

Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности

М.И. Митягина, А.Н. Чурюмов

Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32
E-mail: mityag@iki.rssi.ru

В данной работе представлены результаты численного моделирования рассеяния радиолокационного сигнала на морской поверхности в присутствии пленочных загрязнений. Численные расчеты проведены с целью определения угловых характеристик сечения обратного рассеяния.

Введение

Микроволновые радиолокаторы являются незаменимыми инструментами для обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности, поскольку они не зависят от облачности и освещенности и почти не зависят от погодных условий на море. Нефтяные пленки подавляют короткие гравитационно-капиллярные волны и локально меняют шероховатость морской поверхности. Различия интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного в области нефтяного пятна на морской поверхности, и на поверхности чистой воды позволяет выявить нефтяные загрязнения на поверхности. [1, 2]. Разработка эффективных методик для каждодневного применения в космическом мониторинге включает в себя развитие методов автоматического распознавания областей нефтяных загрязнений на радиолокационных изображениях. В работах [3, 4] проводится сравнительный анализ ныне существующих полуавтоматических систем распознавания нефтяных загрязнений на радиолокационных изображениях морской поверхности. Наличие теоретической модели, адекватно описывающей поведение сигналов, рассеянных в области пленочного загрязнений и в области чистой воды, должно привести к дальнейшему повышению достоверности методов автоматического выявления загрязнений. Необходимо, чтобы эта модель описывала рассеяние на морской поверхности с широким спектром поверхностного волнения.

Теоретические основы

В основу анализа положено приближенное решение интегрального уравнения, описывающего рассеяние на поверхности с малыми и умеренными уклонами [5]. В отличие от подхода с точки зрения теории малых возмущений [6, 7], здесь флуктуации возвышений поверхности не являются коэффициентами выражений для диффузного рассеянного поля, а появляются в членах, определяющих фазу. Такой подход позволяет снять ограничения на малость возмущений. Согласно [8] в качестве исходного выражение для интенсивности рассеянного электромагнитного поля выбирается

$$I \approx \iint dx dx' e^{-i\chi_x(x-x') - i\chi_z[|\bar{M}(x) - \bar{M}(x')| - i\chi_z|\tilde{M}(x) - \tilde{M}(x')|]} \quad (1).$$

Здесь $\bar{M}(x)$ - средняя часть крупномасштабных шероховатостей, а $\tilde{M}(x) = \xi_1 + \xi_2$, где ξ_1 и ξ_2 являются средними амплитудами мелко- и крупно- масштабных шероховатостей соответственно,

$$\chi_x = |\vec{k}|(\sin \theta_{изл} - \sin \theta_{омп}), \quad \chi_z = |\vec{k}|(\cos \theta_{изл} + \cos \theta_{омп}).$$

Отметим, что выражение (1) не содержит никаких предположений относительно формы поверхности. Поэтому следующим шагом является создание упрощенной модели взволнованной морской поверхности.

Упрощенная модель поверхности

Морская поверхность в общем случае является статистически неоднородной, при этом мелкомасштабная компонента поверхностного волнения модулируется более длинными поверхностными волнами [9-11]. Следовательно, вводимая нами упрощенная модель поверхности должна отражать этот эффект.

Пусть $\xi_1(x)$ - статистически однородное поле возмущений с радиусом корреляции l_1 , а $\xi_2(x)$ - модулирующая функция характерным масштабом $l_2 \gg l_1$. В случае модулирующего воздействия на сантиметровую рябь со стороны ветровых или гравитационных волн, функцию $\xi_2(x)$ можно считать близкой к периодической. Мы выбрали $\bar{M}(x) = A \cos Kx$ (A и K - соответственно амплитуда и волновое число поверхностной волны крупного масштаба). Для простоты будем считать функции $\xi_1(x)$ и $\xi_2(x)$ статистически независимыми. Для описания как мелкомасштабной, так и для крупномасштабной компоненты поверхностной шероховатости было выбрано гауссово распределение. Однако, в рамках данного подхода можно использовать и другое модельное описание для спектра поверхностных волн, например, спектр Пирсона-Московитца [12].

Подобный подход к описанию поверхности позволяет рассматривать вклад в рассеяние различных областей спектра поверхностного волнения.

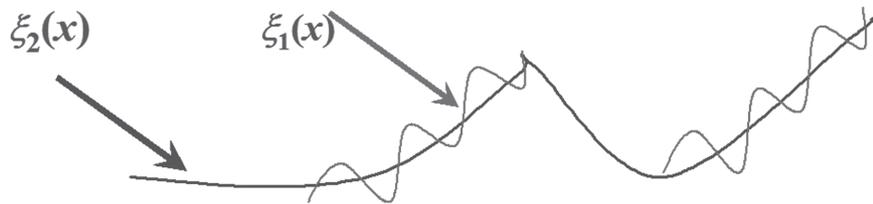


Рис. 1. Упрощенная модель морской поверхности

После предложенного в [11] усреднения

$$\left\langle \exp \left(i \sum_{k=1}^n q_k \xi_k \right) \right\rangle = \exp \left(- \frac{1}{2} \sum_{r,s=1}^n W(\xi_r, \xi_s) q_r q_s \right) \quad (2),$$

где $W(\xi_r, \xi_s) = \langle \xi_r \xi_s \rangle$

и замены переменных получаем

$$\bar{I} \approx e^{-\chi_z^2 \left[\langle h_1^2 \rangle (1-R_1) + \langle h_2^2 \rangle (1-R_2) \right]} \int_{-L}^L dv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\chi_x u + 2i\chi_z A \sin(kv/2) \sin(ku/2)} du \quad (3),$$

где $2L$ - характерный размер площади облучения, R_1 и R_2 - корреляционные функции, а

$h_1^2 = \langle \xi_1^2 \rangle$ и $h_2^2 = \langle \xi_2^2 \rangle$ - среднеквадратичная высота соответственно мелкомасштабных и

крупномасштабных компонент поверхностного волнения.

Дальнейшее разложение в ряд Тейлора членов, соответствующих крупномасштабным волнам, и почленное интегрирование, а также учет допущений [8] позволяют получить следующее выражение для расчета радиолокационного сечения обратного рассеяния

$$\sigma = \sqrt{\pi} L e^{-\chi_z^2 h_1^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} (\chi_z h_1)^{2m} \frac{1}{\sqrt{s_0}} e^{-\chi_x^2 / 4s_0} M(m) \quad (4)$$

где

$$M(m) \approx \sum_{r=0}^{\infty} \frac{1}{(r!)^2} [\chi_x \chi_z AK / 4s_0]^{2r} e^{-\chi_x K r / 4s_0}, \quad S_0 = \chi_z^2 \frac{h_2^2}{l_2^2} + \frac{m}{2l_1^2}$$

На основе уравнения (4) возможно провести численный анализ радиолокационного рассеяния для достаточно широкого класса статистически неоднородных поверхностей и, что особенно важно, в основу расчета возможно заложить спектры поверхностного волнения, соответствующие как покрытым пленкой участкам поверхности, так и областям чистой воды.

Основные результаты

Проведенные численные расчеты позволяют исследовать вклад в общее сечение рассеяние различных областей спектра поверхностного волнения. В частности, было проведено сравнение интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного на поверхности в присутствии только мелкомасштабных возмущений, и для случая, когда мелкомасштабные возмущения модулируются более длинными волнами (композитная поверхность). Результаты представлены на рис. 2.

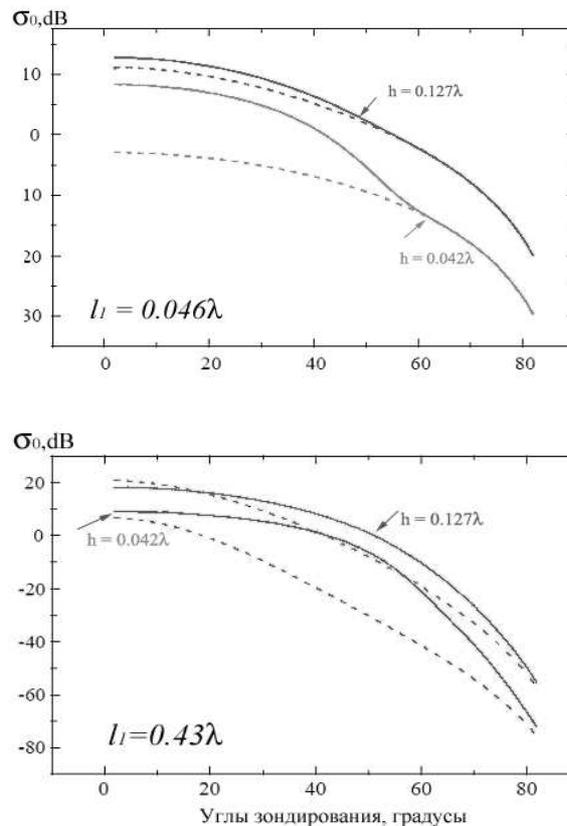


Рис. 2. Угловые зависимости сечения обратного рассеяния, рассчитанные без учета длинноволновой составляющей (сплошная линия) и с учетом ее модулирующего влияния (пунктир). Параметры длинноволновой составляющей : γ (тангенс угла уклона) = 0.01, $AK = 0.1$, $K = 2\pi/\lambda$, $\lambda = 1\text{м}$, $k/K = 3 \cdot 10^3$.: (а) для различных средних высот мелкомасштабной компоненты поверхностного волнения при постоянной длине $l_1 = 0.046\lambda$; (б) то же, что и (а), но $l_1 = 0.43\lambda$

Эффект гашения поверхностного волнения нефтяными пленками может привести к одновременному уменьшению как средних возвышений, так и средней длины поверхностного волнения. Примеры угловых зависимостей сечения обратного рассеяния представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 представлены результаты расчета для случая, когда изменяются и среднее квадратичное отклонение и радиус корреляции мелкомасштабной шероховатости, а длинноволновая модуляция отсутствует.

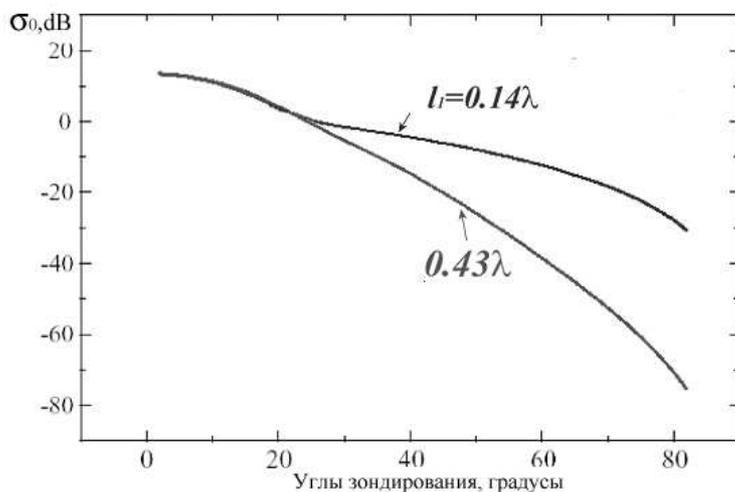


Рис. 3. Угловые зависимости сечения обратного рассеяния на мелкомасштабной составляющей волнения для двух разных значений длин $l_1 = 0.14\lambda$; и $l_1 = 0.43\lambda$ при малом $h_1 = 0.042\lambda$

Из представленных графиков видно, что при умеренных углах зондирования возможно понижение интенсивности сечения обратного рассеяния на 15-20 дБ.

Наличие «толстой» нефтяной пленки на морской поверхности может привести к затуханию волн и понижению спектральной мощности в широком спектральном диапазоне. Поэтому представляет особый интерес выявить, каким образом введение в расчет модулирующего эффекта длинноволновой составляющей спектра отразится на сечении обратного рассеяния. На рис. 4 представлены угловые зависимости интенсивности обратного рассеяния, рассчитанные при наличии длинноволновой компоненты, характеризующейся различными средними уклонами, для случаев малых и умеренных значений мелкомасштабной шероховатости.

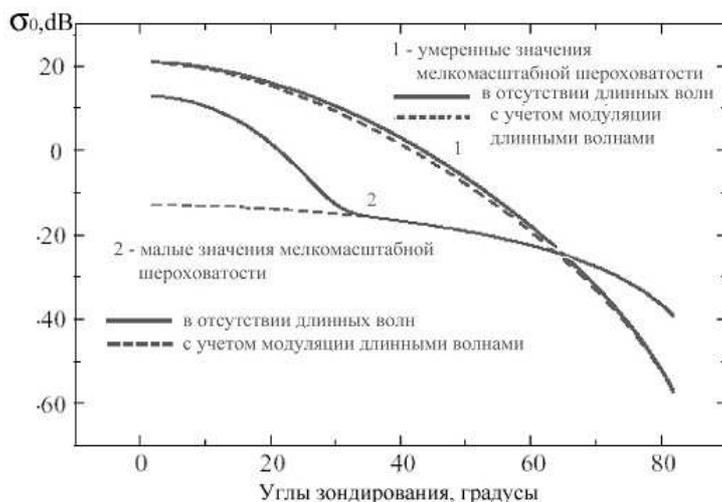


Рис. 4. Угловые зависимости сечения обратного рассеяния, рассчитанные для умеренных $h_1 = 0.127\lambda$; $l_1 = 0.43\lambda$ и малых $h_1 = 0.014\lambda$; $l_1 = 0.046\lambda$ значений мелкомасштабной компоненты спектра поверхностного волнения: в отсутствие длинноволновой компоненты и с учетом ее модулирующего влияния. Параметры длинноволновой составляющей: γ (тангенс угла уклона) = 0.01, $AK = 0.1$, $K = 2\pi/\Lambda$, $\Lambda = 1m$, $k/K = 3 \cdot 10^3$

Легко заметить, что в определенном диапазоне углов (в приведенном примере примерно от 20 до 40 градусов) изменение параметра шероховатости оказывает существенное влияние на интенсивность обратно рассеянного сигнала.

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

Литература

1. *Alpers, W. and H. Huhnerfuss*, The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94(C). P. 6251–6265.
2. *Singh, K. P., A. L. Gray, R. K. Hawkins, and R. A. O'Neil*, The influence of surface oil on C-and Ku-band ocean backscatter // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1989. Vol. GE-24. P. 738–744.
3. *Frate, F., A. Petrocchi, Lichtenegger, and G. Calabresi*, Neural network for oil spill detection using ERS-SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2000. Vol. GE-38. P. 2282–2288.
4. *Solberg, A and C. Brekke*, Oil spill detection by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment.* 2005. 95. P. 1–13.
5. *Fung, A. K.* Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Artech House. Norwood. MA. 1994.
6. *Valenzuela, G. R.*, Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review // *Boundary Layer Meteorol.* 1978. Vol. 13. P. 61–85.
7. *Ishimaru, A.* Wave Propagation and Scattering in Random Media. 1978. Academic Press. New York.
8. *Timchenko, A. I., A. E. Serebryannikov, and K. F. Schuenemann.* The influence of the finite size of the illuminated area on electromagnetic scattering from surfaces with and without slicks // *Progress in Electromagnetic Research*, Vol. 33, 2001. P. 237–259.
9. *Tatarskii, V. and S. F. Clifford.* On the theory of Dk radar observations of ocean surface waves // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1995. Vol. AP-43. P. 843–850,
10. *Hughes B.A.* The effect of internal waves on surface wind waves, 2.Theoretical analysis // *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83. P. 455-465.
11. *Басович А.Я., В.В.Баханов, В.И.Таланов.* Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // *Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность* (под ред. Е.Н.Пелиновского), 1982. Горький, г., С. 8-30
12. *Pierson W.I., Moskowitz L.* A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity method of S.A. Kitaigorodskii // *J. Geophysics Res.* 1964. Vol. 69 (24). P. 5181-5190.