

М.Л. Белов, В.А. Городничев

О ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследовано влияние пены на морской поверхности, морского волнения, параметров лидара и отклонения оси лидара от вертикального направления на лазерный локационный контраст «нефтяная пленка – чистая морская поверхность» (K) при импульсном дистанционном зондировании. Для наклонного моностатического зондирования и зондирования строго в надир получены формулы для лазерного локационного контраста K . Показано, что при появлении пены на морской поверхности и отклонении оптической оси лидара от надира лазерный контраст K может сильно уменьшаться, но при небольших углах зондирования остается значительным в широком диапазоне скоростей приводного ветра и длительностей зондирующего импульса.

Актуальной экологической задачей, которую может решать лидар, является контроль морских акваторий с целью обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды.

Лидар надежно обнаруживает нефтяную пленку на поверхности воды при зондировании в надир [1–3] при небольшой скорости приводного ветра. При высоких скоростях приводного ветра поверхность океана покрывается пеной, имеющей высокий коэффициент отражения, что сильно влияет на величину регистрируемых лидаром эхо-сигналов [5]. Более того, при дистанционном зондировании больших акваторий, когда используется сканирующая аппаратура, регистрируемые лидаром эхосигналы будут сильно зависеть от угла сканирования и скорости приводного ветра [6]. Эти факторы могут значительно уменьшить контраст нефтяной пленки на морской поверхности и затруднить интерпретацию данных лидарных измерений.

Влияние скорости приводного ветра и угла сканирования на обнаружение нефтяных пленок на поверхности воды анализировалось в работах [2–4] при непрерывном лазерном облучении морской поверхности. Ниже исследуется влияние пены на морской поверхности, морского волнения, параметров лидара и отклонения оси лидара от вертикального направления на лазерный локационный контраст K при импульсном дистанционном зондировании.

Физической основой дистанционного обнаружения нефтяных пленок на морской поверхности методом лазерного зондирования является наличие контраста яркости между чистой морской поверхностью и поверхностью, покрытой пленкой нефти. Контраст обусловлен двумя физическими факторами [1–4]: нефтяная пленка имеет другой коэффициент отражения, чем граница раздела воздух–вода, и сглаживает морское волнение. В частности, для ровной поверхности воды, покрытой толстой пленкой нефти, при зондировании в надир максимальный контраст K (порядка 80%) достигается в спектральной области 8–12 мкм. Довольно большие контрасты (45–50%) наблюдаются в видимой и ближней инфракрасной области [1].

Приведенные в [1] оценки контраста справедливы при полном штиле, когда скорость приводного ветра равна нулю и второй физический фактор (сглаживание морского волнения) отсутствует. При отличной от нуля скорости приводного ветра поверхность моря становится взволнованной и контраст K увеличивается на всех длинах волн еще в несколько раз [2]. При импульсном дистанционном зондировании контраст K сильно зависит не только от скорости приводного ветра, но и от схемы зондирования и параметров источника и приемника лидара.

Оценим сначала контраст K в случае импульсного зондирования строго в надир.

Определим величину локационного контраста K в случае импульсного зондирования следующим образом:

$$K = P_{oil}/P_{max},$$

где P_{oil} , P_{max} – мощности эхосигналов от морской поверхности, покрытой пленкой нефти, и морской поверхности без пленки нефти в моменты максимумов регистрируемых эхосигналов.

Используя выражение для средней (за много импульсов зондирующего излучения) мощности эхосигнала, регистрируемой приемником лидара при вертикальном моностатическом зондировании морской поверхности [5], найдем t_{\max} – время прихода на приемник максимума эхо-сигнала и величину P_{\max} – мощность в максимуме эхосигнала:

$$P_{\max} \cong c_1(c_2 + c_3)\pi^{-1/2}(N_0 p^{1/2})^{-1}[1 - (2N_0^2 p)^{-1}]^{-1} \exp\{-0,25(N_0^2 p)^{-1}\}, \quad (1)$$

где $c_1 = a_s a_r c \pi \tau / (2L^3)$; $c_2 = (1 - S_f)V^2 / (8\pi(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2})$; $c_3 = AS_f / \pi$; $N_0 = C_s + C_r$; $p = \frac{\tau^2 c^2 L^2}{16} + 2\sigma^2 L^2$; σ^2 , $\gamma_{x,y}^2$ – дисперсии высот и наклонов морской поверхности; L – расстояние от лидара до морской поверхности; V – коэффициент отражения Френеля для морской поверхности; τ – длительность зондирующего импульса; S_f – доля поверхности моря, покрытой пеной; A – альбедо элементарного участка морской поверхности, покрытой пеной.

Для прозрачной аэрозольной атмосферы [7]

$$a_s = P_0 \exp(-\tau_a) / (\pi \alpha_s^2); \quad a_r = r_r^2 \pi \exp(-\tau_a); \quad C_{s,r} = (\alpha_{s,r} L)^{-2},$$

$2\alpha_{s,r}$ – угол расходимости источника и угол поля зрения приемника; P_0 – мощность, излучаемая источником; r_r – эффективный размер приемной апертуры; τ_a – оптическая толщина атмосферы.

При выводе формулы (1) считалось, что $\alpha_{s,r}^2 \ll \gamma_{x,y}^2$ и использовалось асимптотическое разложение интеграла Френеля $\Phi(x)$, справедливое при условии $x \gg 1$ ($x = N_0 p^{1/2} - 0,5/N_0 p^{1/2}$), которое легко выполняется для лидарного зондирования с авиационных и космических аппаратов.

Выражение (1) получено для морской поверхности без пленки нефти. Однако его можно использовать и для оценки эхосигнала от морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой, учитывая, что нефтяная пленка сглаживает морское волнение (уменьшаются дисперсии высот и наклонов морских волн, пены не возникает) и имеет другой коэффициент отражения. Принимают [2, 8], что при нефтяных пленках закон распределения наклонов морской поверхности остается нормальным, но дисперсия наклонов уменьшается в 3 раза.

Используя формулу (1), получим для K при зондировании в надири:

$$K = [V_2^2 / (8\pi(\gamma_{2x}^2 \gamma_{2y}^2)^{1/2})] \{ (1 - S_f)V_1^2 / (8\pi(\gamma_{1x}^2 \gamma_{1y}^2)^{1/2}) + S_f A_1 / \pi \}^{-1} [(\tau^2 c^2 / 16 + 2\sigma_1^2)^{1/2} / (\tau^2 c^2 / 16 + 2\sigma_2^2)^{1/2}] \times \\ \times \{ [1 - (2N_0^2 p_1)^{-1}] / [1 - (2N_0^2 p_2)^{-1}] \} \exp\{ -(0,25/N_0^2)[(p_2)^{-1} - (p_1)^{-1}] \}. \quad (2)$$

Величины V , A , γ , σ , p с индексом 1 относятся к морской поверхности без пленки нефти, с индексом 2 – к морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой.

При отклонении оптической оси лидара от направления в надир регистрируемый приемником лидара локационный сигнал быстро падает. Формула для средней мощности в максимуме эхосигнала, регистрируемого приемником лидара при наклонном моностатическом зондировании морской поверхности, имеет вид [5]

$$P_{\max} \cong b_1 (b_2 + b_3), \quad (3)$$

где

$$b_1 = 2a_s a_r \pi^{1/2} L^{-4} N_0^{-1} \Omega^{-1/2}; \quad \mu = \sin^2 \theta (N_0 - 16/(\tau c)^2); \quad \Omega = 1 + 2\sigma^2 [N_0 \sin^2 \theta + 16/(\tau c)^2 - \mu^2 / N_0]; \\ b_2 = (1 - S_f) (V^2 / (8\pi(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}) \exp(-0,5q_x^2 / (q_z^2 \gamma_x^2))); \quad b_3 = S_f A \cos^2 \theta / \pi; \quad q_x = 2\sin \theta; \quad q_z = 2\cos \theta.$$

При получении формулы (3) считалось, что $\alpha_{s,r}^2 \ll \gamma_{x,y}^2$, а угол θ (между направлением оптической оси лидара и направлением в надир) мал ($\theta \ll 1$), но θ много больше угла расходимости источника и угла поля зрения приемника.

Используя формулу (3), получим для K в случае отклонения оптической оси лидара от направления в надир:

$$K = [V_2^2 \exp(-0,5q_z^2 / (q_z^2 \gamma_{2x}^2)) / (8\pi(\gamma_{2x}^2 \gamma_{2y}^2)^{1/2})] \{ (1 - S_f)V_1^2 \exp(-0,5q_x^2 / (q_z^2 \gamma_{1x}^2)) / (8\pi(\gamma_{1x}^2 \gamma_{1y}^2)^{1/2}) + \\ + \cos^2 \theta S_f A_1 / \pi \}^{-1} [(\tau^2 c^2 / 16 + 2\sigma_1^2)^{1/2} / (\tau^2 c^2 / 16 + 2\sigma_2^2)^{1/2}]. \quad (4)$$

Для получения максимального контраста K перспективно зондирование на длинах волн 1,06 и 10,6 мкм.

Для длины волны зондирования 1,06 мкм на рис. 1, 2 приведены графики угловых зависимостей контраста K . Расчеты проводились по формулам (2), (4) при следующих значениях параметров:

$L=3$ км; $\alpha_s=4\cdot 10^{-4}$; $\alpha_r=6\cdot 10^{-4}$; $V_1^2=0,02$; $V_2^2=0,04$; кривые 1 – $U=1$ м/с; 2 – 5; 3 – 9; 4 – 17; 5 – 21 м/с.

Величины $\gamma_{1x}^2, \gamma_{1y}^2, \sigma_1^2, S_f$ рассчитывались по следующим формулам [8–10]:

$$\gamma_{1x}^2 = 3,16 \cdot 10^{-3} U; \gamma_{1y}^2 = 0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3} U; \sigma_1 = 0,016 U^2;$$

$$S_f = 0,009 U^3 - 0,3296 U^2 + 4,549 U - 21,33,$$

где U – скорость приводного ветра (м/с).

Принималось, что при нефтяных пленках дисперсии наклонов γ_{xy}^2 и высот σ^2 уменьшаются в 3 раза, а альbedo пены $A_f \approx 0,5$ [11].

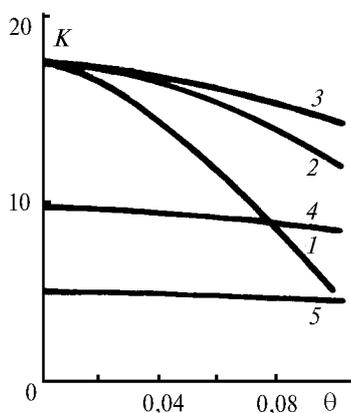


Рис. 1. Угловая зависимость контраста K . $\tau = 10^{-12}$ с

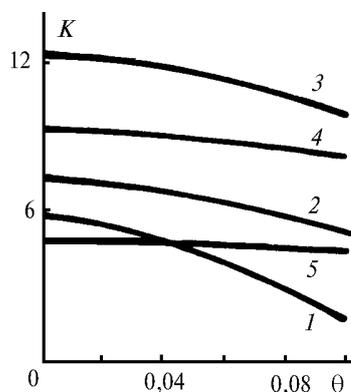


Рис. 2. Угловая зависимость контраста K . $\tau = 10^{-8}$ с

Анализ рисунков позволяет сделать следующие выводы:

1. Контраст K сильно зависит от скорости приводного ветра и покрытия поверхности моря пеной. При небольших скоростях приводного ветра, когда на поверхности моря нет пены, с увеличением скорости приводного ветра происходит увеличение контраста K благодаря сглаживанию нефтяной пленкой морского волнения.

При высоких скоростях приводного ветра, когда на поверхности моря появляется пена, контраст K сильно уменьшается с возрастанием скорости приводного ветра, но остается значительным. Уменьшение контраста с возрастанием скорости приводного ветра связано в этом случае с увеличением площади покрытия моря пеной (с возрастанием U), что приводит к увеличению яркости морской поверхности и уменьшению контраста K .

2. Контраст K сильно зависит от угла зондирования при невысокой скорости приводного ветра. При отклонении оптической оси лидара от надира контраст уменьшается, но остается большим при $\theta \leq 0,1$ рад в широком диапазоне длительностей зондирующего импульса.

3. Контраст K существенно зависит от длительности зондирующего импульса. При небольшой длительности зондирующего импульса ($\leq 10^{-10}$ с) он заметно возрастает. Физически это объясняется тем, что при небольшой длительности импульса на лидарный контраст начинают сильно влиять не только коэффициент отражения и дисперсия наклонов, но и дисперсия высот морской поверхности.

4. Увеличение скорости приводного ветра приводит к заметному ослаблению зависимости контраста K от угла зондирования, особенно при высоких скоростях приводного ветра, когда на поверхности моря появляется пена.

1. Гуревич И.Я., Шифрин К.С.// Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 166–176.

2. Гардашов Р.Г., Гуревич И.Я., Шифрин К.С.// Оптика атмосферы и океана. Баку: ЭЛМ, 1983. С. 33–44. 1128

3. Кропоткин М.А., Шевелева Т.Ю. // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 188–192.
4. Гуревич И.Я., Шифрин К.С. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. N 8. С. 863–867.
5. Белов М.Л., Орлов В.М. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 3. С. 300–308.
6. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, М.Л. Белов и др. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
7. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко и др. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
8. Cox C., Munk W. // Scripps. Inst. Oceanogr. Bull. 1956. V. 6. N 9. P. 401–488.
9. Tsai B.M., Gardner C.S. // Appl. Opt. 1982. V. 21. N 21. P. 3932–3940.
10. Бортковский Р.С. // Метеорология и гидрология. 1987. N 5. С. 68–76.
11. Whitlock C.H., Bartlett D.S., Gurganus E.A. // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. N 6. P. 719–722.

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

Поступила в редакцию
 25 декабря 1995 г.

M.L. Belov, V.A. Gorodnichev. Lidar Sounding of Oil Films on Sea Surface.

The influence of foam, sea state, lidar parameters and deviation of lidar optical axis from the vertical direction on the lidar contrast "oil film-clear sea surface" at pulse sounding is considered. The analytical expressions are obtained for the lidar contrast "oil film-clear sea surface" for the lidar monostatic vertical and non-vertical sounding. It is shown that the lidar contrast "oil film-clear sea surface" can strongly decrease for sea surface covered with foam or when the optical axis deviates from the vertical direction, but the contrast is still sharp at small sounding angles within wide range of wind speeds and laser pulse durations.