

Радиооптика

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2015. № 06. С. 27–37.

DOI: **10.7463/rdopt.0615.0817268**

Представлена в редакцию: 07.10.2015

Исправлена: 22.10.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 551.501

Дистанционный метод обнаружения нефтяных загрязнений, основанный на зондировании морской поверхности двумя лазерными пучками

Белов М. Л.^{1,*}, Городничев В. А.¹,

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

Кувшинов А. В.¹, Михайловская М. Б.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена исследованию лазерного фотометрического метода контроля нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, основанного на зондировании морской поверхности двумя оптическими пучками - вертикально вниз и под углом вдоль (или поперек) линии движения авиационного носителя. Показано, что использование двухлучевого лазерного фотометрического метода зондирования взволнованной морской поверхности 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.

Ключевые слова: лазер, нефтяные загрязнения, дистанционный фотометрический метод, взволнованная морская поверхность, обнаружение

Введение

Нефть и нефтепродукты являются одним из основных источников загрязнений морских, озерных и речных акваторий. Объем поступающих в моря Мирового океана нефтепродуктов по разным источникам оценивается в 5-15 млн. тонн ежегодно [1-5].

Наиболее актуальна проблема загрязнения нефтью и нефтепродуктами прибрежных районов морей [6]. Здесь в наибольшей степени проявляются отрицательные последствия активной хозяйственной деятельности человека.

В Российской Федерации особенно важное значение экологический контроль приобретает в арктическом регионе, где начато активное освоение природных ресурсов. Существенный экологический риск для арктических морей составляют аварийные разливы нефти, которые могут быть вызваны такими антропогенными факторами, как разведка, освоение и эксплуатация нефтегазовых месторождений, аварии на судах морского и реч-

ного флотов, базах горюче-смазочных материалов, пунктах заправки и перекачки топлива, нефтепроводах.

Загрязнения нефтью и продуктами ее переработки наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами (в настоящее время самолетными и в будущем потенциально спутниковыми), позволяющими обследовать обширные водные поверхности за сравнительно малый промежуток времени. Дистанционные методы также позволяют обнаруживать нефтяные загрязнения на стадии пленки на поверхности воды, т.е. вскоре после разлива. На этой стадии ликвидация нефтяных загрязнений может быть произведена с наименьшими затратами.

Одним из наиболее перспективных дистанционных методов контроля акваторий с целью обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды является фотометрический метод, основанный на лазерном зондировании водной поверхности и регистрации мощности отраженного лазерного излучения. Этот метод 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.).

Данная статья посвящена разработке дистанционного фотометрического метода, основанного на зондировании взволнованной водной поверхности с авиационного носителя двумя лазерными пучками. Такая задача представляет практический интерес для оперативного мониторинга нефтяных загрязнений на морской поверхности.

1. Постановка задачи

Обнаружение нефтяных загрязнений дистанционным лазерным фотометрическим методом обычно проводят в ближнем или среднем инфракрасных диапазонах спектра, измеряя интенсивность отраженного от водной поверхности лазерного излучения и определяя контраст K между интенсивностью отраженного излучения, регистрируемого от чистой водной поверхности и поверхности воды, покрытой пленкой нефтепродуктов (см., например, [7-9]).

Контраст K “нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность”, характеризующий различие в отражательных свойствах чистой и покрытой нефтяной пленкой поверхности воды, обычно определяется следующим образом:

$$K = \frac{P_{oil}}{P_w}$$

где: P_w - мощность лазерного сигнала, регистрируемого приемником лидара от чистой поверхности воды; P_{oil} - мощность сигнала, регистрируемого приемником лидара от поверхности воды, покрытой пленкой нефти.

Для надежного обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды контраст “нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность” должен быть не менее некоторого порогового значения K_t . Обычно считают, что для надежного обнаружения нефтяных загрязнений необходимо использовать порог $K_t \geq 1,5$ [9].

Метод, основанный на лазерном зондировании водной поверхности, позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения на водной поверхности из-за высокого значения контраста K . Однако он имеет недостаток - он может идентифицировать как “нефтяные загрязнения” участки водной поверхности и без пленки нефти, так как область с высоким значением контраста K может быть также областью со сглаженным ветровым волнением или областью с высоким (по разным причинам) коэффициентом отражения.

Контраст яркости отраженного излучения от чистой водной поверхности и водной поверхности покрытой пленкой нефти обусловлен двумя причинами: нефтяная пленка имеет другой коэффициент отражения, чем граница раздела воздух-вода, и нефтяная пленка сглаживает волнение водной поверхности [9]. Поэтому контроль только одного параметра – контраста K (который комплексно учитывает оба эффекта) не может обеспечить высокую достоверность обнаружения нефтяных загрязнений.

В работе проводится исследование возможностей лазерного фотометрического метода, основанного на контроле двух параметров, регистрируемых при зондировании водной поверхности двумя лазерными пучками.

2. Лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений, основанный на зондировании морской поверхности двумя лазерными пучками

Для повышения достоверности обнаружения нефтяных загрязнений необходимо независимо контролировать наличие одновременно двух эффектов – сглаживания (из-за нефтяного загрязнения) ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности.

Это может быть достигнуто использованием дополнительной информации о приводном ветре (направлении или величине скорости приводного ветра) и специальной геометрической схемы для облучения морской поверхности.

Такая схема зондирования морской поверхности имеет два узких лазерных пучка: один лазерный пучок направлен вертикально вниз, второй - под углом θ вдоль (или поперек) линии полета (далее для определенности рассматривается случай, когда второй луч направлен под углом вдоль линии полета).

Режим подсвета может быть как непрерывным, так и импульсным. В качестве контролируемых параметров используются мощности эхо-сигналов P_0, P_x , регистрируемых при отражении от морской поверхности каждого из двух лазерных пучков (P_0 - мощность эхо-сигнала для лазерного пучка направленного вертикально вниз, P_x - под углом вдоль

линии полета). При импульсном подсвете P_0, P_x - мощности в моменты максимумов регистрируемых импульсных лазерных сигналов, отраженных от волной поверхности.

Мощности эхо-сигналов P_0, P_x , регистрируемые фотоприемником лидара от взволнованной морской поверхности, определяются (при импульсном подсвете, для небольших (относительно вертикали) углов зондирования $\theta \ll 1$, $\theta \ll \frac{\tau c}{4}(C_s + C_r)^{1/2}$) следующими формулами [10]:

$$P_0 \cong a_1 a_2;$$

$$P_0 \cong a_1 a_2 \exp\{-0,5q_x^2 / (q_z^2 \gamma_x^2)\}, \quad (1)$$

где:

$$a_1 = \frac{V^2}{8\pi(\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}}; \quad q_x = 2 \sin \theta; \quad q_z = 2 \cos \theta;$$

$$a_2 = 0,5a_s a_r c \tau \pi^{1/2} L^{-4} (C_s + C_r)^{-1} (\tau^2 c^2 / 16 + 2\sigma^2)^{-1/2};$$

$$\sigma = 0,016 * U^2;$$

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

$$\frac{1}{\gamma_y^2} = \frac{\cos^2 \varphi}{\gamma_\sigma^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\gamma_u^2}; \quad (3)$$

$$\gamma_u^2 = 3,16 * 10^{-3} U; \quad \gamma_\sigma^2 = 0,003 + 1,92 * 10^{-3} U; \quad (4)$$

U - скорость приводного ветра (м/с); σ^2 - дисперсия высот морской поверхности; γ_x^2, γ_y^2 - дисперсии наклонов морской поверхности вдоль и поперек линии полета; $\gamma_u^2, \gamma_\sigma^2$ - дисперсии наклонов морской поверхности по направлению ветра и поперек направления ветра; φ - угол между осью x и направлением ветра; θ - угол зондирования (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:

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

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

Сигналы P_o, P_x , регистрируемые приемником лидара, используются для последовательного вычисления следующих величин:

1. Вычисление отношения:

$$\frac{P_x}{P_o} = \exp\{-0,5q_x^2 / (q_z^2 \gamma_x^2)\}. \quad (4)$$

2. По известной величине $\frac{P_x}{P_o}$ из формулы (4) вычисляется величина дисперсии наклонов γ_x^2 .

3. По предварительным измерениям γ_x^2 для чистой водной поверхности и дополнительной информации о приводном ветре (об одном из двух его параметров - направлении (угол ϕ) или величине скорости приводного ветра U) из формул (2), (4) вычисляется второй (неизвестный) параметр приводного ветра.

4. Далее по вычисленной величине γ_x^2 для зондируемой поверхности и известным параметрам приводного ветра - ϕ и U вычисляется γ_y^2 .

5. Значения дисперсий γ_x^2, γ_y^2 используются для вычисления величин:

$$M = (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}; \quad (5)$$

$$N = P_o M = \frac{V^2}{8\pi} a_2. \quad (6)$$

Величина M содержит информацию только о дисперсии наклонов морской поверхности, а величина N - только о коэффициенте отражения исследуемого участка морской поверхности. (Строго говоря величина N зависит еще и от величины σ^2 - дисперсии высот морской поверхности. Однако длительность зондирующего импульса τ всегда можно выбрать так, что $\tau^2 c^2 / 16 \gg 2\sigma^2$. В этом случае величина N зависит только от коэффициента отражения исследуемого участка морской поверхности).

Совместное использование величин M, N позволяет контролировать одновременно два эффекта - сглаживание ветрового волнения и изменение коэффициента отражения

морской поверхности и тем самым значительно повышает достоверность обнаружения нефтяных загрязнений.

3. Результаты математического моделирования

Для исследования возможностей лазерного метода, основанного на контроле двух параметров, регистрируемых при лазерном зондировании двумя лазерными пучками водной поверхности, проводилось математическое моделирование.

Исследовалась зависимость от скорости приводного ветра контрастов:

$$K_N = \frac{N_{oil}}{N_w};$$

$$K_M = \frac{M_{oil}}{M_w},$$

где

N_{oil}, N_w - значение величины N для исследуемого участка морской поверхности и чистой морской поверхности;

M_{oil}, M_w - значение величины M для исследуемого участка морской поверхности и чистой морской поверхности.

Моделирование контрастов K_M, K_N проводилось с использованием формул (5) и (6). Длины волны полагалась равной 1,064 мкм. При расчете использовались следующие значения параметров:

$$\varphi = 0;$$

$$\text{чистая морская поверхность: } V^2 = 0,02;$$

$$\text{нефтяная пленка: } V^2 = 0,04;$$

$$\tau = 10 \text{ нсек, } L = 1 \text{ км, } \alpha_s = 1 \text{ мрад, } \alpha_r = 2 \text{ мрад, } \theta = 0,05 \text{ рад.}$$

Принималось [9], что для нефтяных пленок дисперсии наклонов $\gamma_{x,y}^2$ уменьшаются в 3 раза, а для слика (области со сглаженным ветровым волнением) в 30 раз.

На рис.1, 2 представлены графики, иллюстрирующие возможности описанного метода обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности.

На рисунке 1 представлена зависимость от скорости приводного ветра контраста K_N , а на рисунке 2 - зависимость от скорости приводного ветра контраста K_M .

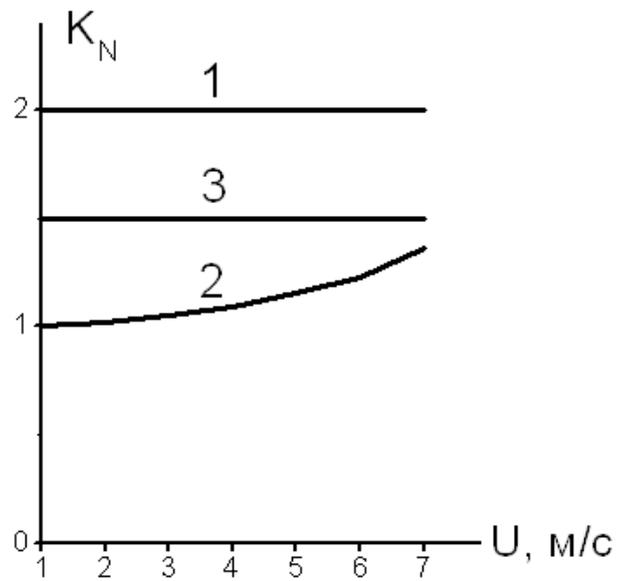


Рис.1 Зависимость контраста K_N от скорости приводного ветра

На рисунках 1 и 2 кривая 1 соответствует контрастам “нефтяная пленка - чистая морская поверхность”, кривая 2 – контрастам “слик (участок морской поверхности со сглаженным ветровым волнением) - чистая морская поверхность”, кривая 3 - пороговое значение контраста $K_t=1,5$.

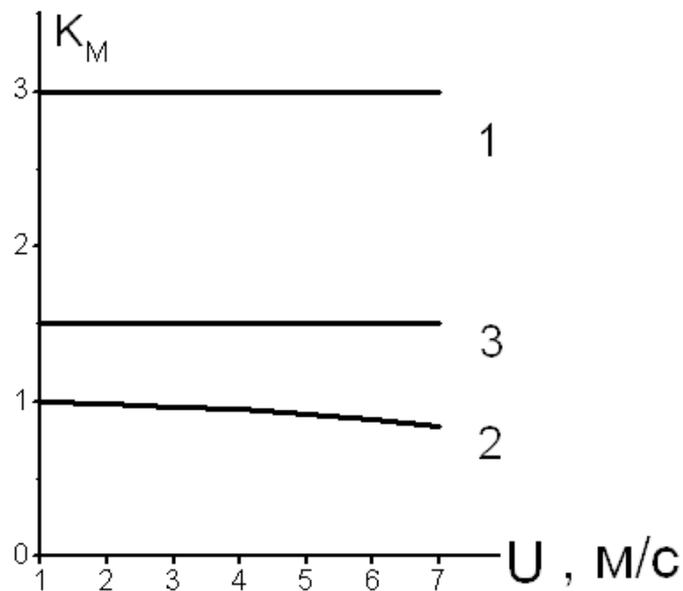


Рис.2 Зависимость контраста K_M от скорости приводного ветра

Из рисунков видно, что одновременное использование условий $K_N > K_t$ и $K_M > K_t$ позволяет независимо контролировать наличие двух эффектов - сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности и тем самым с высокой достоверностью (даже, если прием сигналов будет осуществляться в больших шумах) принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности и отличать участки с нефтяными загрязнениями на морской поверхности от участков со сглаженным ветровым волнением или участков с высоким коэффициентом отражения.

Выводы

Таким образом, лазерный фотометрический метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, использующий дополнительную информацию о приводном ветре (направлении или величине скорости приводного ветра) и специальную геометрическую схему для облучения морской поверхности, позволяет независимо контролировать наличие одновременно двух эффектов - сглаживания ветрового волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности и тем самым позволяет с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Список литературы

1. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - с.270.
2. Губайдуллин, М.Г., Коробов В.Б. Экологический мониторинг нефтегазо-добывающих объектов Европейского Севера России. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2012. – 234 с.
3. Давыдова, С.Л., Тепляков В.В. Экологические проблемы нефтепереработки: Москва : Российский ун-т дружбы народов, 2010. - 173 с.
4. Нефть и экология. Режим доступа: http://www.rusnauka.com/17_PNR_2008/Ecologia/34369.doc.htm (дата обращения 16.06.2015).
5. Загрязнение морей и океанов. Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_oceanov.htm (дата обращения 16.06.2015).
6. Система защиты морских акваторий и прибрежных зон от загрязнения нефтью. Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_oceanov.htm (дата обращения 16.06.2015).
7. Белов М.Л., Городничев В.А., Тухватулина С.А., Стрелков Б.В. Лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, использующий угловое сканирование // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Элек-

трон. журн. 2012. № 7. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/413496.html> (дата обращения 05.06.2015).

8. Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Федотов Ю.В. Неконтактный способ обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды Патент РФ на изобретение № 387977 от 27.04.10.
9. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Из-во МГТУ, 2002, - 528 с.
10. Основы импульсной лазерной локации/ В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Из-во МГТУ, 2010, - 573 с.

Remote Sensing Method of Petroleum Film Detection Using Two Laser Beams for Sounding a Sea Surface

M.L. Belov^{1,*}, V.A. Gorodnichev¹,

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

A.V. Kuvshinov¹, M.B. Mikhailovskay¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser, oil pollution, remote sensing photometric method, rough sea surface, detection

Oil and oil product pollution are more quickly detected by remote methods, which allow us to inspect the vast surface of the water (sea, lake, and river basins) for a relatively short period of time. Remote sensing methods have (except for immediacy of measurements) another important advantage as well. They allow us to detect oil pollution at the stage of slicks (a film on the surface of the water), i.e., soon after the spill. At this stage, cleanup of oil spills can be produced cost-effectively.

One of the most promising remote methods to control basins to detect oil slicks on the water surface is the photometric method, based on the active laser ranging of the water surface and recording the extent of the reflected radiation.

The method, based on the active laser ranging of the water surface allows us to detect the sea surface oil pollution by a high intensity of the reflected radiation. However, it has a drawback - it can identify, as the "oil pollution", also the areas of the sea surface with no oil film, since the area of reflected radiation of high intensity can be also an area with smoothed wind waves or a high reflectivity area.

The brightness contrast of the reflected radiation from the clean sea surface and water surface covered with a film of oil is caused by two reasons: the oil film has other reflectivity than the air-water surface, and the oil film smoothes the wave of the sea surface. Therefore, control of only one parameter - the intensity of the reflected radiation (which takes into account both effects all around) cannot ensure high reliability of oil pollution detection.

The paper studies the capabilities of laser remote photometric method that allows us to control two parameters recorded at active ranging of the water surface by two laser beams. It is shown that sharing the values of these two parameters provides the possibility to control two effects simultaneously - smoothing of wind waves and changing the reflection coefficient of the sea surface. This allows a high degree of confidence (even if there will be a large noise receiving) to decide if there is oil pollution on the sea surface, and to distinguish the oil pollution areas

on the sea surface from the areas with smoothed wind waves or areas with high reflection coefficient.

References

1. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefiti i nefteproduktov* [Ecological analysis in event of oil and oil-products spills]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 270 p. (in Russian).
2. Gubaydullin M.G., Korobov V.B. *Ekologicheskiy monitoring neftegazo-dobyvayushchikh ob'ektov Evropeyskogo Severa Rossii* [Ecological monitoring of oil and gas extraction facilities in European North of Russia]. Arkhangel'sk, IPTs SAFU Publ., 2012. 234 p. (in Russian).
3. Davydova, S.L., Teplyakov V.V. *Ekologicheskie problemy neftepererabotki* [Oil refining ecological problems]. Moscow, PFUR Publ., 2010. 173 p. (in Russian).
4. *Neft' i ekologiya*. [Oil and ecology]. <http://www.rusnauka.com>: archive website. Available at: http://www.rusnauka.com/17_PNR_2008/Ecologia/34369.doc.htm (accessed 16.06.2015). (in Russian).
5. Zagryaznenie morey i okeanov. [Seas and oceans pollution]. <http://www.o8ode.ru>: project website. Available at: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_okeanov.htm (accessed 16.06.2015). (in Russian).
6. Sistema zashchity morskikh akvatoriy i pribrezhnykh zon ot zagryazneniya nef'tyu.]. <http://www.o8ode.ru>: project website. Available at: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_okeanov.htm (accessed 16.06.2015). (in Russian).
7. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Tukhvatulina S.A., Strelkov B.V. Laser method of detection of oil pollution on rough sea surface using angle scanning. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 7, pp. 187-198. (in Russian). DOI: [10.7463/0712.0413496](https://doi.org/10.7463/0712.0413496)
8. Belov M.L., Gorodnichev V.A., Kozintsev V.I., Fedotov Yu.V. *Nekontaktnyy sposob obnaruzheniya neftyanykh zagryazneniy na poverkhnosti vody* [Non-contact method of locating water surface oil spills]. Patent RF, no. 387977, 2010.
9. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V.. *Optiko-elektronnyye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy* [Optoelectronic system of environmental ecological monitoring]. Moscow, MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian).
10. Kozintsev V.I., Belov M.L., Orlov V.M., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii* [Pulsed laser location basics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 573 p. (in Russian).