

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО СЛИКА

**В.В. Малиновский¹, В.А. Дулов¹,
А.Е. Кориненко², А.Н. Большаков¹,
В.Е. Смолов¹**

¹Морской гидрофизический институт
НАН Украины

²Черноморский филиал МГУ
им. М.В. Ломоносова
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: odmi@alpha.mhi.iuf.net

Приводятся результаты измерений характеристик радиолокационного сигнала на длине волны 8 мм, рассеянного морской поверхностью, покрытой пленкой растительного масла. Показано, что радиолокационный контраст на вертикальной поляризации излучения выше, чем на горизонтальной. Поляризационное отношение в слюке снижается в 1.3 раза. Модуляция сигнала длинными волнами в области слюка выше, чем на чистой воде.

Введение. Основным элементом систем контроля загрязнений моря являются спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ), позволяющие эффективно определять положение и размеры поверхностных пленок, отчетливо проявляющихся на РЛИ в виде участков с пониженным уровнем сигнала. Проведение радиолокационных мониторингов морей Юго-Восточной Азии [1], Средиземного моря [2] показали, что пространственное распределение нефтяных пятен хорошо коррелирует с основными судовыми маршрутами, расположением нефтяных платформ и терминалов. Наиболее существенный вклад в разлив нефтепродуктов вносят промывка судовых трюмов и несанкционированные выливы [3]. Определение искусственных поверхностных пленок не вызывает затруднений в том случае, когда на РЛИ в районе слюка видны корабли, платформы или другие наиболее вероятные источники загрязнений. Однако, в общем случае, существенной проблемой остается идентификация пленок по дистанционным данным. Основная сложность заключается в том, что аналогичные контрасти радиолокационного сигнала могут вы-

зываться зонами конвергенции течений [4], дождевыми осадками [5] и другими природными явлениями. Подробное обсуждение таких эффектов, проявляющихся в РЛИ, точно так же, как и поверхностные пленки, можно найти в [6]. Проблема распознавания загрязнений осложняется также близкими значениями контрастов радиолокационного сигнала при наличии нефтяных разливов, и вызванных природными эффектами [6].

С целью распознавания поверхностных пленок в РЛИ предпринимались попытки учесть как их геометрические характеристики, так и особенности принятого сигнала, например, различия в текстуре и статистических характеристиках в зоне слюка и на чистой воде. Анализ данных приведенный в [7,8], показывает практическое совпадение параметров проявлений в РЛИ нефтяных разливов и "непленочных" эффектов. Близкими по значениям оказываются максимальный и средний контрасты, параметр растекания, определяющий форму пятна, отношение среднеквадратического отклонения (СКО) уровня сигнала в темной области РЛИ к СКО на чистой воде, средние градиенты рассеяния на границе пятна.

Характеристики флуктуаций РЛ сигнала на масштабах ветровых волн, покрытых пленкой растительного масла, изучались в ходе натурного эксперимента [9]. Особенностью рассеяния явилось возрастание модуляции сигнала длинными волнами в зоне слюка. Учет данного эффекта может оказаться полезным для идентификации пленок в РЛИ. Повышение достоверности распознавания загрязнений в радиолокационных снимках достигается и при одновременном использовании горизонтальной и вертикальной поляризации излучения [10]. Для идентификации загрязнений применяют комплексный анализ радиолокационных данных и сопутствующей гидрометеорологической информации [11].

Однако, в настоящее время нет надежных алгоритмов, позволяющих однозначно выделять в РЛИ изменения сигнала за счет выглаживания морской поверхности поверхностными пленками. Для решения этой проблемы необходимо проведение исследований, направленных на получение дополнительных критериев идентификации загрязнений.

Целью настоящей работы является изучение в натурных условиях особенностей радиолокационного рассеяния морской поверхности, покрытой искусственной пленкой, при различных поляризациях излучения.

Методика проведения работ и условия измерений. Исследования проводились в сентябре 2005 г. на океанографической платформе ЭО МГИ НАН Украины. Измерения скорости и направления ветра проводились стандартным комплексом ГМ-63, расположенным на высоте 23 м. Характеристики ветрового волнения в области частот ниже 0.8 Гц измерялись с помощью струнного волнографа, расположенного на расстоянии 9 м от края платформы. РЛ измерения выполнялись радиолокатором с непрерывным излучением на длине волны $\lambda_r = 8 \cdot 10^{-3}$ м (волновое число радиоволны $k_r = 2\pi/\lambda_r$) и вертикальной (ВВ) и горизонтальной (ГГ) поляризациях приема сигнала и наклонной поляризации передачи. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню -3 дБ составляла 4°. Радиолокатор устанавливался на высоте 13.5 м над уровнем моря. При угле наблюдения $\theta = 47^\circ$ размер облучаемого участка поверхности составлял $\sim 1.5 \times 2$ м² и располагался в непосредственной близости (~ 1 м) от волнографа. Для создания пленки использовалось растительное масло с упругостью $E \sim 20$ дин/см, разливаемое с мостика, расположенного в 7 м от волнографа. За счет быстрого растекания масла на поверхности образовалась тонкая пленка с размерами около 5×5 м², площадь которой существенно превышала площадь облучаемого радиолокатором участка морской поверхности. Созданный слик переносился течением через область измерений. Таким образом, рассеяние РЛ сигнала регистрировалось в следующей последовательности: чистая вода – поверхность, покрытая пленкой – чистая вода. Поступающая информация с анемометра, волнографа и радиолокатора записывалась с частотой 10⁴ Гц в единый файл в комплексе регистрации данных.

Исследования проводились 16.09.05 г. при восточном ветре, имеющем среднюю скорость и направление $\bar{U} = 5.6$ м/с $\phi_U = 90^\circ$. На рис. 1 показаны реализации

U и ϕ_U , где стрелками обозначен интервал времени проведения радиолокационных измерений. Как следует из рис. 1 при РЛ измерениях скорость ветра и его направление изменялись очень незначительно, а их средние отклонения составляли ± 0.3 м/с и $\pm 3^\circ$ соответственно. В ходе измерений на-

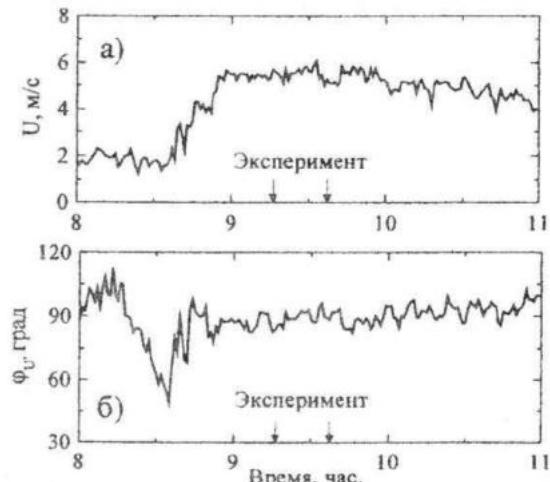


Рис. 1 – Ветровые условия при проведении эксперимента: а) – скорость ветра; б) – направление ветра

блудались две системы длинных волн с частотами пиков и направлениями распространения, соответственно, 0.22 Гц, 0° (географический азимут) и 0.4 Гц, 250°. Высота волн 33% обеспеченности составляла $H_s = 0.35$ м. Эксперимент выполнялся в условиях нейтральной стратификации атмосферы при температурах воды 23.4°C и воздуха 23.5°C.

Результаты. На рис. 2 приведены реализации радиолокационного сигнала на ВВ (рис. 2а) и ГГ (рис. 2б) поляризациях. Горизонтальной стрелкой на рисунке отмечены измерения в области слика. Определим радиолокационный контраст “чистая вода – слик” как

$$K^P = \sigma^P / \sigma_s^P,$$

где σ^P и σ_s^P – удельная эффективная площадь рассеяния морской поверхности (УЭПР) соответственно для чистой воды и слика, а индекс P указывает на поляризацию сигнала (v – ВВ, h – ГГ). Величины измеренных контрастов составляют $K^v = 2$ и $K^h = 1.5$. Как следует из рисунка, пленка

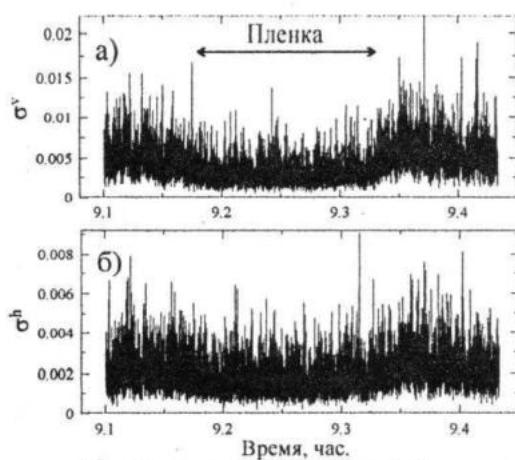


Рис. 2 – Изменение уровня РЛ сигнала во времени: а) – вертикальная поляризация; б) – горизонтальная поляризация. Горизонтальной стрелкой показано рассеяние в зоне слика

эффективнее проявляется на ВВ поляризации.

На рис. 3 показано поляризационное отношение $P = \sigma^v / \sigma^h$. Для лучшей визуализации РЛ сигнал был сглажен скользящим средним по одноминутным интервалам. На чистой воде величина P близка к теорети-

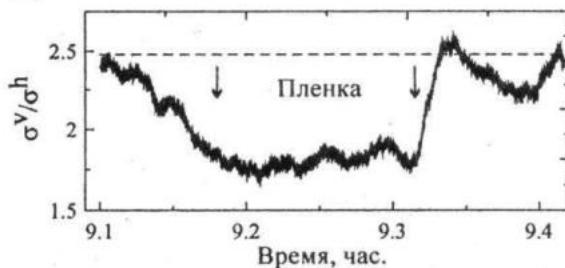


Рис. 3 – Поляризационное отношение РЛ сигнала. Пунктирная линия – теоретическое значение

ческому значению 2.48, обозначенному пунктирной линией. В области слика среднее значение отношения меньше, чем на “фоне” и равно $P_s = 1.8$.

Связь между амплитудами длинных ветровых волн и уровнем УЭПР характеризуется комплексной модуляционной передаточной функцией (МПФ)

$$M^P(f) = \frac{S_{\sigma\xi}(f)}{k \cdot \sigma^P \cdot S_{\xi\xi}(f)}$$

где $S_{\sigma\xi}(f)$ – взаимный спектр флуктуаций РЛ сигнала; $S_{\xi\xi}(f)$ – спектр волн; частота f связана с k дисперсионным соотношением.

Согласно волнографическим измерениям спектры поверхностного волнения в области слика и вне его не различаются в пределах доверительных интервалов.

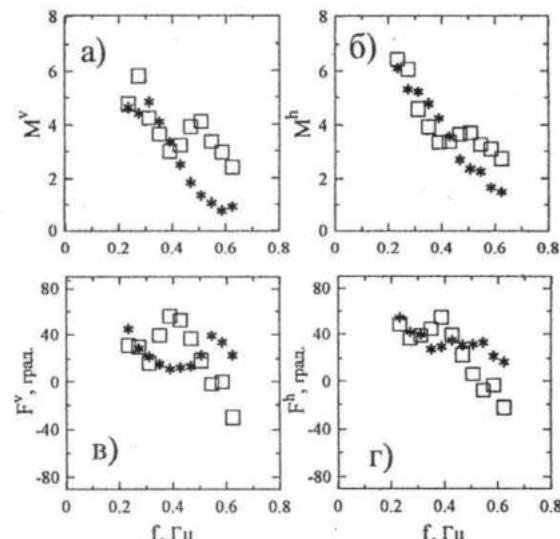


Рис. 4 – Значения модуля МПФ а) – ВВ поляризация; б) – ГГ поляризация, и фазы МПФ: в) – ВВ поляризация; г) – ГГ поляризация. Символами (*) обозначены измерения на чистой воде, символами (□) данные, полученные в слике

На рис. 4 для двух поляризаций представлены значения $|M^P(f)|$ и $F^P(f)$, полученные в ходе наших работ, где величины, соответствующие “фону”, обозначены символами (*), а слику – (□). Как следует из рис.4а,б в области спектральных пиков ($0.2 – 0.4$ Гц) МПФ на пленке и чистой воде практически одинаковы. Для более коротких ветровых волн модуляция сигнала в области слика превышает фоновые значения примерно в 3 раза на ВВ (рис.4а) и в 1.5-2 раза на ГГ (рис.4б) поляризации. Фазовые характеристики, приведенные на рис.4в,г, показывают, что при $f < 0.6$ Гц максимумы РЛ сигнала в отсутствии слика расположены на переднем склоне модулирующих волн. В слике такая ситуация наблюдается при $f \leq 0.4$ Гц, а при больших частотах максимум смещается в область гребней ($f \sim 0.5$ Гц) и далее на задний

склон волны. Такой же характер изменения $F^V(f)$ наблюдался в [9].

Обсуждение. Проведем качественный анализ полученных контрастов. Уровень подавления ветровых волн пленками зависит от характеристик пленок и скорости ветра. Охарактеризуем спектральный контраст величиной $K_B = B(k)/B_s(k)$, где k - волновое число, $B_s(k)$, $B(k)$ - уровень спектра в слике и на чистой воде. Полному подавлению поверхностных волн пленкой соответствует $K_B = \infty$. Модельные расчеты для $1/K_B$ приведены в [12]. С увеличением k происходит увеличение контраста, т.е. гасящие свойства пленок увеличиваются в коротковолновом интервале спектра.

В рамках двухмасштабной модели рассеяния УЭПР записывается в виде суммы брэгговской σ_{0br}^P и небрэгговской σ_{nb} составляющих:

$$\sigma^P = \sigma_{0br}^P \cdot \left(1 + j^P \cdot \overline{\zeta^2}\right) + \sigma_{nb} \quad (1)$$

$$\sigma_{0br}^P = \pi \cdot \sin^{-4} \theta \cdot G^P(\theta) \cdot B(k_b) \quad (1a)$$

где $k_b = 2 \cdot k_r \cdot \sin \theta$ - брэгговское волновое число (для наших условий наблюдений брэгговская рябь имела длину ~ 5.6 мм); $j^P = 1/(2 \cdot \sigma_{0br}) \cdot \partial^2 \sigma_{0br} / \partial \theta^2$ - геометрический кэффициент; $\overline{\zeta^2}$ - дисперсия уклонов длинных волн; G^P - кэффициент, зависящий от геометрии наблюдения [13]. В выражении (1) второй член в скобках описывает вклад модуляции резонансно - рассеивающей ряби длинными волнами.

Механизмами, формирующими σ_{nb} могут являться обрушения ветровых волн (включая микрообрушения), рассеяние на брызгах, "заостренных" гребнях волн и ряд других. В настоящее время принято считать, что основной вклад в "небрэгговскую" компоненту рассеяния, вносят обрушения ветровых волн.

Существенная роль σ_{nb} для 8 мм диапазона радиоволн показана в [14]. Однако, задача влияния пленок на σ_{nb} в настоящее время практически не изучена. В контексте данной работы будем полагать, что тонкая поверхностная пленка не изменяет величи-

ну σ_{nb} , т.е. значение "небрэгговской" компоненты в (1) при фиксированной скорости ветра будет одинаковым как для чистой воды, так и для области слика. Принимая во внимание тот факт, что $\sigma_b^V > \sigma_b^H$, а величина $\sigma_{nb} = \sigma_{nb}^V = \sigma_{nb}^H$ не зависит от поляризации излучения, вклад в суммарную УЭПР оказывается больше на ГГ поляризации. Поскольку в диапазоне волнового спектра $k < 1$ рад/м гасящими свойствами пленок можно пренебречь [12], то дисперсия уклонов поверхности ζ^2 в области слика и чистой воды будет практически одинакова. Этот факт действительно подтверждается нашими волнографическими измерениями. Таким образом, из уравнения (1) следует, что изменения УЭПР на обеих поляризациях за счет выглаживания морской поверхности пленкой будут определяться только изменениями чисто брэгговского рассеяния, определяемого формулой (1a).

В то же время, РЛ контраст, в соответствии с (1), зависит как от изменения $B(k)$, так и от соотношения брэгговской и небрэгговской составляющих. Согласно [12] оценка контраста σ_{0br}^P для условий эксперимента ($U = 5.6$ м/с и $E \sim 20$ дин/см) составляет $K_{0br}^V = K_{0br}^H \sim 5$. Однако, при учете вклада σ_{nb} в УЭПР следует ожидать меньших значений K^P .

Для фоновых условий доля небрэгговской и чисто брэгговской компонент в полной σ^P составляют, в соответствии с [14]

$$\begin{aligned} q^V &= \sigma_{nb} / \sigma^V \approx 0.2, \\ q^H &= \sigma_{nb} / \sigma^H \approx 0.5, \\ m^V &= \sigma_{0br}^V / \sigma^V \approx 0.68, \\ m^H &= \sigma_{0br}^H / \sigma^H \approx 0.37. \end{aligned}$$

В данных обозначениях РЛ контраст записывается в виде

$$K^V = \left[K_{0br}^V \cdot m^V \cdot \left(1 + j^V \cdot \overline{\zeta^2}\right) + q^V \right]^{-1} \quad (2)$$

$$K^H = \left[K_{0br}^H \cdot m^H \cdot \left(1 + j^H \cdot \overline{\zeta^2}\right) + q^H \right]^{-1}$$

Принимая во внимание теоретические значения K_{0br}^v , K_{0br}^h и выражений в круглых скобках в (2), равные 1.3 для ВВ и 2 для ГГ поляризаций, модельные оценки контрастов составляют $K^v \approx 2.7$ и $K^h \approx 1.5$. Отличие в контрастах можно объяснить различным вкладом σ_{nb} в полные УЭПР на обеих поляризациях. Таким образом, полученные в нашем эксперименте значения контрастов находятся в удовлетворительном соответствии с их модельными оценками.

Величина поляризационного отношения P_s выражается через введенные выше параметры следующим образом

$$P_s = \frac{\sigma^v}{\sigma^h} \cdot \frac{K^h}{K^v}.$$

Эта формула дает модельную оценку $P_s = 1.4$, согласующуюся с нашими измерениями P_s .

МПФ зависит от длины радиоволны и для используемой нами $\lambda_r = 8$ мм изучалась в ряде экспериментальных работ (см., например, [9, 15]). Значительно меньше эмпирической информации имеется о модуляции РЛ сигнала в области слик. Известно лишь [9], что при рассеянии на пленке значения $|M^v(f)|$ при $f > 0.2 - 0.3$ Гц выше, чем на чистой воде и наблюдается уменьшение фазы МПФ $F^v(f)$ с ростом частоты. Как видно из рис. 4, наши результаты подтверждают эти представления, однако, максимальные значения полученных МПФ, составляют 5-6, в то время как в [9] они на порядок выше.

Отметим, что детальный анализ модуля и фазы МПФ в настоящее время затруднителен. Это связано с тем, что в МПФ выделяют две компоненты, первая из которых M_t^P определяется геометрией наблюдения и связана с изменением локального угла падения $\tilde{\theta} = \theta - \zeta_i$, где ζ_i - текущий уклон поверхности. Вторая, наиболее сложная для анализа гидродинамическая компонента M_{hyd}^P определяется модуляцией длиной волной бреегтовской и небреегтовской ком-

понент рассеяния. Анализ M_t^P и M_{hyd}^P для чистой воды приводится в [14]. Правильное описание гидродинамической составляющей требует дополнительного теоретического исследования эволюции ряби, изменившей свою амплитуду под действием пленки, вдоль профиля длинных волн.

Выводы. Натурные исследования особенностей радиолокационного рассеяния на длине волны 8 мм в области искусственной пленки растительного масла дали следующие результаты:

1. Изменения УЭПР морской поверхности на ВВ поляризации выше, чем на ГГ поляризации. Выполненный анализ показывает, что данный эффект может быть объяснен различием относительных вкладов небреегтовской компоненты в суммарный сигнал.

2. Поляризационное отношение в слике снижается в 1.3 раза по отношению к чистой воде. Этот эффект связан с более сильным откликом радиолокационного сигнала на слик на ВВ поляризации, чем на ГГ поляризации.

3. Наличие поверхностной пленки приводит к увеличению модуляции РЛ сигнала длинными поверхностными волнами на частотах, больших частоты спектрального пика приблизительно в 3 раза на ВВ и 1.5-2 раза на ГГ поляризации. В области слик максимумы рассеяния смещаются с переднего на задний склон длиной волны.

Поскольку гасящие свойства пленок достаточно хорошо проявляются для длин ветровых волн 3 см и 5 см, представленные особенности УЭПР (но с другими величинами контрастов) следует ожидать и в других диапазонах радиоволн, используемых в спутниковых радиолокаторах.

Полученные результаты могут быть использованы как дополнительные критерии для идентификации загрязнений на морской поверхности при анализе радиолокационных изображений.

Работа выполнена при поддержке ESA-IAF в рамках программы GMES networking with Russia and Ukraine (проект OSCSAR).

ЛИТЕРАТУРА

1. Lu J., H.Lim, S.C. Liew, M. Bao, L.K. Kwoh. Oil pollution statistics in Southeast Asian waters compiled from ERS SAR imagery // Earth Observation Quarterly. 1999. – N 61. – P. 13–17.
2. Pavlakis P, Sieber A., Alexandry S. Monitoring oil-spill pollution in the Mediterranean with ERS SAR // Earth Observation Quarterly. 1996. – N. 52. – P. 8–11.
3. ESA. Oil Pollution Monitoring, in ERS and its applications: Marine // ESA Publications BR-128/I. 1998.
4. Johannessen, J. A.; Kudryavtsev, V.; Akimov, D.; Eldevik, T.; Winther, N.; Chapron, B. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current features // J. Geophys. Res., Vol. 110, No. C7, C07017, doi:10.1029/2004JC002802, 2005
5. Melsheimer, C., W. Alpers, M. Gade, Simultaneous observation of rain cells over the ocean by the synthetic aperture radar aboard the ERS satellites and by surface-based weather radars , J. Geophys. Res., 106(C3), 4665-4678, 10.1029/2000JC000263, 2001.
6. Espedal H.A. Oil spill and its look-alikes in ERS SAR imagery // Исслед. Земли из космоса. 1998.– № 5. – С. 94–102.
7. Calabresi G., Frate F.D., Lichtenegger J., et. al. Neural networks for the oil spill detection using ERS-SAR data // Proceedings of IGARSS '99. 1999. – V.1. – P. 215 – 217.
8. Frate Del F. Salvatori, L. Oil spill detection by means of neural networks algorithms: a sensitivity analysis // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International V.2. 2004.– P. 1370–1373.
9. Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Зуйкова И.М. и др. Модуляция радиолокационных сигналов длинными волнами при рассеянии на морской поверхности, покрытой пленкой поверхностно-активных веществ // Изв. РАН. 2004. – Т.40. – № 1. – С. 109–117.
10. Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. et al. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // Journ. Geophys. Res. 1998. – V.103. – No C9. – P. 1851–18866.
11. Espedal H.A., Wahl T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information // Int.J.Remote Sens. 1999. – V. 20 (1). – P. 49–65.
12. Гродский С.А., Кудрявцев В.Н., Макин В.К. Оценка влияния поверхностных пленок на короткие ветровые волны и характеристики пограничного слоя атмосферы // Морской гидрофиз. журнал. 1999. – № 6. – С. 3–14.
13. Plant W.J. A two-scale model of short wind generated waves and scatterometry // Journ.Geoph.Res. 1986. – V.91. – C9. – P. 10735–10749.
14. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model // J. Geophys.Res., 108 (C3), 8054, doi:10.1029/2001JC001003, 2003
15. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Большаков А.Н. и др. Экспериментальные исследования механизмов модуляции радиолокационного сигнала на масштабах поверхностных волн // Исслед. Земли из космоса. 2001. – № 4. – С. 13–30.