

К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества

II. Малые углы падения

А. Г. Боев, Г. Э. Карвицкий

Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 17 октября 1997 г.

Построена теория радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества при почти вертикальном зондировании. Как показано, диапазон очень малых углов падения характеризуется положительным контрастом, что соответствует относительному увеличению мощности отраженного сигнала, связанного с "разглаживанием" морской поверхности пленкой. С увеличением угла падения контраст уменьшается, переходя от положительных значений к отрицательным.

Побудовано теорію радіолокаційного контрасту морського хвилювання при наявності плівки поверхнево-активної речовини для майже вертикального радіозондування. Показано, що діапазон дуже малих кутів падіння характеризується позитивним контрастом. Це відповідає відносному збільшенню потужності відбитого сигналу, що, в свою чергу, пов'язано з "розгладжуванням" морської поверхні плівкою. Із збільшенням кута падіння контраст зменшується від позитивних значень до від'ємних.

В работе построена теория радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества (ПАВ) для почти вертикального зондирования, когда мощность отраженного сигнала определяется спектром углов наклона морских волн. С использованием модифицированного спектра морского волнения Пирсона-Московитца проанализированы зависимости контраста от параметров пленки, угла падения радиоволны и скорости ветра. Показано, что зондирование при очень малых углах падения характеризуется положительным контрастом, соответствующим относительному усилению отраженного сигнала, что связано с "разглаживанием" морской поверхности пленкой. С увеличением угла падения контраст уменьшается, переходя от положительных значений к отрицательным.

1. Выражение для удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР), использованное в [1], определяет мощность рассеянного радиосигнала в широком диапазоне углов падения радиоволн, кроме малых (почти вертикальное зондирование) и углов близких к $\pi/2$ (скользящее падение).

При облучении морской поверхности под малыми углами падения мощность рассеянного сигнала определяется в основном квазизеркальным отражением от элементов крупных волн. При этом выражение для УЭПР имеет вид [2,3]

$$\sigma = \frac{|R_0|^4 |\bar{q}|^4}{4q_z^4} w(\bar{\gamma}_{\parallel}, \bar{V}) \delta\left(\bar{\gamma}_{\parallel} + \frac{\bar{q}_{\parallel}}{|\bar{q}|}\right), \quad (1.1)$$

где R_0 — френелевский коэффициент отражения радиоволны от плоскости $z=0$ (соответствующей невозмущенной поверхности моря) при вертикальном падении, $\bar{q} = k_E \bar{n}$ — волновой вектор радиоволны, q_z и \bar{q}_{\parallel} — его проекции, соответственно, на вертикаль (ось z) и плоскость xOy .

$$\begin{aligned} q_z &= k_E \cos\theta, \\ q_x &= k_E \sin\theta \cos\varphi, \\ q_y &= k_E \sin\theta \sin\varphi, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где угол θ отсчитывается от вертикали, а угол φ от оси x , направленной противоположно скорости ветра \vec{V} . Вектор $\bar{\gamma}_{\parallel} \{\gamma_x, \gamma_y\}$ характеризует совокупность тангенсов углов наклона крупномасштабных (относительно длины электромагнитной волны λ_E) поверхностных волн, w — двумерное распределение плотности вероятности углов наклона волн. Наличие δ -функции в (1.1) связано с избирательностью отражения электромагнитных волн. Обычно принимается [2,3], что

$$w(\bar{\gamma}_{\parallel}, \bar{V}) = \frac{1}{2\pi ab} \exp\left\{-\left(\frac{\gamma_x^2}{2a^2} + \frac{\gamma_y^2}{2b^2}\right)\right\}, \quad (1.3)$$

$$\text{где } a^2 = \overline{\gamma_x^2}, \quad b^2 = \overline{\gamma_y^2} \quad (1.4)$$

— квадраты дисперсий тангенсов углов наклона.

Дисперсии углов наклона, в свою очередь, определяются по спектру наклонов морского волнения, зависящему от скорости и направления ветра:

$$\begin{cases} a^2 \\ b^2 \end{cases} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{k_m} k^2 S(k, \varphi, \vec{V}) \begin{cases} \cos^2 \varphi \\ \sin^2 \varphi \end{cases} dk d\varphi. \quad (1.5)$$

Здесь k — волновое число морской волны. Верхний предел интегрирования k_m по волновым числам в (1.5) определяется пределами применимости выражения для УЭПР [2,3] и зависит от длины зондирующей радиоволны λ_E и скорости ветра \vec{V} .

Отметим, что рассматриваемый случай почти вертикального зондирования качественно дополняет ситуацию, рассмотренную в [1], так как УЭПР (1.1) учитывает уже не высоту волн, а степень гладкости моря, что позволяет изучить влияние ПАВ на спектр наклонов морского волнения.

Считая, как и в [1], что пленка не влияет на электромагнитные свойства моря, получим, что радиолокационный контраст будет определяться отношением распределений плотности вероятности углов наклона волн при наличии пленки — w_S и без нее — w_0

$$K = \frac{w_S}{w_0} = \alpha \beta \exp \left\{ - \left[(\alpha^2 - 1) \frac{\gamma_x^2}{2a_0^2} + (\beta^2 - 1) \frac{\gamma_y^2}{2b_0^2} \right] \right\}, \quad (1.6)$$

где $\alpha = a_0 / a_S, \quad \beta = b_0 / b_S$ (1.7)

— отношения дисперсий углов наклона волн на чистой — a_0, b_0 и загрязненной — a_S, b_S участках моря.

Из (1.4) и (1.7) получим

$$\alpha^2 = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{k_m} k^2 S_0 \cos^2 \varphi dk d\varphi}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{k_m} k^2 S \cos^2 \varphi dk d\varphi}, \quad (1.8)$$

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{k_m} k^2 S_0 \sin^2 \varphi dk d\varphi}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{k_m} k^2 S \sin^2 \varphi dk d\varphi},$$

где S и S_0 — спектры высот волн, соответственно, на загрязненном и чистом участках поверхности.

Представим спектр морского волнения в виде [2]

$$S(k, \vec{V}, \varphi) = S(k, \vec{V}) \cdot Q(k, \varphi, \vec{V}),$$

где

$$Q = \frac{\cos^n \varphi}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^n \varphi d\varphi}, \quad (1.9)$$

а показатель степени n зависит от скорости ветра. Предполагая, что пленка слабо влияет на угловую структуру спектра, получим из (1.8)

$$\alpha^2 = \beta^2 = \frac{\int_0^{k_m} k^2 S_0 dk}{\int_0^{k_m} k^2 S dk}. \quad (1.10)$$

Так как, согласно [1] $S/S_0 \leq 1$ при каждом k , то $\alpha^2 \geq 1$. Для контраста (1.6) получим при этом следующее выражение

$$K = \alpha^2 \exp \left\{ - (\alpha^2 - 1) \left(\frac{\gamma_x^2}{2a_0^2} + \frac{\gamma_y^2}{2b_0^2} \right) \right\}. \quad (1.11)$$

2. Для вычисления отношения дисперсий тангенсов углов наклона волн при наличии пленки ПАВ, входящего в выражение для контраста (1.11), использовался модифицированный спектр морского волнения Пирсона-Московитца [2] и отношение спектров высот волн из [1]. Вычисления проводились для зондирующей электромагнитной волны длиной $\lambda_E = 3$ см, для которой имеются подробные данные относительно дисперсий a_0 и b_0 , также входящих в формулу (1.11).

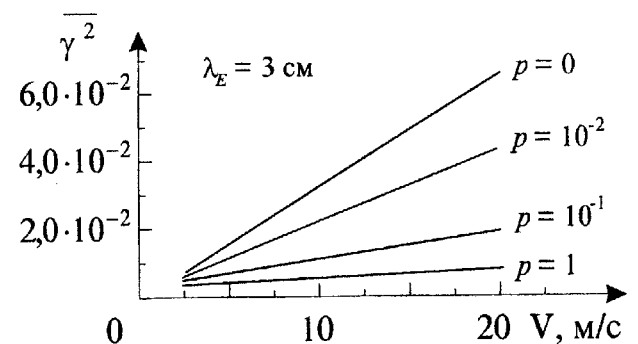


Рис. 1. Зависимость квадрата дисперсии тангенсов углов наклона волн от скорости ветра для масляной пленки ($\alpha_s = 33$ дин/см) с различной поверхностной активностью p

На рис. 1 представлены зависимости квадрата дисперсии углов наклона морских волн при наличии масляной пленки ($\alpha_s = 33$ дин/см) для различных значений безразмерной поверхностной активности пленки $p = (c_0/\alpha_s)(d\alpha_s/dc)$, где α_s и c_0 , соответственно, коэффициенты поверхностного натяжения и невозмущенная поверхностная концентрация ПАВ. Видно, что средний разброс углов наклона волн уменьшается с ростом p .

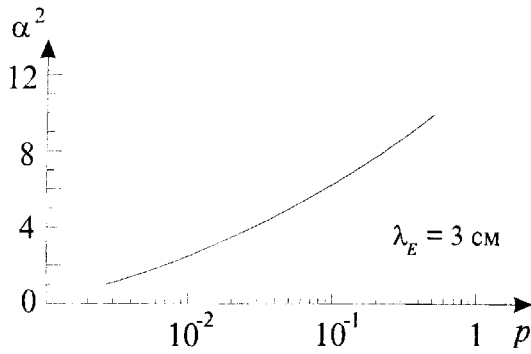


Рис. 2. Зависимость отношения квадратов дисперсий α^2 от безразмерной поверхностной активности пленки p

На рис. 2 представлена зависимость отношения квадратов дисперсий α^2 от параметра p для скорости ветра $V = 10$ м/с. Видно, что это отношение достаточно велико и способно заметно влиять на контраст.

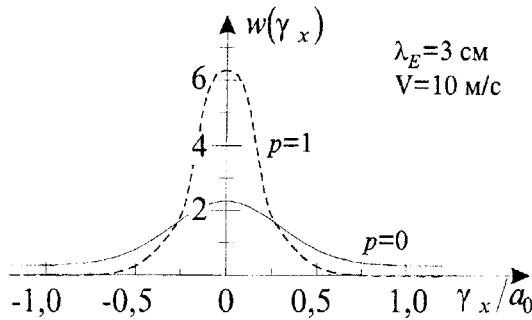


Рис. 3. Плотности вероятности W тангенсов углов наклона волн для чистой ($p = 0$) и загрязненной поверхностей ($p = 1$)

На рис. 3 представлены одномерные распределения плотности вероятности углов наклона волн на чистой морской поверхности — w_0 и на загрязненной — w_s для значения параметра $p = 1$, характерного для достаточно активной пленки [4]. Видно, что доля больших углов наклона на

“крыльях” w_s уменьшилась по сравнению с w_0 , доля же малых углов заметно увеличилась, что говорит о разглаживании поверхности моря под действием пленки ПАВ.

На рис. 4 представлены зависимости максимума w_m функции w_s и ее относительной ширины $\Delta\gamma/2a_0$ от параметра p . Видно, что с ростом p море разглаживается сильнее.

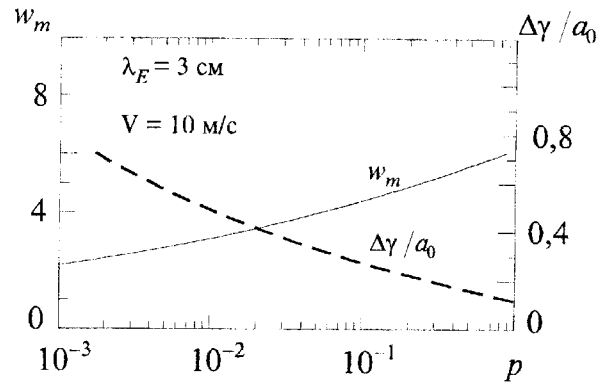


Рис. 4. Зависимость максимального значения плотности вероятности w_m и ее ширины $\Delta\gamma/a_0$ от поверхностной активности пленки p

$$D = 10 \lg K$$

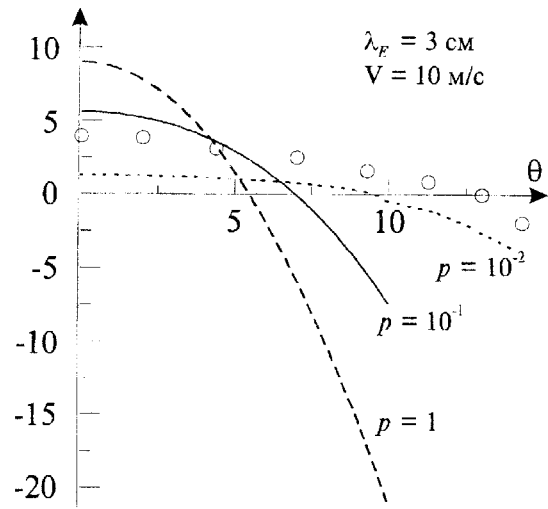


Рис. 5. Логарифмический контраст D морского волнения при малых углах падения радиоволны при наличии пленок различной поверхностной активности p

На рис. 5 представлена зависимость радиолокационного контраста (1.11) (в децибелах)

$$D = 10 \cdot \lg K \tag{2.1}$$

от угла падения волны при различных значениях безразмерной поверхностной активности пленки p .

Там же (кружочки) приведены данные эксперимента из работы [5]. Сравнение с теоретическими кривыми позволяет оценить безразмерную поверхностную активность пленки:

$$p \approx (4 \div 5) \cdot 10^{-2}.$$

В отличие от контраста при резонансном рассеянии [1], который всегда отрицателен, контраст при почти вертикальном зондировании ведет себя качественно иначе. Видно, что при очень малых углах зондирования он положителен, что говорит об относительном усилении отраженного сигнала. Это связано с тем, что, как уже отмечалось, поверхность моря при наличии пленки становится более гладкой. С увеличением угла контраст становится отрицательным, что говорит об относительном уменьшении больших углов наклона волн. Описанный выше эффект усиления отраженного сигнала при вертикальном зондировании загрязненной пленкой поверхности является весьма специфическим и также может быть использован для диагностики поверхностного загрязнения моря. Вместе с тем надо отметить, что положительные значения контраста невелики, отрицательные же его значения существенно больше, что в условиях эксперимента делает эффект влияния пленки более заметным.

Работа выполнена при поддержке Центра Радиолокационного Зондирования Земли им. А. И. Калмыкова и в рамках Европейской программы "Коперникус", контракт №ICIS-CT96-0816.

Литература

1. А.Г. Боев, Г.Э. Карвицкий. Радиопизика и радиоастрономия, 1997. (В настоящем сборнике).
2. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Под ред. А.М. Митника, С.В. Викторова. Ленинград, Гидрометиздат, 1990, 200 с.
3. Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. Москва, Наука, 1972, 424 с.
4. Д.А. Фридрихсберг. Курс коллоидной химии. Ленинград, Химия, 1984, 386 с.
5. A.I. Kalmykov, A.P. Pichugin, Yu.A. Sinitsyn, V.P. Shestopalov. *Jut. J. Remote Sensing*. 1982, 3, No. 3, pp. 311-325.

On Theory of Radar Sea Contrast in Presence of Surface-Active Film II. Small Incidence Angles

A. G. Boev, G. E. Karvitsky

A theory of sea radiolocational contrast is built with account of a film of active surface substance and almost vertical search. It was shown that the range of very small incidence angles is characterized by a positive contrast, which corresponds to relative increase of the reflected signal concerned with the smoothing of sea surface by the film. The contrast decreases with the incidence angle increase changing from positive values to negative.