

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МИКРОВОЛНОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Митягина М.И., Чурюмов А.Н.

*Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32
Факс: (095)333 1056; E-mail: mityag@iki.rssi.ru*

Радиолокационное дистанционное зондирование может использоваться для обнаружения и мониторинга нефтяных загрязнений на морской поверхности. Нефтяные пленки на морской поверхности проявляются на радиолокационных изображениях в виде темных пятен пониженной интенсивности обратно рассеянного сигнала. Однако автоматическое распознавание нефтяных загрязнений на радиолокационных снимках является непростой задачей, поскольку такие пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, которые принято называть «подобиями» пятен (органические пленки, некоторые типы льда, области, ветровой тени, дождевые ячейки, зоны апвеллинга и т.п.). Исследование механизмов рассеяния электромагнитных волн на покрытой пленкой нефти морской поверхности послужит значительным шагом к решению этой задачи.

Введение

Интерес общественности к проблеме нефтяных загрязнений резко возрастает, в основном, во время драматических аварий танкеров., таких, например, как “ Морская императрица” (Уэльс, 1996), “Эрика” (Франция, 1999) или “Престиж” (Испания, 2002). Однако, аварии нефтеналивных судов это лишь одна из множества причин нефтяных загрязнений морской поверхности.

Разливы нефти и нефтепродуктов происходят постоянно. При этом регулярные загрязнения как результат частых выбросов малых объемов нефтепродуктов морскими судами, нефтяными танкерами, при работах в шельфовой зоне и повреждениях трубопроводов, прямых или выносимых реками сбросов жидких промышленных отходов, возможно, представляют собой даже большую угрозу для прибрежной зоны, чем единичный катастрофический разлив нефти [1].

РЛ-изображения нефтяных разливов, естественно, зависят от внешних условий [2, 3]. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется рядом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти. Форма разлива будет разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта, а также для разного количества нефти, для разной динамики ветра и течения между моментами разлива и получения изображения [3].

На рис.1 представлен фрагмент Envisat ASAR изображения (вертикальная поляризация), полученного 02.11.04 над акваторией Балтийского моря к востоку от южной оконечности о. Эланд. Нефтяное загрязнение, причиной которого является выброс нефтепродуктов с движущегося корабля, имеет протяженность в длину около 32 км.

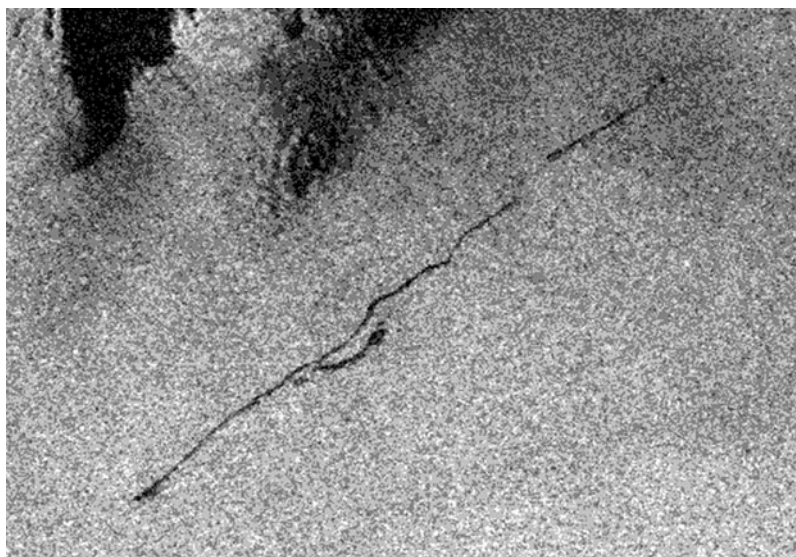


Рис. 1. Фрагмент (37 км x 25 км) Envisat ASAR изображения (вертикальная поляризация), полученного 02.11.2004 над акваторией Балтийского моря.

На рис. 2 представлен фрагмент Envisat ASAR изображения (вертикальная поляризация), полученного 04.09.04 над шельфовой зоной Каспийского моря вблизи нефтедобывающей платформы "Нефтяные Камни". Общая площадь загрязнения около 30 кв. км.



Рис. 2. Фрагмент (37 км x 25 км) Envisat ASAR изображения (вертикальная поляризация), полученного 04.09.2004 над шельфовой зоной Каспийского моря.

Зависимости интенсивности отражения от толщины пленки, длины волны и угла зондирования

Присутствие нефтяной пленки на поверхности моря приводит к возникновению многократных отражений падающего излучения, которое, в свою очередь, приводит к интерференции волн, рассеянных по разным каналам и усилению или ослаблению результирующего отраженного сигнала. По мере изменения толщины пленки или угла падения, должны появляться интерференционные максимумы и минимумы в рассеянном излучении.

Попробуем получить зависимость интенсивности отраженного сигнала от толщины пленки и угла падения. Для этого введем в рассмотрение упрощенную модель поверхности воды в присутствии нефтяной пленки на ее поверхности. Будем предполагать, что нефтяная пленка ограничена двумя плоскими параллельными поверхностями раздела. Предполагается, что толщина пленок достигает нескольких миллиметров, что исключает из рассмотрения пленки поверхностно-активных веществ, формирующих мономолекулярный слой.

Диэлектрическая проницаемость морской воды ϵ_w , а нефти ϵ_f . Падающая плоская волна имеет вид $\mathbf{E} = \mathbf{E}_i e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}$. В этом случае интенсивность отраженного сигнала пропорциональна $|R_{h,v}(\theta)|^2$, где $R_{h,v}(\theta)$ коэффициенты отражения для полей горизонтальной и вертикальной поляризаций соответственно. Эти коэффициенты отражения должны учитывать множественный характер отражения между поверхностями раздела. При отсутствии на поверхности воды пленки $R_{h,v}(\theta)$ были бы равны френелевским коэффициентам отражения.

Чтобы получить $R_{h,v}(\theta)$, нужно сложить поля, отраженные по различным каналам. Возможные каналы отражения изображены на рис.3. Поле отражения на каждом канале пропорционально множеству коэффициентов отражения и пропускания на поверхностях раздела воздух-нефть и нефть-вода.

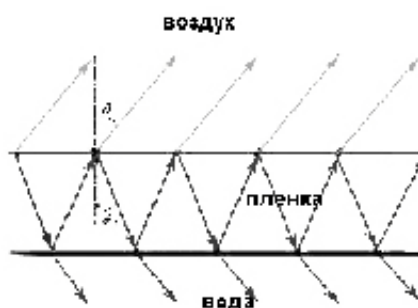


Рис. 3. Упрощенная модель среды, состоящей из трех однородных слоев.

Для горизонтальной поляризации френелевский коэффициент отражения электрического поля определяется выражением

$$R_h^{01}(\theta) = \frac{1 - \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}}{1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

где θ угол падения, ε_0 диэлектрическая проницаемость среды падающего поля и диэлектрическая проницаемость противоположной среды[4].

Френелевский коэффициент пропускания

$$T_h^{01}(\theta) = \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

Тогда полное поле определяется формулой:

$$E_r = E_i \left(R_h^{1f} + T_h^{1f} R_h^{fw} T_h^{f1} e^{ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} + T_h^{1f} R_h^{fw} R_h^{f1} R_h^{fw} T_h^{f1} e^{2ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} + \dots \right),$$

где верхние индексы обозначают исходную и конечную среды:

- 1 - воздух,
- f - нефтяная пленка,
- w - вода.

В приведенном выше уравнении $k_f = k \sqrt{\varepsilon_f}$, h толщина пленки,

θ_f - угол падения внутри пленки, который может быть определен из выражения

$$\frac{\sin \theta_f}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_f}}.$$

Суммируя все поля, рассеянные по различным каналам, мы получаем следующее выражения для полного коэффициента отражения на горизонтальной поляризации:

$$R_h = \frac{1 - q_{1w}}{1 + q_{1w}} \frac{1 + \frac{1}{2} \left(e^{-ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} - 1 \right) \frac{1 - q_{1f}}{1 - q_{1w}} (q_{fw} + 1)}{1 + \frac{1}{2} \left(e^{-ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} - 1 \right) \frac{1 + q_{1f}}{1 + q_{1w}} (q_{fw} + 1)},$$

где

$$q_{1f} = \sqrt{\varepsilon_f + (\varepsilon_f - 1) \tan^2 \theta},$$

$$q_{1w} = \sqrt{\varepsilon_w + (\varepsilon_w - 1) \tan^2 \theta},$$

$$q_{fw} = \sqrt{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_f} + \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_f} - 1\right) \tan^2 \theta} = \frac{q_{1w}}{q_{1f}}.$$

Заметим, что при $h = 0$, коэффициент отражения становится равным коэффициенту отражения от поверхности чистой воды (без пленки).

Аналогично для вертикальной поляризации, френелевские коэффициенты отражения и прохождения для магнитного поля:

$$R_v^{01}(\theta) = \frac{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}}{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

$$T_v^{01}(\theta) = \frac{2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}}{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1\right) \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

и полный коэффициент отражения:

$$R_v = \frac{\frac{\varepsilon_w - q_{1w}}{\varepsilon_w + q_{1w}} \left[1 + \frac{1}{2} \left(e^{-ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} - 1 \right) \frac{\varepsilon_f - q_{1f}}{\varepsilon_w - q_{1w}} \left(q_{fw} + \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_f} \right) \right]}{\frac{\varepsilon_w - q_{1w}}{\varepsilon_w + q_{1w}} \left[1 + \frac{1}{2} \left(e^{-ik_f \frac{2h}{\cos \theta_f}} - 1 \right) \frac{\varepsilon_f + q_{1f}}{\varepsilon_w + q_{1w}} \left(q_{fw} + \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_f} \right) \right]}.$$

Основные результаты

Рассмотрено бистатическое рассеяние электромагнитных волн для модельной среды, состоящей из трех однородных слоев без потерь – атмосфера, пленка и толща воды – разделенных двумя статистически-шероховатыми поверхностями раздела.

Описание рассеяния проведено в рамках методов геометрической оптики, применимость которых к данной задаче обусловлена малостью длины электромагнитной волны по сравнению с размерами радиуса кривизны в каждой точке поверхности (зыбь, гравитационные волны).

Рассмотрено многократное рассеяние во внутреннем слое, приводящее к интерференции волн, отраженных по разным направлениям, что в свою очередь может привести как к усилению, так и к ослаблению отраженного сигнала.

Получено аналитическое решение относительно амплитуды рассеянного поля на малом фрагменте морской поверхности как функции частоты и поляризации падающей электромагнитной волны, угла падения и толщины пленки.

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности отражения от толщины пленки, рассчитанные для электромагнитной волны длиной 3 см при фиксированном угле падения $\Theta = 10$. По мере изменения толщины пленки или угла падения, появляются интерференционные максимумы и минимумы в рассеянном излучении. Из графика видно, что вариации толщины пленки могут приводить к вариациям интенсивности отражения в очень широком диапазоне.

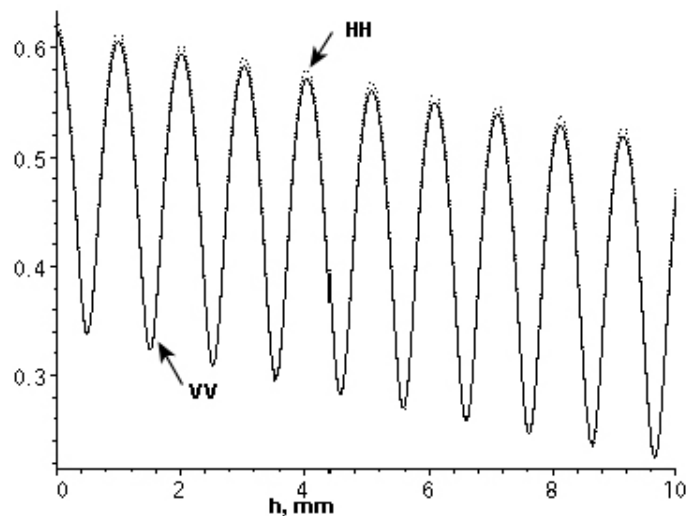


Рис. 4. Зависимость интенсивности отражения от толщины пленки.

На рис. 5 приведены зависимости отраженной интенсивности от угла падения θ для пленки толщиной $h = 0.2 \text{ см}$. Вертикальная и горизонтальная поляризации очень близки друг к другу при малых углах падения и расхождение растет при увеличении угла падения, так как вертикальная поляризация лучше поглощается при около-брюстеровских углах падения.

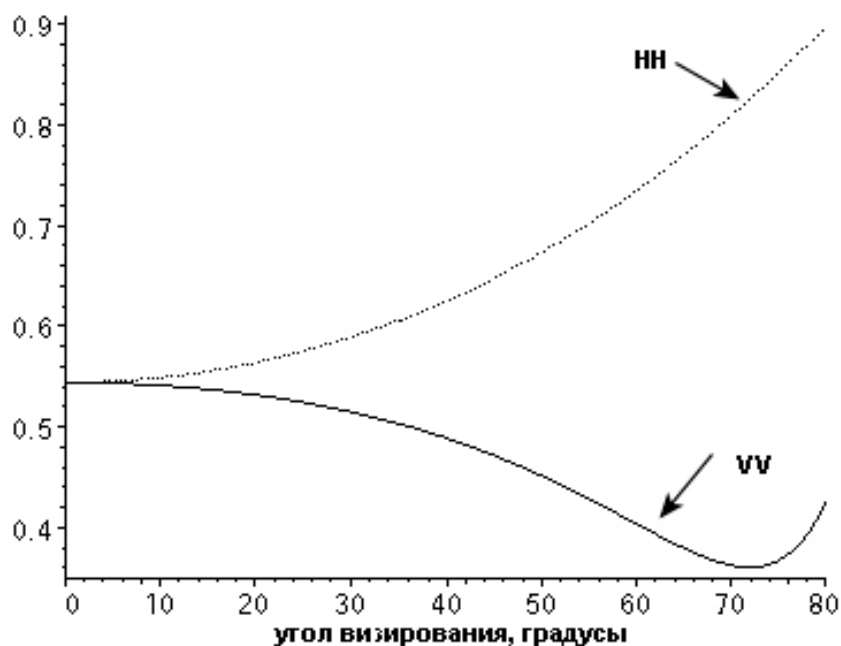


Рис. 5. Зависимость интенсивности отражения от угла визирования.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что наличие нефтяной пленки с толщиной, сравнимой с длиной зондирующей электромагнитной волны приводит к сильным вариациям отражающей способности поверхности. Это означает, что области с широкими вариациями интенсивности отраженного сигнала могут указывать на наличие нефтяного загрязнения.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-16629), а также международного проекта INTAS 03-51-4987.

Литература

1. *Gade, M., and W. Alpers*, Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters // *Science and Total Environment*. 1999. No. 237-238. P. 441-448.
2. *H. A. Hovland, J.A. Johannessen, and J. Digranes*. Slick detection in SAR images // *Proceedings of IGARSS'94*. 1994. P. 2038-2040.
3. *H. S. Solberg, G. Storvik, R. Solberg, and E. Volden*. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images // *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*. 1999. Vol. 37. No. 4. P. 1916-1924.
4. *Л.Д. Ландау и Е.М. Луфшиц*. Электродинамика сплошных сред. Т.8. Москва. Наука. 1992.