

Дистанционный лазерный четырехволновой метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности

© В.А. Городничев, М.Л. Белов, А.В. Кувшинов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Статья посвящена актуальной в настоящее время задаче контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности. Разработан лазерный спектрофотометрический метод, позволяющий дистанционно проводить измерения толщины пленок нефти и нефтепродуктов на речных, озерных и морских акваториях. Лазерный измеритель основан на использовании четырех длин волны излучения. Он расположен на авиационном носителе и облучает морскую поверхность вертикально вниз. Показано, что разработанный четырехволновой лазерный метод позволяет измерить толщину тонких (толщиной менее длины волны лазерного излучения) пленок нефти и нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности с погрешностью не более 20 %.

Ключевые слова: дистанционный лазерный метод, морская поверхность, пленки нефтепродуктов, измерение толщины пленок.

Нефть и нефтепродукты — самые распространенные вещества, загрязняющие акваторию нашей планеты [1, 2]. На сегодняшний день наиболее эффективными для дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с авиационных носителей являются лазерные флуоресцентные и спектрофотометрические методы [3–6].

Важное преимущество спектрофотометрических методов заключается в относительной простоте аппаратуры (а следовательно, и ее относительно низкой стоимости). Недостаток большинства этих методов — необходимость проведения многоспектральных измерений (при использовании нескольких десятков спектральных каналов измерения). Поэтому перспективным направлением является разработка новых спектрофотометрических методов, позволяющих проводить измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с использованием только нескольких длин волн зондирования.

Будем считать, что лазерный локаатор расположен на авиационном носителе и облучает морскую поверхность в надир (вертикально вниз). Рассмотрим отражение зондирующего лазерного пучка от взволнованной морской поверхности. Рассеяние волн оптического диапазона на морской поверхности удовлетворительно описывается в рамках метода Кирхгофа, учитывающего зависимость отражательной способности взволнованной морской поверхности от степени ее не-

ровности и оптических характеристик границы раздела воздух — вода [7].

Учтем, что длина волны λ излучения мала по сравнению с характерными радиусами кривизны и высотами морской поверхности. Считаем, что скорость приводного ветра не особенно велика (менее 5...9 м/с) и пены на поверхности моря нет. Режим излучения лазерного источника для простоты изложения полагаем непрерывным (импульсный режим работы источника излучения не повлияет на основные положения рассматриваемого ниже метода). Тогда мощность $P(\lambda)$, регистрируемая приемником лазерного локатора при моностатическом зондировании вертикально вниз однородного участка взволнованной морской поверхности (чистой или покрытой пленкой нефтепродуктов), описывается следующей формулой [7]:

$$P(\lambda) = R_{\text{ref}}(\lambda, d) \int \frac{d\mathbf{R}_0}{n_z} E_s(\mathbf{R}_0) E_r(\mathbf{R}_0), \quad (1)$$

$$\delta\{K_x[R_{x0}s - 2\gamma_x]\} \delta\{K_y[R_{y0}s - 2K_x\gamma_y]\},$$

где

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

Здесь $\delta(x)$ — дельта-функция; \mathbf{R}_0 — вектор в плоскости $z = 0$; $E_s(\mathbf{R})$, $E_r(\mathbf{R})$ — освещенности на морской поверхности от действительного и фиктивного источников с параметрами приемника [8]; L — высота полета авиационного носителя над морской поверхностью (над плоскостью $z = 0$); $\gamma = \{\gamma_x, \gamma_y\}$ — вектор наклонов взволнованной морской поверхности S ; n_z — вертикальная составляющая единичного вектора нормали к взволнованной морской поверхности; $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ — коэффициент отражения от не возмущенной волнением морской поверхности (чистой или покрытой пленкой нефти) при вертикальном падении излучения, зависит от длины волны λ излучения и толщины d пленки.

Дельта-функции, входящие в выражение (1), показывают, что принимаемый сигнал имеет характер бликов, возникающих при зеркальных отражениях лазерного пучка на морской поверхности.

В рассматриваемом случае моностатического зондирования на приемник локатора попадает отраженное излучение только от тех площадок на взволнованной морской поверхности, которые перпендикулярны оптической оси локатора (т. е. при вертикальном зондировании на приемник локатора попадает отраженное излучение от

горизонтальных площадок на взволнованной морской поверхности). Поэтому величина $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ в формуле (1) представляет собой коэффициент отражения Френеля для горизонтальных площадок на взволнованной морской поверхности. Для однородного участка морской поверхности (чистой или покрытой пленкой нефти) величина $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ не зависит от \mathbf{R}_0 , поэтому она вынесена за знак интеграла.

В случае покрытия водной поверхности пленкой нефтепродуктов величина $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ является коэффициентом отражения трехслойной системы воздух — пленка нефти — вода и сложным образом (из-за интерференции излучения, отраженного от границ разделов воздух — пленка нефти и пленка нефти — вода) зависит от длины волны излучения, толщины пленки и характеристик воды и нефтепродукта (рисунок). Эффект интерференции приводит к тому, что результат измерений коэффициента отражения $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ на длине волны λ неоднозначно определяет толщину d пленки.

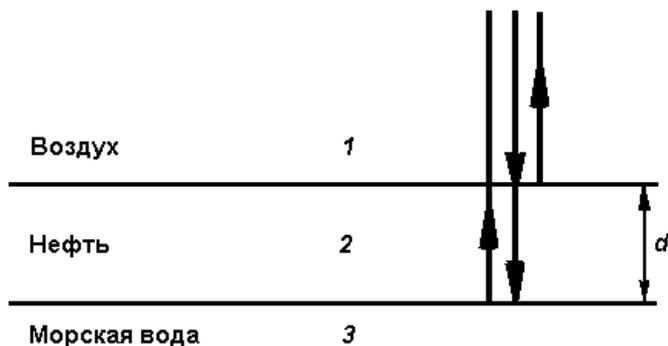


Схема облучения участка водной поверхности

В случае облучения вертикально вниз водной поверхности с пленкой нефти [7]

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

где $Z_j = \frac{1}{m_j}$ — волновое сопротивление j -й среды; $\alpha(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} m_2$;

$m_j = n_j + ik_j$ — комплексный показатель преломления j -й среды; n_j , k_j — показатели преломления и поглощения j -й среды; d — толщина пленки нефти. Индексы 1, 2, 3 относятся к воздуху, нефти и воде.

После ряда громоздких вычислений из формулы (2) с учетом волнового сопротивления Z_j для тонких пленок, для которых $\exp[-4\pi \frac{d}{\lambda_2} k_2(\lambda_2)] \approx 1$, полагая для воздуха $m_1 = n_1 = 1$, имеем

$$R_{\text{ref}}(\lambda, d) = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]}. \quad (3)$$

Здесь r_{12} — коэффициент отражения двухслойной системы воздух — нефть:

$$r_{12} = \sqrt{\frac{[1 - n_2(\lambda)]^2 + k_2^2(\lambda)}{[1 + n_2(\lambda)]^2 + k_2^2(\lambda)}};$$

r_{23} — коэффициент отражения двухслойной системы нефть — вода:

$$r_{23} = \sqrt{\frac{[n_2(\lambda) - n_3(\lambda)]^2 + [k_2(\lambda) - k_3(\lambda)]^2}{[n_2(\lambda) + n_3(\lambda)]^2 + [k_2(\lambda) + k_3(\lambda)]^2}}; \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2(\lambda).$$

Толщину d пленки нефти на поверхности воды можно определить дистанционно, проводя измерения на нескольких длинах волн излучения. Выберем длины волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ излучения так, чтобы они были близки одна другой, причем $\lambda_1 = \lambda_2 - \Delta\lambda$, $\lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda$, $\Delta\lambda \ll \lambda_2$. Тогда для принимаемой мощности на длинах волн излучения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ из выражения (3) (учитывая, что величины $r_{12}^2 r_{23}^2$ и $2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]$ малы по сравнению с единицей), получаем

$$P(\lambda_1) \cong A\{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda_1, d)]\};$$

$$P(\lambda_2) \cong A\{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda_2, d)]\}; \quad (4)$$

$$P(\lambda_3) \cong A\{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda_3, d)]\},$$

где $A = \int_{S_0} \frac{d\mathbf{R}_0}{n_z} E_s(\mathbf{R}_0) E_r(\mathbf{R}_0) \delta\{K_x[R_{x0}s - 2\gamma_x]\} \delta\{K_y[R_{y0}s - 2K_x\gamma_y]\}$ —

величина, зависящая от параметров источника излучения, приемника, их диаграмм направленности, пропускания атмосферы на трассе лазерный локатор — морская поверхность, неровностей зондируемой морской поверхности и слабо изменяющаяся (по сравнению с множителем $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$) с изменением длины волны излучения (так, что если длины волн излучения λ_1 и λ_2 близки, то $A(\lambda_1) \cong A(\lambda_2)$).

Регистрируя принимаемую мощность $P(\lambda_1)$, $P(\lambda_2)$, $P(\lambda_3)$ на длинах волн излучения λ_1 , λ_2 , λ_3 , можно определить отношения

$B(\lambda_1) = \frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)}$, $B(\lambda_3) = \frac{P(\lambda_3)}{P(\lambda_2)}$. Выражения для этих величин имеют следующий вид:

$$B(\lambda_1) = \frac{1 + C \cos[2\beta(\lambda_1, d)]}{1 + C \cos[2\beta(\lambda_2, d)]}, \quad (5)$$

$$B(\lambda_3) = \frac{1 + C \cos[2\beta(\lambda_3, d)]}{1 + C \cos[2\beta(\lambda_2, d)]}.$$

Здесь

$$C = \frac{2r_{12}r_{23}}{r_{12}^2 + r_{23}^2}.$$

Вычитая и складывая уравнения в системе (5) и учитывая, что $\Delta\lambda \ll \lambda_2$, имеем

$$B(\lambda_1) + B(\lambda_3) = 2 \frac{1 + C \cos \varphi_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{1 + C \cos \varphi_2}, \quad (6)$$

$$B(\lambda_3) - B(\lambda_1) \cong 2 \frac{C \sin \varphi_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{1 + C \cos \varphi_2}, \quad (7)$$

где $\varphi_{1,2} = 2\beta(\lambda_{1,2}, d)$.

В уравнения (6) и (7) входит величина $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$. На начальном интервале однозначности тригонометрической функции $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ (когда ее аргумент $\leq \frac{\pi}{2}$) аргумент функции $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ связан с толщиной d пленки нефтепродукта следующим образом:

$$d = \frac{\arcsin|\varphi_1 - \varphi_2|}{4\pi n_2(\lambda_2)\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)} \cong \frac{\lambda_2^2 \arcsin|\varphi_1 - \varphi_2|}{4\pi n_2(\lambda_2)\Delta\lambda}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива для пленок нефти толщиной $d \leq \frac{\lambda_2^2}{8\Delta\lambda n_2(\lambda_2)}$. Это не является жестким условием, особенно для тонких пленок нефти. Например, при значении $\lambda_2 = 1,43$ мкм величина $n_2(\lambda_2) \approx 1,5$ и для $\Delta\lambda = 100$ нм толщина пленки: $d \leq 2$ мкм.

Таким образом, формулы (6) – (8) в принципе позволяют, используя три близкие длины волны зондирования, дистанционно измерить толщину пленки нефти на водной поверхности. Однако при наличии шума измерения решение системы уравнений (6), (7) становится неустойчивым. Более устойчивым является алгоритм, в котором ис-

пользуются формулы (7) и (8) и величина $\sin \varphi_2$, определенная с помощью дополнительного измерения.

Для определения $\sin \varphi_2$ применяют еще одну длину волны λ_4 зондирования, выбранную специальным образом исходя из условия

$$\frac{n_2(\lambda_4)}{\lambda_4} = \frac{n_2(\lambda_2)}{2\lambda_2}.$$

Для длины волны λ_4 отношение $B(\lambda_4) = \frac{P(\lambda_4)}{P(\lambda_2)}$ с использованием тригонометрических формул для косинуса половинного аргумента) имеет следующий вид:

$$B(\lambda_4) = \frac{1 + C \cos[2\beta(\lambda_4, d)]}{1 + C \cos[2\beta(\lambda_2, d)]} = \frac{1 + C 2^{-1/2} \sqrt{1 + \cos[2\beta(\lambda_2, d)]}}{1 + C \cos[2\beta(\lambda_2, d)]}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет по измерениям на длинах волн λ_2 и λ_4 однозначно определить величину $\varphi_2 = 2\beta(\lambda_2, d)$ (а значит, и величину $\sin \varphi_2$). Подставляя найденное значение $\sin \varphi_2$ в формулу (7), можно определить величину $\sin(\varphi_1 - \varphi_2)$ и далее (используя (8)) найти толщину d пленки нефтепродукта.

Ниже приведены результаты математического моделирования работы алгоритма определения толщины пленки нефти:

Заданное значение, мкм	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Найденное значение, мкм	0,39	0,60	0,66	0,99	1,06	1,50

Заданными являются значения толщины пленки — исходные при моделировании, а найденные получены описанным четырехволновым методом в условиях шумов измерений (приведены значения при одиночных измерениях, т. е. для некоторой конкретной реализации шума).

Математическое моделирование проводили при следующих значениях параметров: $\lambda_4 = 2,86$ мкм; $\lambda_2 = 1,43$ мкм; $\Delta\lambda = 0,1$ мкм; относительное среднеквадратичное значение шума составляло 1 %.

Математическое моделирование работы четырехволнового метода, основанного на использовании соотношений (7) – (9) при обработке данных измерений, позволяет показать устойчивость разработанного четырехволнового метода. Ошибки определения толщины тонких (толщиной менее длины волны излучения) пленок нефтепродуктов на водной поверхности не превышают 20 % (для приведенных выше данных — 12 %). Таким образом, разработанный четырехволновой

лазерный метод позволяет дистанционно измерить толщину d пленки нефти для тонких (толщиной менее длины волны излучения) пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности с погрешностью не более 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Другов Ю.С., Родин А.А. *Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007, 200 с.
- [2] Саксонов М.Н., Абалаков А.Д., Данько Л.В., Бархатова О.А., Балаян А.Э., Стом Д.И. *Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли. Физико-химические и биологические методы*. Иркутск, Изд-во Иркутского государственного университета, 2005, 114 с.
- [3] Utkin A.B., Lavrov A., Vilar R. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7994, pp. 1–10.
- [4] Babichenk S., Dudelzak A., Lapimaa J., Lisin A., Poryvkina L., Vorobiev A. Locating water pollution and shore discharges in coastal zone and inland waters with FLS lidar. *EARSeL Proceedings*, 2006, vol. 5, issue 1, pp. 32–41.
- [5] Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в двух узких спектральных диапазонах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 2, с. 39–47.
- [6] Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Козинцев В.И. Лазерный метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения. *Оптика атмосферы и океана*, 2011, т. 24, № 7, с. 568–571.
- [7] Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. *Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 528 с.
- [8] Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. *Основы импульсной лазерной локации*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 573 с.

Статья поступила в редакцию 09.12. 2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Городничев В.А., Белов М.Л., Кувшинов А.В. Дистанционный лазерный четырехволновой метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1373.html>

Городничев Виктор Александрович родился в 1952 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1976 г. Д-р техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 печатных работ. Область научных интересов: лазерная техника и лазерное зондирование. e-mail: gorod@bmstu.ru

Белов Михаил Леонидович родился в 1950 г., окончил МЭИ в 1973 г. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 печатных работ. Область научных интересов: лазерная техника, лазерная локация и атмосферная оптика. e-mail: belov@bmstu.ru

Кувшинов Андрей Владимирович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех печатных работ. Область научных интересов: лазерная техника. e-mail: ekomonit@bmstu.ru

Remote laser four-wave method for measuring thickness of the thin petrochemical films on the rough sea surface

© V.A. Gorodnichev, M.L. Belov, A.V. Kuvshinov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The urgent problem of monitoring oil pollution on water surface is considered. Laser spectrophotometric method for measuring thickness of petrochemical film on river, lake and sea water areas is developed. Laser meter uses four wavelengths of radiation. It is located at an aircraft carrier, and irradiates the sea surface vertically downwards. It is shown that developed laser four-wave method allows measuring thickness of thin oil films and petrochemical films (thickness less than wavelength of laser radiation) on rough sea surface with an error of 20 percent or less.

Keywords: laser method, sea surface, petrochemical film, film thickness measurement.

REFERENCES

- [1] Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefi i nefteproduktov* [Ecologic analyses of oil and petrochemical spills]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2007, 200 p.
- [2] Saksonov M.N., Abalakov A.D., Danko L.V., Barkhatova O.A., Balayan A.E., Stom D.I. *Ekologicheskiy monitoring neftegazovoy otrasli. Fiziko-khimicheskie i biologicheskie metody* [Ecologic monitoring of oil and gas Industry. Physico-chemical and biological methods]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2005, 114 p.
- [3] Utkin A.B., Lavrov A., Vilar R. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7994, pp. 1–10.
- [4] Babichenk S., Dudelzak A., Lapimaa J., Lisin A., Poryvkina L., Vorobyev A. *EARSeL Proceedings*, 2006, vol. 5, issue 1, pp. 32–41.
- [5] Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Priborostroyeniye – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*, 2010, no. 2, pp. 39–47.
- [6] Belov M.L., Belov A.M., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*, 2011, vol. 24, no. 7, pp. 568–571.
- [7] Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy* [Electro-optical system for natural environment ecologic monitoring]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 528 p.
- [8] Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impulsnoy lazernoy lokatsii* [Basics of pulsed laser location]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 573 p.

Gorodnichev V.A. (b.1952) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1976. Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department at the Radioelectronics and Laser Technology Research Institute at Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 200 publications in the field of laser technology and laser sounding. e-mail: gorod@bmstu.ru

Belov M.L. (b.1950) graduated from Moscow Power Engineering Institute in 1973. Dr. Sci. (Eng.), leading scientist at the Radioelectronics and Laser Technology Research Institute at Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 200 publications in the field of laser technology, laser location and optics of atmosphere. e-mail: belov@bmstu.ru

Kuvshinov A.V. (b.1987) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011. Engineer at the Radioelectronics and Laser Technology Research Institute at Bauman Moscow State Technical University. The author of 3 publications in the field of laser technology. e-mail: ekomonit@bmstu.ru