

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

**В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев, О.А. Смирнова,
Ю.В. Федотов, А.М. Хрусталева**

**Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений
на взволнованной морской поверхности
с помощью двухспектрального метода**

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

Поступила в редакцию 20.03.2006 г.

Рассмотрен метод обнаружения нефтяных загрязнений, основанный на двухспектральном зондировании морской поверхности. Показано, что использование двухспектрального метода зондирования позволяет отличать нефтяные загрязнения от областей со сглаженным ветровым волнением (например, сликом на водной поверхности) и областей с высоким коэффициентом отражения (например, из-за наличия пены на водной поверхности) и тем самым с высокой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

На сегодняшний день наиболее эффективными для дистанционного обнаружения и измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с авиационных носителей являются лазерные флуоресцентные и фотометрические методы (см., например, [1, 2]). Важными преимуществами фотометрических методов являются относительная простота аппаратуры и, следовательно, ее относительно низкая стоимость.

Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений на водной поверхности фотометрическим методом обычно проводят с помощью лазерного локалятора, определяя контраст между интенсивностью отраженного лазерного излучения от чистой водной поверхности и поверхности, покрытой пленкой нефтепродуктов (см., например, [1]). Однако этот метод имеет недостаток — он может идентифицировать как «нефтяные загрязнения» участки поверхности и без нефти, так как область с высокой интенсивностью отраженного излучения может быть также областью со сглаженным ветровым волнением (сликом на морской поверхности, ветровой тенью за островом или высоким берегом) или областью с высоким коэффициентом отражения (например, из-за наличия пены).

Для повышения достоверности обнаружения нефтяных загрязнений необходимо контролировать наличие одновременно двух эффектов: сглаживания волнения и изменения коэффициента отражения морской поверхности (см., например, [3]). Один из таких методов (трехлучевой лазерный метод) представлен в [4]. Ниже описывается двухспектральный лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений, позволяющий проводить контроль одновременно сглаживания волнения и изменения коэффици-

ента отражения морской поверхности и тем самым с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений.

Будем считать, что импульсный лазерный локалятор расположен на авиационном носителе и облучает морскую поверхность вертикально вниз узким пучком на длинах волн λ_1 и λ_2 . Длины волн излучения лежат в инфракрасном диапазоне, так что принимаемый лазерный сигнал создается излучением, зеркально отраженным морской поверхностью.

Для контроля нефтяных загрязнений на исследуемой акватории выбирается контрольный участок с заведомо чистой (без нефтяных загрязнений) морской поверхностью, данные измерения от которого используются потом для нормировки. Если исследуемая акватория состоит из сильно отличающихся между собой (в смысле условий волнения) частей, то участок с заведомо чистой поверхностью нужно выбрать в пределах каждой однородной части акватории (методика выбора такого участка может быть самая разная в зависимости от конкретных условий в данном регионе).

На участке с заведомо чистой (без нефтяных загрязнений) морской поверхностью лидар регистрирует мощности эхосигналов $P_w(\lambda_1)$, $P_w(\lambda_2)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 . Если длительность импульса лазерного локалятора выбрать так, чтобы выполнялось неравенство $\tau_s^2 c^2 / 16 \gg 2\sigma_w^2$ (σ_w^2 — дисперсия высот чистой взволнованной морской поверхности, τ_s — длительность импульса лазерного локалятора, c — скорость света), то мощности $P_w(\lambda_1)$, $P_w(\lambda_2)$ определяются формулой [5]:

$$P_w(\lambda_{1,2}) \cong \frac{V_w^2(\lambda_{1,2})}{4\pi(\gamma_{wx}^2 \gamma_{wy}^2)^{1/2}} \frac{a_s(\lambda_{1,2})a_r(\lambda_{1,2})\pi^{1/2}}{L^4(C_s + C_r)}, \quad (1)$$

где $V_w^2, \gamma_{wx,wy}^2$ — коэффициент отражения и дисперсии наклонов чистой морской поверхности; L — расстояние от локатора до морской поверхности (высота носителя).

Для прозрачной атмосферы

$$a_s(\lambda) = P_s(\lambda) \exp[-\tau_a(\lambda)] / (\pi \alpha_s^2);$$

$$a_r(\lambda) = r_r^2 \exp[-\tau_a(\lambda)]; \quad C_{s,r} = (\alpha_{s,r} L)^{-2}.$$

Здесь $a_s(\lambda)$ — освещенность на оси лазерного пучка на морской поверхности; $C_{s,r}^{-1/2}$ — эффективные радиусы лазерного пучка и поля зрения приемника локатора на морской поверхности; $2\alpha_{s,r}$ — угол расходимости источника и угловое поле зрения приемной оптической системы; $P_s(\lambda)$ — мощность, излучаемая источником; r_r — эффективный размер приемной апертуры; $\tau_a(\lambda)$ — оптическая толщина атмосферы между локатором и морской поверхностью.

Формула (1) получена при импульсном зондировании морской поверхности и определяет среднюю (строго среднюю по возможным реализациям неровной морской поверхности, приближенно среднюю за много посылок импульсов) принимаемую мощность в моменты максимумов принимаемых сигналов. Заметим, что частота повторения лазерных импульсов может быть сотни герц и даже единицы и десятки килогерц. Поэтому размер отрезков полета, на которых проводится усреднение принимаемой мощности, может быть небольшим — единицы метров даже при высокой скорости полета носителя.

Неравенство $\tau_s^2 c^2 / 16 \gg 2\sigma_w^2$, при котором справедлива формула (1), не является жестким и всегда может быть выполнено при выборе соответствующей длительности импульса локатора. Например, при $\sigma_w \sim 1$ м (волнение значительное — балл волнения 3 по шкале степени волнения, что соответствует умеренному приводному ветру со скоростью $U \sim 5,3 \dots 7,4$ м/с по шкале силы ветра) и при $\tau_s = 50$ нс левая часть неравенства ~ 14 , а правая ~ 2 .

При полете носителя над исследуемой акваторией лидар регистрирует на двух длинах волн λ_1 и λ_2 мощности эхосигналов $P(\lambda_1), P(\lambda_2)$:

$$P(\lambda_{1,2}) \cong \frac{V^2(\lambda_{1,2}) a_s(\lambda_{1,2}) a_r(\lambda_{1,2}) \pi^{1/2}}{4\pi (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2} L^4 (C_s + C_r)}, \quad (2)$$

где $V^2, \gamma_{x,y}^2$ — коэффициенты отражения и дисперсии наклонов исследуемого участка.

Сигналы $P(\lambda_1), P(\lambda_2)$ нормируются на $P_w(\lambda_1)$ и $P_w(\lambda_2)$:

$$\tilde{P}(\lambda_{1,2}) = \frac{P(\lambda_{1,2})}{P_w(\lambda_{1,2})} = \frac{V^2(\lambda_{1,2}) (\gamma_{wx}^2 \gamma_{wy}^2)^{1/2}}{V_w^2(\lambda_{1,2}) (\gamma_x^2 \gamma_y^2)^{1/2}}. \quad (3)$$

Далее сигналы $\tilde{P}(\lambda_1), \tilde{P}(\lambda_2)$ используются для нахождения следующей величины:

$$N = \frac{\tilde{P}(\lambda_1)}{\tilde{P}(\lambda_2)} = \left[\frac{V^2(\lambda_1)}{V^2(\lambda_2)} \right] \frac{V_w^2(\lambda_2)}{V_w^2(\lambda_1)}. \quad (4)$$

Дистанционное обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности...

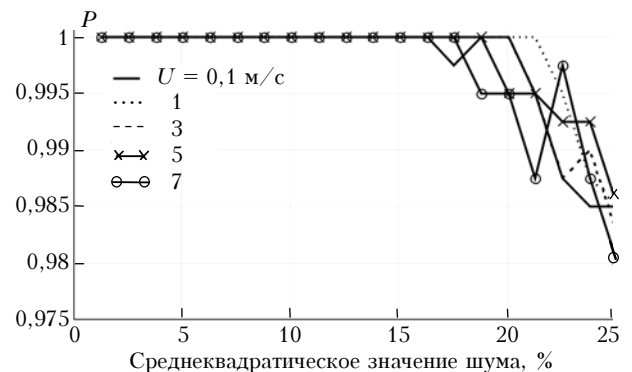
Из (3) и (4) видно, что N зависит только от коэффициентов отражения исследуемого участка на длинах волн $\lambda_{1,2}$ и коэффициентов отражения чистой поверхности, а $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$ — как от коэффициентов отражения, так и от дисперсии наклонов на исследуемом участке. Таким образом, по величине N можно судить о коэффициенте отражения, а по величине $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$ — о характере неровностей исследуемого участка.

Для принятия решения о наличии нефтяных загрязнений значения N и $\tilde{P}(\lambda_{1,2})$ сравниваются с некоторыми пороговыми значениями $K_{1,2}$. При совместном выполнении неравенств $N > K_1, \tilde{P}(\lambda_{1,2}) > K_2$ принимается решение о наличии нефтяного загрязнения.

Исследование возможностей описанного лазерного метода обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности проводилось методом математического моделирования в широком диапазоне параметров (скорость приводного ветра 0,1–7 м/с; среднеквадратическое относительное значение шума измерения 1–20%; угол между направлениями скорости приводного ветра и полета авиационного носителя 0–180°; вариации скорости ветра во время проведения измерений (0 ... ±2) м/с; вариации направления ветра во время проведения измерений (0 ... ±0,7) рад).

В качестве $K_{1,2}$ использовались либо некоторые априорно выбранные значения (например, как и в работе [6], считали, что для надежного обнаружения нефтяных загрязнений порог должен быть $\geq 1,5$), либо конкретные значения порогов $K_{1,2}$ выбирались для каждой конкретной пары длин волн методом математического моделирования, исходя из значений вероятности правильного обнаружения (вероятности обнаружения нефтяного загрязнения, если оно действительно есть) и вероятности ложной тревоги (вероятность обнаружения нефтяного загрязнения, если его нет).

Результаты математического моделирования работы алгоритма, основанного на совместном использовании условий $N > K_1, \tilde{P}(\lambda_{1,2}) > K_2$, показывают, что такой алгоритм позволяет надежно обнаруживать нефтяные загрязнения (рисунок).



Отметим, что идея использовать двухспектральные измерения для обнаружения нефтяных загрязнений высказывалась ранее (см., например, [7]).

Результаты расчетов величин N и $\tilde{P}(\lambda_2)$

Характер участка водной поверхности	Длина волны, мкм							
	1,43 и 3,35		11 и 1,43		2,5 и 1,06		2,86 и 3,41	
	N	$\tilde{P}(\lambda_2)$	N	$\tilde{P}(\lambda_2)$	N	$\tilde{P}(\lambda_2)$	N	$\tilde{P}(\lambda_2)$
Нефтяное пятно	2,36	2,85	2,1	6,7	1,42	6,7	1,71	3,93
Слик	1	10	1	10	1	10	1	10
Пенное образование	14	0,12	0,085	1,68	0,23	3,32	1	0,12
Участок чистой водной поверхности	1	1	1	1	1	1	1	1

Однако эта идея заключалась в обязательном использовании для измерений длины волны около 3,4 мкм, для которой коэффициент отражения нефти примерно равен коэффициенту отражения воды.

В действительности существует достаточно много вариантов выбора пар длин волн для двухспектрального метода. В таблице приведены результаты расчетов $\tilde{P}(\lambda_2)$ и N для пар длин волн: 1,43 и 3,35; 11 и 1,43; 2,5 и 1,06; 2,86 и 3,41 мкм. Расчеты проводились для различного характера исследуемого участка: нефтяное пятно, слик (область со сглаженным волнением), пенное образование, участок чистой поверхности (без нефтяных загрязнений). Расчеты коэффициентов отражения воды и нефти проводились по данным [3], а расчеты $\gamma_{x,y}^2$ — по данным [8]. Принималось, что дисперсии наклонов $\gamma_{x,y}^2$ для нефтяных пленок уменьшаются в 3 раза [8], а для слика — в 10 раз. Учитывалось, что наличие пены практически не сказывается на отражательных характеристиках морской поверхности для длин волн 2,86; 3,35 и 11 мкм. Коэффициенты отражения пены для длин волн 1,06; 1,43 и 2,5 мкм определялись по данным [9].

Из таблицы видно, что в случае появления слика или пенного образования на морской поверхности значение или $\tilde{P}(\lambda_2)$, или N может быть много больше 1, но только при появлении нефтяного загрязнения и $\tilde{P}(\lambda_2)$, и N больше 1. При этом совсем не обязательно использовать длину волны около 3,4 мкм. Однако математическое моделирование показывает, что характеристики обнаружения оказываются все же лучше, если одну из длин волн брать около 3,4 мкм.

На рисунке для пары длин волн 2,86 и 3,41 мкм показана зависимость вероятности правильного обнаружения нефтяного загрязнения P от относительного среднеквадратического значения шума измерения (равного отношению среднеквадратического значения шума к среднему значению принимаемого сигнала) при разных значениях скорости приводного ветра и $K_1 = K_2 = 1,5$. Видно, что P практически не отличается от 1 даже при относительном средне-

квадратическом значении шума измерения 15%. При этом вероятность ложных тревог в случае чистой поверхности, слика или участка пены была практически равна 0.

Таким образом, двухспектральный лазерный метод позволяет отличать нефтяные загрязнения от областей со сглаженным ветровым волнением и областей с высоким коэффициентом отражения и тем самым с большой достоверностью принимать решения о наличии нефтяных загрязнений на морской поверхности.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2437).

1. *Оптико-физические средства исследования океана* / Под ред. Е.Г. Пашенко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
2. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550с.
3. *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.
4. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И., Стрелков В.Б.* Обнаружение нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности с помощью трехлучевого метода // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 10. С. 900–901.
5. *Белов М.Л., Городничев В.А., Козинцев В.И.* О форме эхоимпульса при лазерном зондировании взволнованной морской поверхности // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10. № 8. С. 935–940.
6. *Богородский В.В., Кропоткин М.А., Швелелева Т.Ю.* Обнаружение нефтяных загрязнений вод сканирующим оптическим локатором // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1977. Т. 13. № 12. С. 1317–1322.
7. *Гардашов Р.Г., Гуревич И.Я., Шифрин К.С.* Отражение оптического излучения от взволнованной морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой // *Оптика атмосф. и океана.* Баку: ЭЛМ, 1983. С. 33–44.
8. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // *J. Opt. Soc. Amer.* 1954. V. 44. N 11. P. 838–850.
9. *Whitlock C.H., Bartlett D.S., Gurganus E.A.* Sea foam reflectance and influence on optimum wavelength for remote sensing of ocean aerosols // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. N 6. P. 719–722.

V.I. Kozintsev, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev, O.A. Smirnova, Yu.V. Fedotov, A.M. Khrustaleva.
Remote detection of petroleum pollution at rough sea surface using two-wave laser method.

The method of the detection of petroleum pollution, based on two-wave sounding of sea surface, is considered. It is shown that, the two-wave laser method allows one to distinguish petroleum pollutions from areas with smoothed wind-induced wave (i.e. because of a slick on the water surface) and areas with high reflection coefficient (i.e. because of a foam on the water surface) and therefore to detect petroleum pollutions with high reliability.