

УДК 538.574.6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ В РАДИОТЕПЛОМ ИЗЛУЧЕНИИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. Е. Гершензон, В. Г. Ирисов, Ю. Г. Трохимовский, В. С. Эткин

В целях исследования радиотеплового излучения морской поверхности рассматривается задача дифракции вспомогательной плоской электромагнитной волны на периодически неровной поверхности. Решение проводится методом разложения полей на плоские волны и последующего численного обращения матричных уравнений, что позволяет не накладывать ограничений малости и пологости неровностей. Представлен расчет приращения излучательной способности синусоидальной поверхности в зависимости от периода неровностей, их амплитуды и угла наблюдения. Проводится сопоставление результатов лабораторного эксперимента с данными численных расчетов.

В собственном излучении морской поверхности (МП) наблюдаются резонансные эффекты, получившие название критических явлений [1-3], исследование которых имеет первостепенное значение для понимания возможностей дистанционного зондирования МП с помощью радиометров. Данная работа представляет развитие исследований в этом направлении как в теоретическом, так и экспериментальном плане.

1. Максимумам в радиотеплом излучении плоской периодически неровной поверхности соответствуют критические условия, когда максимум рассеяния вспомогательной плоской электромагнитной волны направлен вдоль поверхности

$$\Lambda(1 \pm \sin \theta) = n\lambda, \quad (1)$$

где Λ — период неровностей на поверхности, λ — длина волны излучения, $n=1, 2, \dots$ (рис. 1а, б). В этом случае наблюдается эффективное поглощение, а следовательно, в соответствии с законом Кирхгофа, и излучение электромагнитной энергии.

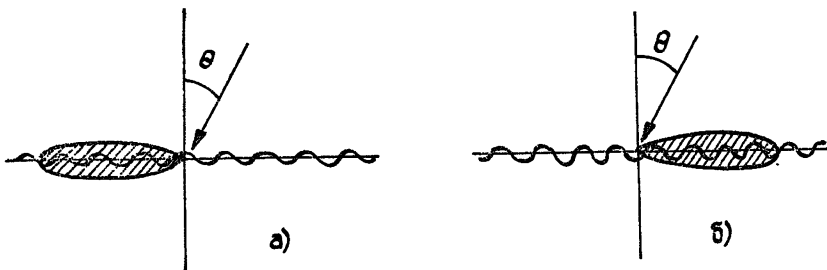


Рис. 1.

Аналогично [1, 3] для нахождения излучательной способности неровной поверхности рассмотрим задачу поглощения и рассеяния вспомогательной плоской электромагнитной волны этой поверхностью. Если при этом не требовать малости и пологости неровностей (что часто не выполняется для реальных границ сред и, в частности, для МП в области гравитационно-капиллярных волн), то метод возмущения

ний оказывается неприменим, и задача требует численного решения. При этом оказывается удобным использовать интегральную формулировку задачи дифракции [4]:

$$\left. \begin{array}{l} z > z_{\max}, \quad \varphi(r) \\ z < z_{\min}, \quad 0 \end{array} \right\} - \varphi_i(r) = \int d\sigma' \left[\frac{\partial \varphi}{\partial n}(r') G_0(r, r') - \varphi(r') \frac{\partial G_0(r, r')}{\partial n} \right], \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} z > z_{\max}, \quad 0 \\ z < z_{\min}, \quad \psi(r) \end{array} \right\} = - \int d\sigma' \left[\frac{\partial \psi}{\partial n}(r') G_1(r, r') - \psi(r') \frac{\partial G_1(r, r')}{\partial n} \right],$$

где $d\sigma' = \sqrt{1 + (dz/dx')^2} dx'$ — элемент поверхности интегрирования, $G_0(r, r')$, $G_1(r, r')$ — функции Грина для верхней и нижней сред соответственно, φ , $\partial\varphi/\partial n$, ψ , $\partial\psi/\partial n$ — поля и их нормальные производные соответственно над и под границей раздела $z(x)$, φ_i — падающая плоская волна.

В случае периодически неровной поверхности задача существенно упрощается [4, 5]: от интегральных уравнений, связывающих поля и их нормальные производные на границе раздела сред с рассеянными полями в верхней и нижней средах, можно перейти к матричным уравнениям, связывающим коэффициенты фурье-разложений полей и их производных на поверхности с амплитудами дискретных рассеянных мод:

$$b_n = D_{nm}^+ \beta_m + R_{nm}^+ \alpha_m, \quad -a_n = D_{nm}^- \beta_m + R_{nm}^- \alpha_m, \quad (3)$$

$$B_n = \tilde{D}_{nm}^+ \delta_m + \tilde{R}_{nm}^+ \gamma_m, \quad -A_n = \tilde{D}_{nm}^- \delta_m + \tilde{R}_{nm}^- \gamma_m.$$

Здесь величины a_n , b_n , A_n , B_n являются коэффициентами разложений левых частей уравнений (2) по плоским волнам в областях выше максимальной и ниже минимальной точек поверхности; α_m , β_m , γ_m и δ_m — коэффициенты фурье-разложений величин φ , $\partial\varphi/\partial n$, ψ и $\partial\psi/\partial n$ на периоде неровностей, D_{nm}^\pm , R_{nm}^\pm , \tilde{D}_{nm}^\pm , \tilde{R}_{nm}^\pm — соответствующие матрицы перехода. Используя граничные условия, можно связать величины α_m и β_m с γ_m и δ_m и тем самым замкнуть систему (3).

Поглощение находится как поток вектора Пойнтинга через поверхность из известных полей и их производных на поверхности раздела сред:

$$x = \int \operatorname{Re} \left(\frac{1}{ik} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \varphi^* \right) = -4 \sum_m \operatorname{Re} (\alpha_m^* \beta_m). \quad (4)$$

При проведении расчетов, как правило, учитывалось 5—7 рассеянных и прошедших через границу мод, что обеспечивало выполнение закона сохранения энергии

$$\sum_n |b_n|^2 - 4 \sum_m \operatorname{Re} (\alpha_m^* \beta_m) = 1 \quad (5)$$

с точностью $10^{-4} - 10^{-5}$ [6].

На рис. 2а представлены результаты расчетов приращения излучательной способности Δk поверхности с синусоидальными неровностями в зависимости от относительного периода неровностей Λ/λ на вертикальной поляризации для различных углов наблюдения θ , отсчитывающихся от надира (амплитуда неровностей $Q = \lambda/32$, диэлектрическая проницаемость ϵ здесь и далее равна $18,33 + i28,27$, что соответствует ϵ пресной воды при 20°C для $\lambda = 0,8 \text{ см}$). Для углов, близких к надиру ($\theta \sim 0^\circ$), наблюдается отчетливо выраженный резонансный эффект, для углов же наблюдения, близких к углу Брюстера ($\theta \sim 75^\circ$), характерна меньшая «селективность» по отношению к периодам неровностей.

На рис. 2б приведены зависимости Δk от угла наблюдения θ для амплитуды неровностей $Q = \lambda/8$; параметром служит период неровнос-

тей Λ . Из рисунка видно, что наряду с максимумом первого порядка, соответствующим условию $\sin \theta_1 = 1 - \lambda/\Lambda$ (для $\Lambda \geq \lambda$), имеется более слабый максимум второго порядка при $\sin \theta_2 = 2\lambda/\Lambda - 1$ ($\lambda \leq \Lambda \leq 2\lambda$). Таким образом, данный численный метод позволяет детально анализировать излучение периодически неровной поверхности даже в случае немалых амплитуд неровностей.

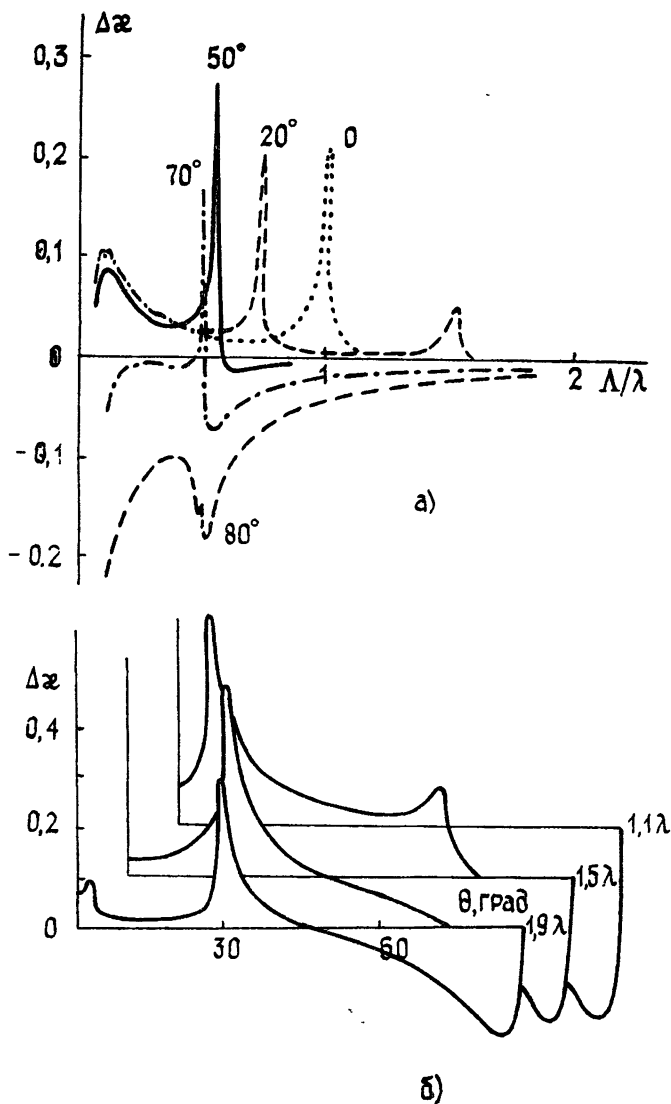


Рис. 2.

Численные расчеты позволяют исследовать пределы применимости метода малых возмущений (ММВ). Согласно ММВ величина Δz должна расти пропорционально квадрату амплитуды неровностей. Зависимости приращения коэффициента излучения Δz от квадрата амплитуды $(Q/\lambda)^2$ (результаты численного расчета — «+», «·») для $\theta = 0^\circ$ приведены на рис. 3 для $\Lambda = 0,51\lambda$ (1) и $\Lambda = 0,99\lambda$ (2), т. е. для области, далекой от критической, и, практически, для максимума излучения. Оказывается, что если

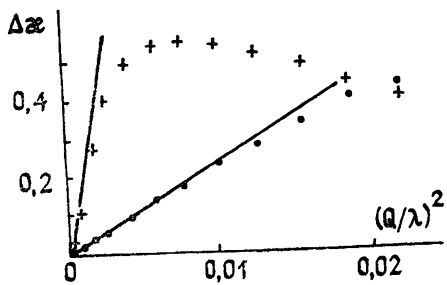


Рис. 3.

в удаленной от критической области ($\Lambda=0,51 \lambda$) ММВ дает результаты с хорошей точностью вплоть до $Q=0,1 \lambda$, то в области максимума излучения расхождение становится существенным уже при $Q=0,04 \lambda$. Это обстоятельство следует учитывать при применении ММВ в конкретных расчетах.

Приведенные графики (рис. 2а, б) оказываются полезными для интерпретации результатов реальных наблюдений МП: рис. 2а — для «свертки» наблюдаемого эффекта со спектром морского волнения, рис. 2б — для оценки влияния диаграммы направленности антенны.

2. Для лабораторных экспериментов по исследованию критических явлений была использована следующая методика: рябь на поверхности воды формировалась системой параллельных нитей, которые смачивались и приподнимались. При этом за счет сил поверхностного натяжения возникали периодические неровности. Профиль поверхности рассчитывался по известному расстоянию между нитями и вертикальному смещению. Проведенные оценки показали, что основной вклад в радиояркие контрасты дает амплитуда первой гармоники, но при сопоставлении с расчетом необходимо также учитывать вклад второй и третьей гармоник сформированного профиля [7].

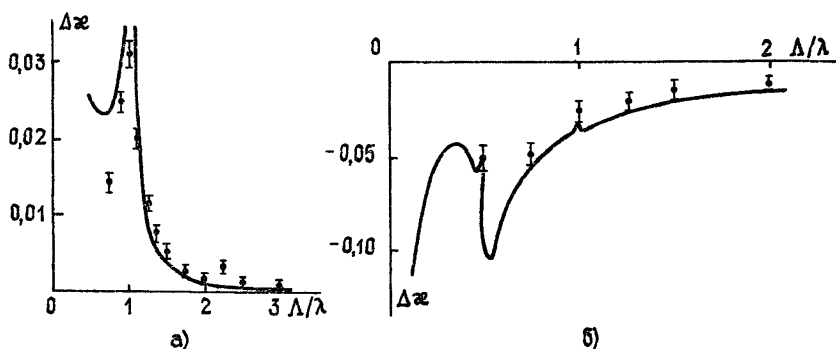


Рис. 4.

Результаты экспериментальных исследований вариаций излучательной способности $\Delta\epsilon$ водной поверхности в зависимости от относительного периода неровностей Λ/λ представлены на рис. 4а для наблюдения под углом $\theta=5^\circ$ и на рис. 4б для угла $\theta=75^\circ$. Сплошной кривой показаны результаты расчетов для вертикальной поляризации и ориентации плоскости наблюдения перпендикулярно неровностям. В расчете был просуммирован вклад первых трех гармоник профиля поверхности. Наблюдается хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Некоторое количественное отличие объясняется, по-видимому, необходимостью учета трехмерной геометрии задачи (реальной диаграммы направленности антенны), а также теми отклонениями реального профиля от используемого в расчетах, которые связаны с неконтролируемым провисанием нитей и т. п.

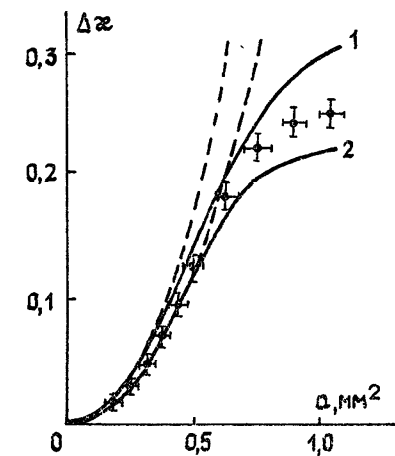


Рис. 5.

На рис. 5 точками отмечены экспериментальные зависимости приращений коэффициента излучения $\Delta\epsilon$ от амплитуды первой гармоники профиля неровностей для угла наблюдения $\theta=5^\circ$ и периода неровнос-

тей $\Lambda \simeq \lambda$. Сплошными кривыми показаны аналогичные расчетные зависимости: кривая 1 для $\Lambda = 1,001\lambda$, кривая 2 для $\Lambda = 1,1\lambda$, пунктирными линиями — соответствующие зависимости Δk , полученные применением ММВ для тех же отношений Λ/λ . Как и следовало ожидать, характерный эффект «насыщения» роста Δk при больших амплитудах не может быть объяснен в рамках ММВ, в то время как численный расчет дает результаты, качественно согласующиеся с экспериментальными.

Таким образом, в работе реализован метод решения двумерной задачи дифракции плоской электромагнитной волны на периодически неровной водной поверхности, позволяющий рассчитывать излучательные характеристики для произвольных углов наблюдения и амплитуд неровностей. Показано существенное отличие резонансных эффектов в собственном излучении водной поверхности при наблюдении в надиры и под настильными углами. Рассмотрены пределы применимости метода малых возмущений и показана необходимость использования численных методов для исследования излучения шероховатой водной поверхности с неровностями немалой амплитуды. Сопоставление результатов лабораторного эксперимента с расчетными демонстрирует качественное и количественное согласие данных теории и эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эткин В. С., Ворсин Н. Н., Кравцов Ю. А. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 3, с. 454.
2. Кравцов Ю. А., Мировская Е. А., Попов А. Е. и др. — Изв. АН СССР. Сер. физика атмосферы и океана, 1978, 14, № 7, с. 733.
3. Генчев Ж. Д. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 1, с. 48.
4. Waterman P. C. — J. Acoust. Soc. Am., 1975, 57, № 4, p. 791.
5. Chuang S. L., Kong J. A. — Radio Sci., 1982, 17, № 3, p. 545.
6. Ирисов В. Г. Препринт ИКИ АН СССР ПР-944. — М., 1984.
7. Трохимовский Ю. Г., Эткин В. С. Препринт ИКИ АН СССР ПР-988. — М., 1985.

Институт космических исследований
АН СССР

Поступила в редакцию
5 августа 1985 г.

INVESTIGATION OF RESONANT EFFECTS IN THE RADIOTHERMAL EMISSION OF WATER SURFACE

Gershenson V. E., Irisov V. G., Trokhimovskij Yu. G., Etkin V. S.

For the purpose of investigation of sea surface radiothermal emission, the diffraction of an auxiliary plane electromagnetic wave by periodic surface is considered. The solution is carried out by plane wave series expansion and computer inversion of matrix equations that permits one to ignore smooth and small roughness restrictions. Calculated emissivity coefficient increment of sinusoidal surface as functions of period, observing angle and roughness amplitude are presented. The results of laboratory experiment are compared with the calculated ones.
