Н.А.Бахтинов, М.Л.Белов
НИИ радиоэлектроники и лазерной техники, г.Москва
С.В.Березин, В.А.Городничев, В.И.Козинцев
Московский технический университет им. Н.Э.Баумана

УДК 551.501

ДИСТАНЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследован дистанционный метод измерения толщины пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности, основанный на использовании лазерного источника с перестраиваемой длиной волны излучения. Показано, что использование алгоритма сглаживания данных измерений позволяет с высокой точностью восстанавливать толщину пленок нефтепродуктов на морской поверхности.

The paper describes a method of remote control of oil film thickness on rough sea surfaces that uses laser with tunable wavelength. It is shown, that using algorithm of measurement data smoothing allowes precise thickness reconstruction of oil films on sea surface.

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать обширные водные поверхности за сравнительно малый промежуток времени. Одним из наиболее перспективных дистанционных методов является лидарный метод зондирования. Лидарный метод не требует естественного освещения, может использоваться в широком диапазоне атмосферных

условий независимо от времени суток, обладает высокой пространственно-угловой разрешающей способностью, возможностью фильтрации и временного стробирования полезного сигнала на фоне помех (солнечных бликов, импульсов обратного рассеяния от атмосферных слоев и т.п.).

Рассмотрим отражение лазерного пучка от морской поверхности. Будем считать, что длина волны излучения лежит в ИК-диапазоне, где поглощение водой велико, так что основная доля сигнала 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 $u(r_r)$ лазерного пучка отраженного взволнованной морской поверхностью S можно представить в виде

$$u(r_r) = \frac{1}{4\pi i}\int_S v(r, r_r) V(r) u_o(r) [n(r)\tilde{q}(r)] dr, \quad (1)$$

где $\tilde{q}(r) = -k\nabla_S(|r - r_r| + |r_s - r|)$; $n(r) = \{n_x, n_y, n_z\}$ – единичный вектор нормали к взволнованной морской поверхности S в точке r; r_s и r_r – векторы, определяющие положение соответственно источника и точки наблюдения; $u_o(r)$ поле лазерного источника на поверхности S; $v(r, r_r)$ – поле точечного источника; $V(r)$ коэффициент отражения; k – волновое число.

Используя формулу (1) и переходя от интегрирования по случайно-неровной поверхности S к интегрированию по ее проекции S_o на плоскость $z = 0$, получим формулу для мощности, регистрируемой приемником при моностатической локации лазерным пучком взволнованной морской поверхности (однородный участок морской поверхности, облучение вертикально вниз)

$$P = V^2 \int_{S_o} \frac{dR_o}{n_z} E_s(R_o) E_r(R_o); \quad (2)$$
$$\delta\{K_x[R_{xo}s - 2\gamma_x]\}\delta\{K_y[R_{yo}s - 2K_x\gamma_y]\},$$

где

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

$\delta(x)$ – дельта-функция; R_o – вектор в плоскости $z = 0$; $E_s(R)$ и $E_r(R)$ – освещенность на поверхности соответственно от действительного и фиктивного источников с параметрами приемника; L – расстояние от центра освещенного пятна (на морской поверхности) до локатора; $\gamma = \{\gamma_x, \gamma_y\}$ – вектор наклонов неровной поверхности S; V^2 – коэффициент отражения Френеля от не возмущенной волнением морской поверхности.

При моностатическом зондировании на приемник попадает отраженное излучение только от тех площадок на морской поверхности, которые перпендикулярны оптической оси локатора. Таким образом, величина V^2 в формуле (2) – это коэффициент отражения Френеля от не возмущенной волнением плоской морской поверхности при вертикальном падении излучения. Для чистой морской поверхности это коэффициент отражения границы воздух – вода, для морской поверхности, покрытой пленкой нефти, – коэффициент отражения системы воздух – пленка нефти – вода.

Коэффициент отражения по интенсивности $V^2 = R_{\text{отр}}$ системы воздух пленка нефти вода имеет вид (при облучении водной поверхности вертикально вниз):

$$R_{\text{отр}}(\lambda, d) = \left| \frac{age^{-i\alpha(\lambda)d} + bce^{+i\alpha(\lambda)d}}{ace^{-i\alpha(\lambda)d} + bge^{+i\alpha(\lambda)d}} \right|^2 \quad (3)$$

где $a = (Z_1 + Z_2)$; $b = (Z_1 - Z_2)$; $c = (Z_2 + Z_3)$; $g = (Z_2 - Z_3)$; $\alpha(\lambda) = 2\pi m/\lambda$; $Z_j = 1/m_j$ волновое сопротивление j-й среды, соответственно для воздуха, нефти и воды j равен 1, 2 и 3; $m = n + ik$ – комплексный показатель преломления среды; n и k – показатели преломления и поглощения среды; λ – длина волны излучения лазера; d толщина нефтяной пленки.

Как видно из формулы (3), коэффициент отражения $R_{\text{отр}}$ (а значит, и интенсивность излучения, регистрируемая приемни-

ком лазерного измерителя) зависит от толщины нефтяной пленки, и поэтому величину d можно получить по измерениям интенсивности отраженного излучения, используя лазерный источник с перестраиваемой длиной волны излучения и метод, основанный на аппроксимации измеренной зависимости интенсивности отраженного от водной поверхности сигнала от длины волны излучения и поиске параметров аппроксимации для наилучшего соответствия данных измерений аппроксимирующей функции. Этот алгоритм позволяет для плоской границы раздела воздух – вода с приемлемой точностью оценивать толщину тонких пленок нефти на водной поверхности. Однако при зондировании взволнованной морской поверхности лазерные сигналы, регистрируемые приемником локатора, являются случайными величинами и непрерывно изменяются (так как по трассе измерения случайным образом меняются высота и наклон облучаемых участков водной поверхности и случайным является количество бликов, попадающих на приемник). Флуктуирующий характер принимаемых сигналов создает трудности для работы с описанным алгоритмом (ошибка может достигать 100 %). Поэтому возникает необходимость в специальных алгоритмах предварительной обработки, сглаживающих случайные изменения сигналов, регистрируемых приемником лазерного локатора от взволнованной водной поверхности.

В инженерной практике для сглаживания часто используют операторы, основанные на принципе наименьших квадратов, операторы текущего среднего, экспоненциального сглаживания, оператор Бернштейна, процедуры, основанные на фильтрации принимаемого сигнала, сглаживающие сплайны.

С целью оценки различных алгоритмов сглаживания проводилось математическое моделирование восстановления толщины пленки нефти по данным лидарных измерений в случае флуктуаций принимаемого сигнала для разных относительных средних квадратических значений шума измерения и различных процедур предварительного сглаживания уровней сигналов.

Результаты математического моделирования показывают, что процедуры сглаживания позволяют убрать резкие случайные изменения уровня сигнала. Использование для сглаживания уровней сигналов кубических сплайнов позволяет более надежно установить толщину нефтяной пленки на водной поверхности по данным измерений и существенно уменьшить ошибку измерения даже при очень сильных флуктуациях принимаемого сигнала.