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

УДК 551.501

ДВУХЛУЧЕВОЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследован лазерный метод контроля нефтяных загрязнений на морской поверхности, основанный на зондировании морской поверхности двумя оптическими пучками: вертикально вниз и под углом вдоль линии движения. Показано, что использование двухлучевого метода зондирования позволяет с высокой достоверностью обнаруживать нефтяные загрязнения на морской поверхности и отличать их от областей со сглаженным волнением морской поверхности и областей с высоким коэффициентом отражения.

In this paper laser method of the control of petroleum pollution on a sea surface, based on sounding of sea surface by two optical beams – vertically downwards and under a corner along a line of a movement, is considered. It is shown that, use of two-beam sounding method allows with high reliability to detect petroleum pollutions on sea surface and to distinguish them from areas with the smoothed roughnesses of sea surface and areas with high factor of reflection.

Обнаружение нефтяных загрязнений дистанционным лазерным методом обычно проводят в ближнем (1,06 мкм) или среднем (10,6 мкм) инфракрасном диапазоне спектра, измеряя интенсивность отраженного от водной поверхности излучения и определяя контраст K интенсивности отраженного излучения, регистрируемого от чистой водной поверхности и поверхности воды, покрытой пленкой нефтепродуктов.

Контраст, характеризующий различие отражательных свойств поверхности чистой воды и воды, покрытой нефтяной пленкой,

$$K = J_{oil} / J_o, \qquad (1)$$

где J_o – уровень сигнала, регистрируемого приемником локатора от поверхности чистой воды; J_{oil} – уровень сигнала, регистрируемого приемником локатора от поверхности воды, покрытой пленкой нефти.

При обнаружении нефтяных загрязнений на поверхности воды лидар может не проводить абсолютных измерений. В самолетном варианте он регистрирует в начале полета над морской поверхностью сигнал от поверхности чистой воды. При попадании лазерного пятна подсвета на нефтяное пятно (в месте разлива нефти или нефтепродуктов) регистрируемый лидаром сигнал резко возрастает: проявляется контраст между исследуемым участком и чистой водной поверхностью.

Для уверенного обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды контраст нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность должен быть не меньше некоторого порогового значения, обычно $K_r \geq 1{,}5$.

Описанный метод позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения на морской поверхности, однако он может идентифицировать как нефтяные загрязнения участки морской поверхности и без пленки нефти. Дело в том, что область с высокой интенсивностью отраженного излучения может быть и областью со сглаженным ветровым волнением или с высоким коэффициентом отражения.

Контраст яркости отраженного излучения от чистой морской поверхности и водной поверхности, покрытой пленкой нефти, обусловлен двумя причинами: во-первых, нефтяная пленка имеет иной коэффициент отражения, чем граница раздела воздух – вода, во-вторых, нефтяная пленка сглаживает волнение морской поверхности. Поэтому контроль только одного параметра – интенсивности отраженного излучения (который учитывает оба эффекта комплексно) – не может обеспечить высокую достоверность обнаружения нефтяных загрязнений. Необходимо независимо и одновременно контролировать оба эффекта: сглаживание ветрового волнения и изменение коэффициента отражения морской поверхности. Это может быть достигнуто использованием дополнительной информации о направлении привóдного ветра и специальной геометрической схемы облучения морской поверхности. Такая схема зондирования морской поверхности использует два узких лазерных пучка: один направлен вертикально вниз, второй под углом θ вдоль (или поперек) линии полета (далее для определенности рассматривается случай, когда второй луч направлен вдоль линии полета). Режим подсвета может быть как непрерывным, так и импульсным. В качестве контролируемого параметра используются мощность эхо-сигналов, регистрируемых при отражении от морской поверхности каждого из двух лазерных пучков: P_o и P_x – мощность эхо-сигнала для лазерного пучка, направленного вертикально вниз и под углом вдоль линии полета соответственно. При импульсном подсвете P_o и P_x – мощность в момент максимума регистрируемого импульсного локационного сигнала.

Мощность эхо-сигналов, регистрируемых фотоприемником лидара от взволнованной морской поверхности, при импульсном подсвете и для небольших углов локации $\theta \ll 1$ и $\theta \ll \frac{\tau c}{4}(C_s+C_r)^{1/2}$ соответственно

$$P_o \cong a_1 a_2;\ P_x \cong a_1 a_2 \exp\{-0{,}5 q_x^2/(q_z^2\gamma_x^2)\}$$

Здесь

$$a_1 = \frac{V^2}{8\pi(\gamma_x^2\gamma_y^2)^{1/2}};$$

$$a_2 = 0{,}5 a_s a_r c\tau\pi^{1/2} L^{-4}(C_s + C_r)^{-1} \times$$

$$\times(\tau^2 c^2/16 + 2\sigma^2)^{-1/2};$$

$$q_x = 2\sin\theta;\ q_z = 2\cos\theta;$$

$$\frac{1}{\gamma_x^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\gamma_u^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\gamma_\sigma^2};\ \frac{1}{\gamma_y^2} = \frac{\cos^2\varphi}{\gamma_\sigma^2} + \frac{\sin^2\varphi}{\gamma_u^2};$$

$$\gamma_u^2 = 3{,}16\cdot 10^{-3} U;\ \ \gamma_\sigma^2 = 0{,}003 + 1{,}92\cdot 10^{-3} U;$$

$$\sigma = 0{,}016\cdot U^2;$$

U – скорость приво́дного ветра, м/с; σ^2 – дисперсия высот морской поверхности; γ_x^2, и γ_y^2 – дисперсии наклонов морской поверхности соответственно вдоль и поперек линии полета; γ_u^2, γ_σ^2 – дисперсии наклонов морской поверхности вдоль и поперек направления ветра; φ – угол между осью x и направлением ветра; θ – угол локации (угол между оптической осью лидара и направлением вертикально вниз); L – расстояние от лидара до морской поверхности; V – коэффициент отражения Френеля для морской поверхности; τ – длительность зондирующего импульса.

Для прозрачной аэрозольной атмосферы

$$a_s = P_u \exp(-\tau_a)/(\pi\alpha_s^2);\ a_r = r_r^2 \exp(-\tau_a);$$

$$C_{s,r} = (\alpha_{s,r} L)^{-2}$$

где $2\alpha_{s,r}$ угол расходимости источника излучения и угловое поле зрения приемной системы; P_b – мощность, излучаемая источником; r_r – эффективный размер приемной апертуры; τ_a – оптическая толщина атмосферы.

Сигналы P_o и P_x, регистрируемые приемником лидара, используются для вычисления отношения

$$\frac{P_x}{P_o} = \exp\{0{,}5 q_x^2/(q_z^2\gamma_x^2)\}$$

и далее для вычисления γ_x^2 и γ_y^2 по известным φ и γ_x^2.

По дисперсиям γ_x^2 и γ_y^2 рассчитываются параметры M и N:

$$M = (\gamma_x^2\gamma_y^2)^{-1/2};\ N = P_o M = \frac{V^2}{8\pi} a_2.$$

Первый содержит информацию только о дисперсии наклонов морской поверхности, а второй – только о коэффициенте отражения исследуемого участка морской поверхности. Строго говоря, N зависит еще и от σ^2, однако длительность зондирующего импульса τ всегда можно выбрать так, что $\tau^2 c^2/16 >> 2\sigma^2$ и снять эту зависимость от σ^2

По параметрам M и N можно контролировать одновременно два эффекта: сглаживание ветрового волнения и изменение коэффициента отражения морской поверхности – и значительно повысить достоверность обнаружения нефтяных загрязнений.