$

где

$$\tilde{\gamma}_x = -\frac{q_x}{q_z} + \frac{R_{0x}}{q_z} T, \quad \tilde{\gamma}_y = -\frac{R_{0y}}{q_z} s; \quad s = \frac{2}{L}; \quad T = \frac{2 \cos^2 \theta}{L}; \quad t' = t - \frac{2L}{c};$$

$q_x = 2 \sin \theta$, $q_z = -2 \cos \theta$; $q^2 = q_z^2 + q_x^2$; $\vec{R}'_{0\zeta} = ((R_{0x} \text{ctg} \theta - \zeta(\vec{R}_0)) \times \sin \theta, R_{0y})$; $E_s^n(\vec{R}'_{0\zeta}) = E_s(\vec{R}'_{0\zeta})(\vec{n}\vec{m})^{-1}$, $E_r^n(\vec{R}'_{0\zeta}) = E_r(\vec{R}'_{0\zeta})(\vec{n}\vec{m})^{-1}$; ζ , $\vec{\gamma} = \{\gamma_x, \gamma_y\}$, $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ — высота, вектор наклонов и единичный вектор нормали морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов; \vec{R}_0 — вектор в плоскости S_0 (проекции случайно неровной морской поверхности на плоскость $z = 0$); \vec{m} — единичный вектор, определяющий направление облучения поверхности со стороны источника; θ — угол зондирования, т.е. угол между оптической осью лидача (оптические оси передающей и приемной систем лидача совпадают) и направлением в надир; $L = H/\cos \theta$ — наклонное расстояние от лидача до морской поверхности (здесь H — высота лидача над морской поверхностью); V_{oil}^2 — коэффициент отражения Френеля для морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов; $W_{\text{oil}}(\zeta)$ и $W_{\text{oil}}(\gamma_x, \gamma_y)$ — плотности вероятностей распределения высот и наклонов соответственно для морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов; $E_s(\vec{R})$ и $E_r(\vec{R})$ — освещенности на морской поверхности от действительного и фиктивного (с параметрами приемника) источников [9];

$f(t)$ — форма зондирующего импульса; полагаем, что зондирование проводится при углах, близких к вертикальным, и затенения элементов морской поверхности не существенны, а расстояния от источника и приемника до морской поверхности значительно превышают высоту морских волн и размеры освещенного пятна на морской поверхности.

Примем, что высоты и наклоны морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, распределены по нормальному закону (это хорошо согласуется с экспериментальными данными [10]).

Попытки получить из выражения (1) аналитическую формулу для мощности $P_{oil}(t)$ в общей схеме наклонного зондирования приводят к громоздким математическим выражениям. Основная трудность при этом связана с учетом квадратичных членов в функции $f(t)$ в формуле (1).

Далее рассмотрим два случая: зондирование вертикально вниз и наклонное зондирование (когда угол θ зондирования намного превышает угол расходимости источника и поля зрения приемной системы).

1. *Зондирование вертикально вниз.* Этот случай соответствует режиму обнаружения нефтяных загрязнений с помощью аппаратуры трасерного типа (без сканирования по углу).

В этом случае в выражении (1) в подынтегральной функции $f(t)$ слагаемое $R_{0x}q_x/c$ равно нулю. Пренебрежем в подынтегральной функции $f(t)$ слагаемым $(\zeta^2/2c)s$, что справедливо при достаточно мягком условии $\zeta/L \ll 1$. Тогда, учитывая, что наклоны морской поверхности малы ($\gamma_x, \gamma_y \ll 1$), и полагая форму зондирующего импульса гауссовской ($f(t) = (2/\sqrt{\pi}) \exp(-4t^2/\tau_s^2)$, где τ_s — эффективная длительность зондирующего импульса), из формулы (1) получим после усреднения по ζ следующую формулу:

$$P_{oil}(t) \approx b \exp(-0,5cX\tau_s \frac{d_2 + d_4}{s} + (d_2d_5)^2 + d_5^2(d_4^2 + 2d_2d_4))(1 - \Phi(d_7 + 0,25d_3^{1/2}d_4d_6)), \quad (2)$$

где

$$b = \frac{a_s a_r d_6}{L^4} \frac{V_{oil}^2}{8(\gamma_{xoil}^2 \gamma_{yoil}^2)^{1/2}}; \quad d_2 = 2(C_s + C_r);$$

$$d_4 = \frac{1}{2L^2\gamma_{yoil}^2} + \frac{1}{2L^2\gamma_{xoil}^2}; \quad d_5 = 0,25d_3^{1/2}d_6; \quad d_3 = 1 + \frac{32\sigma_{oil}^2}{c^2\tau_s^2};$$

$$d_6 = 0,5Lc\tau_s; \quad d_7 = d_5d_2 - Xd_3^{-1/2}; \quad X = \frac{2t'}{\tau_s};$$

$\sigma_{oil}^2, \gamma_{xoil}^2, \gamma_{yoil}^2$ — дисперсии высот и наклонов морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов; $\Phi(x)$ — интеграл вероятности;

c — скорость света; для прозрачной аэрозольной атмосферы [9] имеем

$$C_s = (\alpha_s L)^{-2}, \quad C_r = (\alpha_r L)^{-2}, \quad a_s = \frac{P_0 \exp(-\tau)}{\pi \alpha_s^2}, \quad a_r = \pi r_r^2 \exp(-\tau);$$

τ — оптическая толщина атмосферы на трассе лидар–поверхность; $2\alpha_s$ — угол расходимости источника, $2\alpha_r$ — угол поля зрения приемника; P_0 — мощность, излучаемая источником; r_r — эффективный размер приемной апертуры.

Пленка нефтепродуктов на морской поверхности изменяет оптические характеристики границы раздела воздух–вода — коэффициент отражения V_{oil}^2 увеличивается по сравнению с коэффициентом отражения для чистой морской поверхности (например, на длине волны 1,06 мкм коэффициент отражения для чистой морской поверхности равен $\sim 0,02$, а коэффициент отражения для воды, покрытой толстой пленки нефти, — $\sim 0,04$). К тому же, экспериментально установлено, что пленка нефтепродуктов сглаживает волнение водной поверхности [11, 12]. Это приводит к увеличению принимаемой мощности при схеме зондирования вертикально вниз (см. выражение для множителя b в формуле (2)). Форма эхо-импульса зависит от многих факторов: высоты лидара над морской поверхностью, углов расходимости источника и поля зрения приемника, степени морского волнения, а также от формы зондирующего импульса и наличия нефтяного загрязнения на морской поверхности.

На рис. 1 приведены результаты расчетов временной формы эхо-импульса, отраженного от морской поверхности при зондировании вертикально вниз. При расчетах было принято (согласно результатам

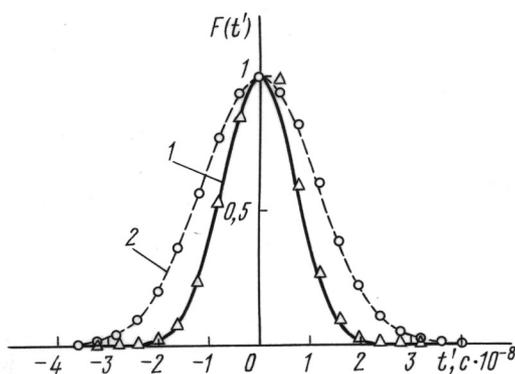


Рис. 1. Временная форма лазерного эхо-импульса, отраженного от морской поверхности, при зондировании вертикально вниз:

1 — результаты расчетов по формуле (2), 2 — результаты расчетов по аналитической формуле, приведенной в работе [8], для чистой морской поверхности; \circ и Δ — результаты численных расчетов по формуле (1) соответственно для чистой морской поверхности и для морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов

экспериментальных работ по изучению поверхностного волнения чистой морской поверхности и морской поверхности, покрытой пленкой нефти [10]), что при наличии нефтяных пленок дисперсии наклонов уменьшаются в три раза. Расчеты величины $P_{\text{oil}}(t')/P_{\text{oil}}^0 = F(t')$, где P_{oil}^0 — значение P_{oil} при $t' = 0$, проводились по формуле (2) при следующих значениях параметров: $\alpha_s = 0,5$ мрад; $\alpha_r = 1$ мрад; $\tau_s = 10^{-8}$ с; $L = 1$ км; $U = 10$ м/с (U — скорость приводного ветра).

Здесь и далее при расчетах значения $\gamma_{x\text{oil}}^2, \gamma_{y\text{oil}}^2$ вычислялись по формулам Кокса и Манка [10], а для величин σ_{oil}^2 использовалась следующая формула [4]:

$$\sigma_{\text{oil}} = \frac{0,016U^2}{\sqrt{3}}.$$

Из рис. 1 видно, что эхо-импульс, отраженный от морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, имеет меньшую длительность (это объясняется тем, что нефтяная пленка сглаживает морское волнение). Результаты расчетов по аналитическим моделям хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

2. *Наклонное зондирование.* Направление зондирования сильно отличается от направления вертикально вниз ($R_{0x}q_x \gg ((R_0^2 + \zeta^2)/2)s$). Этот случай соответствует режиму обнаружения нефтяных загрязнений с помощью сканирующей по углу (поперек направления движения носителя) аппаратуры.

В этом случае можно пренебречь в выражении (1) в подынтегральной функции $f(t)$ слагаемым $((R_0^2 + \zeta^2)/2c)s$. Тогда с учетом того, что для морской поверхности $\gamma_x, \gamma_y \ll 1$, для гауссовской формы зондирующего импульса из формулы (1) после усреднения по ζ имеем

$$P_{\text{oil}}(t) \approx b_1 \exp(-z^2 - zd), \quad (3)$$

где

$$b_1 = b_0 \frac{2^{1/2}}{\sqrt{\pi}\sigma} (\nu N_r \omega)^{-1/2}, \quad b_0 = \frac{a_s a_r q^4}{L^4} \frac{V_{\text{oil}}^2}{q_z^4 8(\gamma_{x\text{oil}}^2 \gamma_{y\text{oil}}^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{q_x^2}{2q_z^2 \gamma_{x\text{oil}}^2}\right);$$

$$N_r = C_s + C_r; \quad \omega = \frac{d_1}{2\sigma_{\text{oil}}^2} + \frac{4q_z^2}{\tau_s^2 c^2} - \frac{\kappa}{\nu}; \quad \kappa = \sin \theta \cos \theta N_r + \frac{4}{\tau_s^2 c^2} q_z q_x;$$

$$\nu = \frac{T^2}{2\gamma_{x\text{oil}}^2 q_z^2} + \cos^2 \theta N_r + \frac{4q_x^2}{\tau_s^2 c^2}; \quad z = \frac{t'}{2^{1/2} \tau_M};$$

$$\tau_M = \frac{\tau_s^2}{8} \left(1 - \frac{4}{\tau_s^2 c^2 \nu} \left(q_x + \frac{\mu^2}{\omega \nu}\right)\right)^{-1}; \quad d = \frac{2^{7/2} \tau_M}{\tau_s^2 c \nu} \left(q_x + \frac{\kappa}{\omega \nu} \mu\right) \frac{q_x T}{q_z^2 2 \gamma_{x\text{oil}}^2};$$

$$d_1 = 1 + 2\sigma^2 \sin^2 \theta (C_s + C_r); \quad \mu = q_x \kappa - q_z \nu.$$

Величина принимаемой мощности (так же, как и в схеме зондирования вертикально вниз) увеличивается из-за возрастания коэффициента отражения V_{oil}^2 (по сравнению с коэффициентом отражения для чистой морской поверхности) и сглаживания пленкой нефтепродуктов морского волнения. Однако в формуле (3) присутствует (в отличие от схемы зондирования вертикально вниз) множитель $K = \exp(-q_x^2/2q_z^2\gamma_{xoil}^2)$, из-за которого происходит уменьшение принимаемой мощности (поскольку дисперсия γ_{xoil}^2 наклонов морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, меньше соответствующей дисперсии наклонов чистой морской поверхности). Наличие этого множителя приводит к тому, что для углов зондирования θ , изменяющихся в диапазоне $0 \dots 0,2$ рад, принимаемая мощность $P_{oil}(t)$ больше соответствующей мощности, принимаемой от чистой морской поверхности [13]. При больших углах зондирования θ из-за влияния множителя K величина $P_{oil}(t)$ становится меньше мощности, принимаемой от чистой морской поверхности.

Временная форма принимаемого лазерного эхо-импульса сложным образом зависит от угла зондирования, формы зондирующего импульса, высоты лидача над морской поверхностью, угла расходимости источника, угла поля зрения приемника и степени морского волнения.

На рис. 2 приведены результаты расчетов формы эхо-импульса, отраженного от морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов. Расчеты величины $P_{oil}(t')/P_{oil}^0 = F(t')$, где P_{oil}^0 — значение P при $t' = 0$, проводились по формуле (3) при следующих значениях параме-

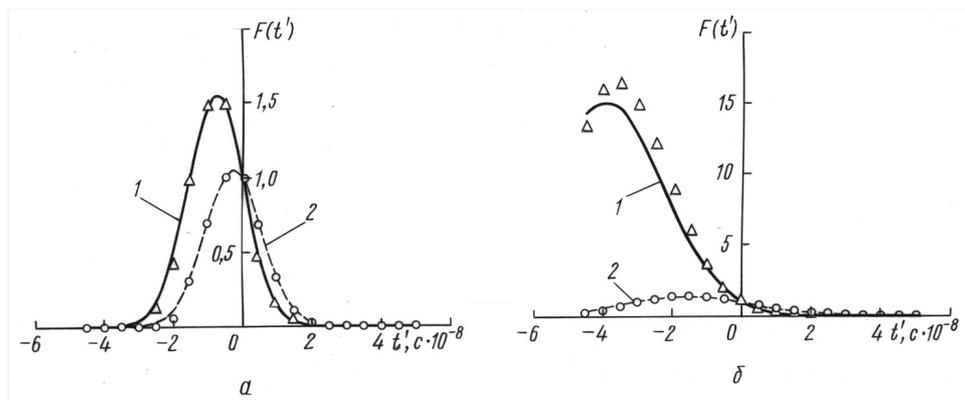


Рис. 2. Временные формы лазерного эхо-импульса, отраженного от морской поверхности, при наклонном зондировании для угла расходимости источника излучения 10 град (а) и 25 град (б):

1 — результаты расчетов по формуле (3); 2 — результаты расчетов по аналитической формуле, приведенной в работе [8], для чистой морской поверхности; \circ и Δ — результаты численных расчетов по формуле (1) соответственно для чистой морской поверхности и для морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов

тров: $U = 1$ м/с ; $L = 1$ км; $\theta = 10^\circ$; $\tau_s = 10^{-8}$ с; для рис. 2, а: $\alpha_s = 10^{-2}$, $\alpha_r = 2 \cdot 10^{-2}$; для рис. 2, б: $\alpha_s = 2,5 \cdot 10^{-2}$, $\alpha_r = 5 \cdot 10^{-2}$.

Из рис. 2 видно, что временная форма эхо-импульса, отраженного от морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, существенно отличается от формы эхо-импульса, отраженного от чистой морской поверхности: максимум эхо-импульса для морской поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов, сдвинут в область $t' < 0$. Сдвиг максимума связан с тем, что угол между направлением зеркального отражения излучения от морской поверхности и направлением на приемник зависит от положения точки в пределах освещенного пятна на морской поверхности. Этот сдвиг приводит к тому, что эхо-сигналы, поступающие на приемник от разных точек освещенного пятна на морской поверхности, существенно различаются по амплитуде. Поэтому максимум эхо-сигнала, регистрируемого приемником, смещается в область $t' < 0$, для которой на приемник приходят эхо-сигналы от точек на поверхности, имеющих минимальные углы между направлением зеркального отражения излучения от морской поверхности и направлением на приемник. С увеличением угла расходимости источника этот эффект увеличивается (см. рис. 2, б). Эффект смещения максимума эхо-сигнала в область $t' < 0$ проявляется также в случае чистой морской поверхности (см. рис. 2), но для нее он значительно меньше (так как высоты и наклоны этой поверхности больше).

Из рис. 2 видно также, что результаты расчетов по аналитическим моделям хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Таким образом, в настоящей работе получены модели лазерных локационных сигналов, регистрируемых лидаром при импульсном зондировании чистой морской поверхности и морской поверхности с нефтяными загрязнениями. Исследована форма лидарного эхо-импульса для аппаратуры трассерного типа и аппаратуры, использующей сканирование по углу. Полученные аналитические формулы для мощности лазерного эхо-сигнала хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестерова М. П. Методы борьбы с нефтяным загрязнением Мирового океана // Вестник АН СССР. – 1984. – № 10. – С. 39–46.
2. Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. и др. Современное состояние прибрежных экосистем морей Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 9. – С. 6–21.
3. Пелевин В. Н. Метод локации волнующейся морской поверхности расходящимся световым импульсом // Световые поля в океане. – М.: ГОИН, 1980. – С. 216–223.

4. Tsai B. M., Gardner C. S. Remote sensing of sea state using laser altimeter // *Appl. Opt.* – 1982. – V. 21. – № 21. – P. 3932–3240.
5. Белов М. Л., Орлов В. М. О мощности оптического сигнала при импульсном зондировании в атмосфере морской поверхности, покрытой пеной // *Оптика атмосферы и океана.* – 1990. – Т. 3. – № 7. – С. 738–742.
6. Д и с т а н ц и о н н ы й контроль верхнего слоя океана / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, М.Л. Белов и др. – Новосибирск: Наука, 1991. – 149 с.
7. Белов М. Л., Орлов В. М. Временная структура лидарного сигнала при импульсном зондировании взволнованной морской поверхности // *Оптика атмосферы и океана.* – 1992. – Т. 5. – № 3. – С. 300–308.
8. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И. О форме эхо-импульса при лазерном зондировании взволнованной морской поверхности // *Оптика атмосферы и океана.* – 1997. – Т. 10. – № 8. – С. 935–940.
9. Э л е м е н т ы теории светорассеяния и оптическая локация / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 225 с.
10. Cox C., Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // *Scripps. Inst. Oceanography. Bull.* – 1956. – V. 6. – № 9. – P. 401–488.
11. Г у р е в и ч И. Я., Ш и ф р и н К. С. Отражение видимого и инфракрасного излучения нефтяными пленками на море // *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов.* – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 166–176.
12. Гардашов Р. Г., Гуревич И. Я., Шифрин К. С. Отражение оптического излучения от взволнованной морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой // *Оптика атмосферы и океана.* – Баку: ЭЛМ, 1983. – С. 33–44.
13. Белов М. Л., Городничев В. А., Козинцев В. И. Оценка полосы сканирования лазерного локатора, предназначенного для обнаружения пленок нефтепродуктов на морской поверхности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение"*. – 1998. – № 3. – С. 24–29.

Статья поступила в редакцию 8.12.2003

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from Moscow Institute for Power Engineering in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of "Radio-electronics and Laser Technology" research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of the laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, начальник сектора НИИ "Радиоэлектроника и лазерная техника" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov in 1976. Ph. D. (Eng.), head of section of "Radio-electronics and Laser Technology" research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 publications in the field of laser technology.

