

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

Метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения

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

Поступила в редакцию 26.03.2001 г.

Рассмотрен дистанционный метод измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании лазерного источника с перестраиваемой длиной волны излучения. Показано, что использование алгоритма, основанного на аппроксимации измеренной зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны излучения известной функцией и поиске параметров аппроксимации для наилучшего соответствия данных измерений аппроксимирующей функции, позволяет с высокой точностью восстановить толщину тонких пленок нефти на водной поверхности.

Одним из наиболее перспективных дистанционных методов, позволяющих проводить как обнаружение пленок нефтепродуктов и картирование района нефтяных загрязнений, так и измерение толщины нефтяных пленок, является метод активной лазерной локации.

Рассмотрим отражение лазерного пучка от взволнованной морской поверхности. Будем считать, что длина волны лазерного 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. Учтем, что длина волны излучения мала по сравнению с характерными радиусами кривизны и высотами морской поверхности. Тогда в приближении Кирхгофа поле $u(\mathbf{r}_r)$ лазерного пучка, отраженного взволнованной морской поверхностью S , можно представить в виде [1,2]:

$$u(\mathbf{r}_r) = \frac{1}{4\pi i} \int_S v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_r) V(\mathbf{r}) u_0(\mathbf{r}) [\mathbf{n}(\mathbf{r}) \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{r})] d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{n}(\mathbf{r}) = \{n_x, n_y, n_z\}$$

– единичный вектор нормали к взволнованной морской поверхности S в точке \mathbf{r} ;

$$\bar{\mathbf{q}}(\mathbf{r}) = -k \nabla_S (|\mathbf{r} - \mathbf{r}_r| + |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|);$$

$\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_r$ – векторы, определяющие положение источника и точки наблюдения; $u_0(\mathbf{r})$ – поле лазерного источника на поверхности S ; $v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_r)$ – поле точечного источника; $V(\mathbf{r})$ – коэффициент отражения; k – волновое число.

Формула (1) получена без учета затенений и эффектов многократного рассеяния (их можно не учитывать при углах зондирования, близких к вертикальным).

Используя формулу (1), результаты [2] и переходя от интегрирования по случайно-неровной поверхности S к интегрированию по ее проекции S_0 на плоскость $z = 0$, получим следующую формулу для мощности, регистрируемой приемником при моностатической локации лазерным пучком взволнованной морской поверхности в надир (вертикально вниз) (считаем, что источник, приемник и их оптические оси совмещены и находятся в плоскости XOZ земной системы координат) [3]:

$$P = V^2 \int_{S_0} \frac{d\mathbf{R}_0}{n_z} E_s(\mathbf{R}_0) E_r(\mathbf{R}_0) \times \\ \times \delta\{K_x[R_{x0}s - 2\gamma_x]\} \delta\{K_y[R_{y0}s - 2K_x\gamma_x]\}, \quad (2)$$

где

$$s = \frac{2}{L}; \quad K_{x,y} = \frac{n_z}{\sqrt{1 - n_z^2 \gamma_{y,x}^2}};$$

$\delta(x)$ – дельта-функция; \mathbf{R}_0 – вектор в плоскости $z = 0$; $E_s(\mathbf{R})$, $E_r(\mathbf{R})$ – освещенности на поверхности от действительного источника и фиктивного источника с параметрами приемника [4]; L – расстояние от центра освещенного пятна (на морской поверхности) до локатора; $\gamma = \{\gamma_x, \gamma_y\}$ – вектор наклонов неровной морской поверхности S ; V^2 – коэффициент отражения от невозмущенной волнением морской поверхности.

При моностатическом зондировании на приемник попадает отраженное излучение только от тех площадок на морской поверхности, которые перпендику-

лярны оптической оси локатора. Таким образом, при вертикальном падении излучения величина V^2 в формуле (2) – это коэффициент отражения для элементарных горизонтальных плоских площадок на морской поверхности (т.е. коэффициент отражения для невозмущенной волнением морской поверхности). Для однородного участка поверхности (чистой морской поверхности или покрытой пленкой нефти) величина V^2 не зависит от \mathbf{R}_0 и поэтому она вынесена за знак интеграла. Для чистой морской поверхности – это коэффициент отражения границы «воздух–вода», для морской поверхности, покрытой пленкой нефти, – коэффициент отражения системы «воздух–пленка нефти–вода».

Формула (2) дает выражение для случайной (из-за случайного характера зондируемой морской поверхности) мощности, регистрируемой приемником локатора. Дельта-функции, входящие в выражение (2), показывают, что принимаемый сигнал имеет характер бликов (выбросов), возникающих при зеркальных отражениях лазерного пучка на морской поверхности.

Физической основой измерения толщины нефтяных пленок на водной поверхности методом активной лазерной локации является зависимость коэффициента отражения системы «воздух–пленка нефти–вода» от толщины пленки и длины волны излучения.

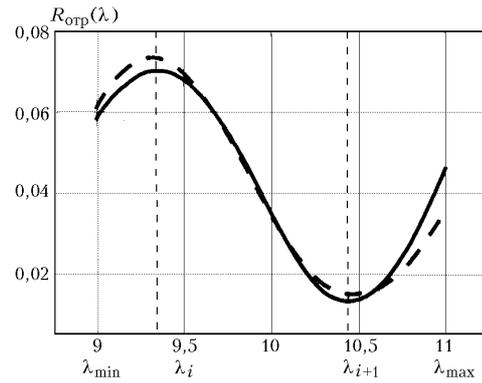
Коэффициент отражения по интенсивности $R_{отр}$ системы «воздух–пленка нефти–вода» имеет вид [5, 6] (при облучении морской поверхности вертикально вниз):

$$R_{отр}(\lambda, d) = \left| \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}} \right|^2, \quad (3)$$

где $Z_j = 1/m_j$ – волновое сопротивление j -й среды; $m = n + ik$ – комплексный показатель преломления среды; n, k – показатели преломления и поглощения среды; $\alpha(\lambda) = 2\pi n_2/\lambda$, λ – длина волны излучения лазера; d – толщина нефтяной пленки; индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к воздуху, нефти и воде.

Как видно из формулы (3), коэффициент отражения $R_{отр}$ (а значит, и интенсивность излучения, регистрируемая приемником лазерного измерителя) зависит от толщины нефтяной пленки d , поэтому величину d можно восстановить по измерениям интенсивности отраженного излучения (если известны показатели преломления и поглощения нефтепродукта).

Перспективным при измерениях толщины нефтяной пленки является использование лазера с перестраиваемой длиной волны излучения. На рисунке показан вид функции $R_{отр}(\lambda)$ для области 9–11 мкм (что соответствует диапазону перестройки $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$, например CO₂-лазера). Сплошная кривая – зависимость $R_{отр}(\lambda)$, а штриховая – ее аппроксимация синусоидальной функцией; λ_i – положение экстремумов функции $R_{отр}(\lambda)$.



Зависимость $R_{отр}(\lambda)$ от длины волны излучения

Известны способы измерения толщины пленки, основанные на использовании перестраиваемого по длине волны излучения и регистрации зависимости интенсивности отраженного излучения от длины волны [7, 8]. Согласно этим способам толщину пленки определяют, проводя анализ зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны и измеряя расстояния между экстремумами (максимумами или минимумами) или число экстремумов на диапазоне перестройки длины волны излучения лазерного источника. По положению соседних экстремумов толщину пленки определяют по формуле

$$d = \frac{1}{2n_2(\lambda_{i+1} - \lambda_i)} \lambda_i \lambda_{i+1}.$$

Недостатком этих способов является невозможность измерения толщины тонких пленок, когда число экстремумов в зависимости интенсивности отраженного излучения от длины волны становится меньше двух. Чтобы проводить измерение толщины тонких пленок нефтепродуктов (когда на диапазоне перестройки имеется лишь один экстремум или даже ни одного), можно использовать алгоритм обработки, основанный на аппроксимации измеренной зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны излучения некоторой заданной функцией. Эта аппроксимирующая функция может быть функцией, представляющей собой выражение (3) для коэффициента отражения трехслойной системы «воздух–пленка нефти–вода», или синусоидальной функцией вида

$$R_{отр}(\lambda) \cong A \sin \left(\frac{4\pi n_2(\lambda)\tilde{d}}{\lambda} + B \right) \exp \left(- \frac{4\pi k_2(\lambda)\tilde{d}}{\lambda} \right) + C, \quad (4)$$

где A, B, C, \tilde{d} – параметры аппроксимации.

Аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов по полученным отсчетам принятого сигнала на выбранном диапазоне длин волн. Ищется глобальный минимум функции среднеквадратического отклонения аппроксимирующей функции и данных измерений. Параметры аппроксимации (а значит, и толщина нефтяной пленки) определяются

численно при наилучшем соответствии данных измерений аппроксимирующей функции.

Для проверки работоспособности описанного алгоритма проводилось математическое моделирование измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности. Моделирование проводилось по замкнутому циклу: задавалась толщина нефтяной пленки d на водной поверхности; выбирался диапазон перестройки длины волны лазерного излучения; моделировались результаты измерений на длинах волн зондирования; для некоторого текущего значения \tilde{d} толщины нефтяной пленки вычислялись значения аппроксимирующих функций и среднеквадратические отклонения $\xi(d, \tilde{d})$ аппроксимирующих функций от данных «измерений»; находились значения \tilde{d} , при которых функция $\xi(d, \tilde{d})$ имеет минимумы; выбирался глобальный минимум и соответствующая ему величина \tilde{d} принималась за восстановленную из данных «измерений» толщину пленки нефти d_b .

При проведении математического моделирования диапазон перестройки был выбран равным 9–11 мкм, а число длин волн на диапазоне перестройки было равно 100. Толщина d нефтяной пленки на водной поверхности задавалась равной 6, 10 и 14 мкм (при этом на диапазоне перестройки коэффициент отражения $R_{отр}(\lambda)$ соответственно не имел ни одного экстремума (для $d = 6$ мкм), имел только один максимум (для $d = 10$ мкм) и два максимума (для $d = 14$ мкм)).

Результаты математического моделирования восстановления толщины пленки нефти для аппроксимации формулами (3), (4) и разных относительных среднеквадратических значений шума измерения приведены в таблице.

Эти результаты показывают, что алгоритм, основанный на аппроксимации измеренной зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны излучения и поиске параметров аппроксимации для наилучшего согласия данных измерений аппроксимирующей функции, позволяет с приемлемой точностью восстанавливать толщину тонких пленок нефти на водной поверхности. Точность восстановления тол-

щины пленок нефти особенно высока (менее единицы процентов) для аппроксимирующей функции (3).

Относительная ошибка $\Delta = |(d - d_b)/d| \cdot 100\%$ определения толщины пленки нефти

Относительное среднеквадратическое значение шума	Аппроксимация					
	формулой (3)			формулой (4)		
	Заданная толщина пленки нефти d , мкм					
	6	10	14	6	10	14
0,05	0,085	0,055	0,031	17,2	10,2	0,77
0,2	0,37	0,23	0,10	17,3	10,1	1,59
0,4	0,73	0,47	0,20	13,4	6,3	3,21

В заключение отметим, что при больших шумах использование предварительного сглаживания измеренных реализаций сигнала позволяет значительно уменьшить ошибки восстановления толщины пленок нефтепродуктов описанным методом.

1. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. *Дистанционный контроль верхнего слоя океана* / В.М. Орлок, И.В. Самохвалов, М.Л. Белов, В.С. Шама-наев, В.М. Клишкин, А.В. Белохвостиков, И.Э. Пеннер, Р.Г. Сафин, А.Б. Юдовский. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
3. *Элементы теории светорассеяния и оптическая локация* / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.Г. Матвиенко, М.Л. Белов, А.Н. Кожевников. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
4. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козищев В.А.* О форме эхоимпульса при лазерном зондировании взволнованной морской поверхности // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 935–940.
5. *Бори М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
6. *Гуревич И.Я., Шифрин К.С.* Отражение видимого и ИК-излучения нефтяными пленками на море // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 166–176.
7. *Устройство для автоматического измерения толщины пленки.* Пат. 3-57407. Япония, G01B 11/06.
8. *Method of measuring film thickness.* Пат. 4,645,349. США, G01B 11/06.

M.L. Belov, S.V. Berezin, V.A. Gorodnichev, V.I. Kozintsev. Method of remote control over thin oil film thickness on water surfaces using the tunable lasers.

The paper describes a method of remote control over oil film thickness using tunable laser. The method is based on approximation of measured dependency of the reflected signal on the wavelength and finding the best approximation coefficients to fit the measured data. It is shown, that the method allows precise reconstruction of thin oil film thickness on the water surface.