

УДК 621.371.24

ОБНАРУЖЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ТЕПЛОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕРОВНОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. С. Эткин, Н. Н. Ворсин, Ю. А. Кравцов, В. Г. Мировский,
В. В. Никитин, А. Е. Попов, И. А. Троицкий

В данной работе экспериментально обнаружены критические явления, возникающие при тепловом радиоизлучении неровных водных поверхностей с синусоидальным профилем. Наблюдаемые максимумы излучения соответствуют появлению (или исчезновению) дифракционных спектров в смежной задаче о падении плоской волны на синусоидальную поверхность.

В последние годы при исследовании теплового радиоизлучения неровных поверхностей было отмечено увеличение интенсивности излучения при появлении мелко-масштабных шероховатостей [1-3]. Нами было детально исследовано тепловое излучение водной поверхности с синусоидальным профилем в двух частотных диапазонах. Исследования проводились с помощью специально созданного для этих целей радиометрического двухчастотного приемного устройства с центральными частотами 3,5 и 14,5 ГГц, а также радиометра-скаттерометра с частотой 13,3 ГГц. В экспериментах измерялись приращения яркостной температуры $\Delta T_{\text{я}}$ водной поверхности при возбуждении на ней поверхностных волн с различными амплитудами a и длинами Λ . Плунжерный механизм обеспечивал возбуждение в экспериментальном лотке поверхностных волн с плоским фронтом, длина которых Λ менялась в пределах от 2 до 20 см. Измерение амплитуд волн осуществлялось с помощью емкостного волнографа, датчик которого располагался в центре пятна диаграмм направленности приемных антенн. Измерения проводились при различных углах визирования для горизонтально и вертикально поляризованных компонент поля теплового радиоизлучения.

Результаты эксперимента приведены на рис. 1 (горизонтальная поляризация) и на рис. 2 (вертикальная поляризация) в виде зависимостей величины $\Delta T_{\text{я}}/a^2$ от безразмерного отношения $K/k_0 = \lambda_0/\Lambda$ (здесь $K = 2\pi/\Lambda$, а λ_0 — длина радиоволны). Обнаруженная экспериментально зависимость $\Delta T_{\text{я}} \sim a^2$ (при фиксированном значении K/k_0) согласуется с предсказаниями теории возмущений, которая применима при $a \ll \lambda_0$. Из сравнения кривых на рис. 1 и 2 видно, что при вертикальной поляризации максимумы излучения выражены сильнее, чем при горизонтальной.

Наблюдаемые максимумы теплового излучения представляют собой одно из проявлений критических эффектов в электродинамике, рассмотренных в работах [4, 5]. Поясним механизм их образования при тепловом излучении синусоидальной поверхности. Пусть плоская волна $E_0 \exp[ik_0(x \sin \theta - z \cos \theta)]$ падает на поверхность

$z = a \cos Kx$ под углом θ (рис. 3). Кроме зеркально отраженной волны $E_0 R \times \exp[ik_0(x \sin \theta + z \cos \theta)]$ такая волна порождает еще и дифракционные спектры вида

$$E_0 A_m^{\pm} \exp[ik_0(x \sin \theta_m^{\pm} + z \cos \theta_m^{\pm})], \quad (1)$$

где $\sin \theta_m^{\pm} = \sin \theta \pm mK/k_0$. Если амплитуда волнения мала по сравнению с длиной радиоволны ($ak_0 \ll 1$), то в (1) можно ограничиться учетом только дифракционных спектров первого порядка ($m = \pm 1$), при этом поглощенную единичной площадкой мощность Q можно вычислить из энергетического баланса (из потока энергии падающей волны нужно вычесть потоки энергии уходящих волн). При $\theta_1^+ = \pi/2$ и $\theta_1^- = -\pi/2$ соответствующие дифракционные спектры исчезают, т. е. становятся неоднородными волнами, а уносимая ими энергия обращается в нуль. Это приводит к резкому возрастанию Q при $\theta_1^{\pm} \rightarrow \pm \pi/2$. Пороговые углы падения θ , отвечающие исчезновению дифракционных спектров первого порядка, могут быть найдены из условий

$$K/k_0 = 1 - \sin \theta; \quad (2a)$$

$$K/k_0 = 1 + \sin \theta. \quad (26)$$

В соответствии с законом Кирхгофа [6] интенсивность теплового излучения поверхности в направлении θ пропорциональна величине Q и, следовательно, также имеет максимумы при выполнении условий (2). Как видно из (2), для каждого значения угла $\theta \neq 0$ существуют два значения K/k_0 , отвечающие максимумам теплового излучения (при $\theta = 0$ оба максимума сливаются). Положения этих максимумов существенно отличаются от положения брэгговского максимума ($K/k_0 = 2 \sin \theta$) при рассеянии назад, так что высказанная в [2] гипотеза о возможной идентичности брэгговского условия с условием максимума теплового излучения представляется необоснованной.

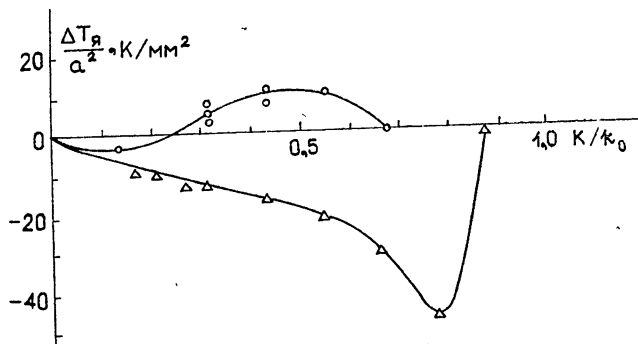


Рис. 1. Результаты измерений при горизонтальной поляризации: треугольники — $\lambda_0 = 2,08 \text{ см}$, $\theta = 0^\circ$; кружки — $\lambda_0 = 2,08 \text{ см}$, $\theta = 30^\circ$.

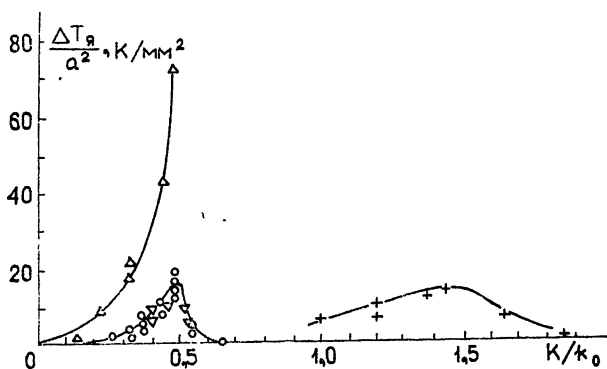


Рис. 2. Результаты измерений при вертикальной поляризации: треугольники — $\lambda_0 = 2,08 \text{ см}$, $\theta = 0^\circ$; кружки — $\lambda_0 = 2,08 \text{ см}$, $\theta = 30^\circ$; крестики — $\lambda_0 = 8 \text{ см}$, $\theta = 30^\circ$; перевернутые треугольники — $\lambda_0 = 2,25 \text{ см}$, $\theta = 30^\circ$.

Приведенные на рис. 1 и 2 экспериментальные кривые, соответствующие длине волны $\lambda_0 = 2,08$ см и углу $\theta = 30^\circ$, демонстрируют хорошо выраженный максимум при $K/k_0 = 0,5$, что согласуется с условием (2 а). Отсутствие второго максимума объясняется тем, что в условиях эксперимента не удалось возбудить достаточно интенсивные поверхностные волны с волновыми числами, удовлетворяющими соотношению (2 б). По той же причине не обнаружен явный максимум на кривых, соответствующих $\lambda_0 = 2,08$ см, $\theta = 0^\circ$; тем не менее наблюдалось возрастание яркостной температуры по мере приближения величины K/k_0 к единице. Справедливость условия (2 б) подтверждается измерениями, проведенными при $\lambda_0 = 8$ см, $\theta = 30^\circ$ (рис. 2).

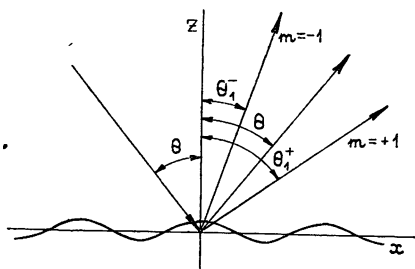


Рис. 3. Падение плоской волны на синусоидальную поверхность.

Критические явления описанного выше типа (подобно другим критическим явлениям) могут возникать и при появлении (исчезновении) дифракционных спектров высших порядков [6, 6], но при $ak_0 \ll 1$ соответствующие максимумы будут незначительны по величине ($\Delta T_{\text{я}} \sim (ak_0)^{2m}$, где m — порядок дифракционного спектра).

Обнаруженные критические явления следует учитывать при интерпретации результатов дистанционных радиометрических наблюдений водной поверхности как в естественных, так и в лабораторных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. S. Adorjan, F. A. Wierum, AIAA J., 9, 2172 (1971).
2. M. J. Van Melle, H. H. Wang, W. F. Hall, J. Geophys. Res., 78, 969 (1973).
3. А. А. Глозов, Д. Т. Матвеев, В. Г. Мирковский, М. Д. Раев, И. А. Троцкий, В. С. Эткин, Метеорология и гидрология, 8, 46 (1975).
4. Б. М. Болотовский, А. Н. Лебедев, ЖЭТФ, 53, 1349 (1967).
5. Б. М. Болотовский, К. И. Кугель, ЖЭТФ, 57, 165 (1969).
6. М. Л. Левин, С. М. Рытов, Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике, изд. Наука, М., 1967.

Институт космических исследований
АН СССР

Поступила в редакцию
22 апреля 1977 г.