

УДК 538.566 : 519.25

О ШИРИНЕ ДИАГРАММЫ ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН ОТ СТАТИСТИЧЕСКИ ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Л. В. Хомякова, Е. А. Штагер

Методом переотражающего экрана измерена диаграмма отражения волн от статистически шероховатой поверхности с крупными и пологими неровностями. Обнаружено уширение диаграмм отражения относительно теоретических в области небольших углов скольжения. Предложена эмпирическая зависимость ширины диаграммы отражения в функции угла скольжения.

Из теории [1, 2] известно, что диаграмма отражения электромагнитных (акустических) волн сужается по мере уменьшения угла скольжения, если отражающей поверхностью служит статистически шероховатая плоскость с пологими и большими неровностями в масштабе длины волны падающего поля. Такого рода поверхности часто встречаются на практике, что и определяет интерес к рассматриваемой закономерности отражения волн от таких поверхностей. Однако до настоящего времени эта закономерность не подтверждена опытным путем и остается неясным, сохраняется ли тенденция к сужению диаграммы отражения волн при небольших углах скольжения, т. е. в области углов скольжения, где аналитические зависимости становятся недостоверными.

В данной работе опытным путем определены диаграммы отражения волн от шероховатой поверхности при разных углах скольжения. Показано, что в области больших углов скольжения измеренная зависимость ширины диаграммы отражения в функции угла скольжения совпадает с теоретической, а при малых углах скольжения сравниваемые зависимости расходятся.

Экспериментальные исследования проводились в бассейне, где изучалось отражение ультразвуковых волн от статистически шероховатой поверхности. В качестве такой поверхности служила возмущенная воздушным потоком водная поверхность бассейна. Созданное трехмерное волнение обладало следующими характеристиками:

1) гауссовым распределением волновых ординат со среднеквадратичным отклонением $\sqrt{D} \approx 1,5$ мм; 2) временным интервалом корреляции, равным 0,2—0,3 с; 3) эллипсом пространственных радиусов корреляции, ориентированным так, что его малая полуось $m_x \approx 30$ мм совпадала с направлением распространения волн, а большая полуось $m_y \approx 110$ мм была направлена вдоль фронта этих волн.

Для измерений диаграмм отражения акустических волн от участка статистически шероховатой поверхности использовался переотражающий экран (см. рис. 1). Поворот экрана вокруг вертикальной оси соответствовал изменению угла визирования водной поверхности относительно неподвижной приемно-передающей антенны. (Более подробно методика измерений с переотражающим экраном изложена в работе [3].) Переотражающим экраном в данном случае служила вертикально расположенная свинцовая пластина (20×30) мм², установленная на

расстоянии трех метров от приёмно-передающей антенны. Оптическая ось антенны была направлена под заданным углом скольжения ψ к поверхности воды (см. рис. 1). Облучение экрана вместе с участком S взволнованной поверхности воды производилось импульсными посылками акустического поля длительностью 600 мкс с несущей частотой около 3 МГц (длина волны акустического поля в воде $\lambda = 0,5$ мм).

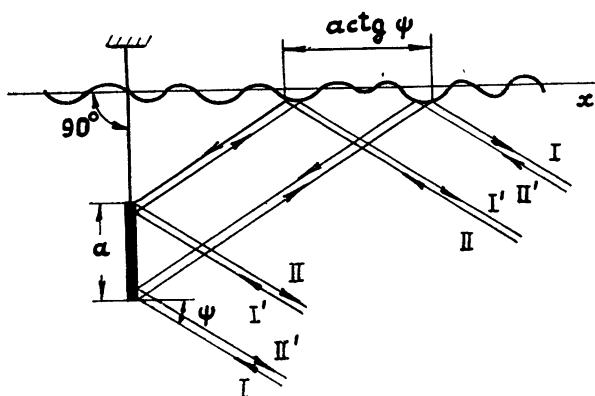


Рис. 1. Схема измерений с помощью переотражающего экрана со сторонами $a = 20$ мм, $b = 30$ мм.

Процесс измерений диаграмм отражения статистически шероховатой поверхности осуществлялся в следующей последовательности. Переотражающий экран устанавливался вертикально, так, чтобы горизонтальный его срез точно совмещался с уровнем спокойной воды; после чего экран опускался на глубину 3 см, с тем, чтобы предотвратить возможность его раскачивания из-за волнения верхнего слоя воды. После установки приемно-передающей акустической антенны под заданным углом скольжения ψ вращением экрана вокруг вертикальной оси достигался максимальный уровень отраженного сигнала. Это положение экрана соответствовало случаю переотражения волн в строго зеркальном направлении ($\psi_{\text{пад}} = \psi_{\text{отр}}$; $\varphi_{\text{пад}} = \varphi_{\text{отр}}$). Затем включались датчики ветрового волнения, и по истечении времени, за которое волнение приобретало стационарный характер, экрану сообщалось медленное вращение в интервале углов $\varphi = \pm 6^\circ$. В течение времени поворота экрана в указанном секторе углов производилась запись отраженного от него сигнала (u_c) на ленту самописца; некоторые из полученных при разных значениях ψ реализаций представлены на рис. 2. Если ограничиться при расчетах освещенной части поверхности приближением геометрической оптики, получаем простую формулу для определения средней удельной ЭПР статистически шероховатой поверхности:

$$\langle \sigma_0 \rangle = \frac{\langle u_c^2 \rangle}{u_s^2} \frac{\sigma_s}{4ab \operatorname{ctg} \psi \cos 2\varphi}, \quad (1)$$

где u_s — амплитуда сигнала, отраженного от эталонного отражателя, σ_s — ЭПР эталонного отражателя, a, b — стороны экрана, угловые скобки означают усреднение по реализациям.

Используя (1), в работе были получены зависимости средневыборочного значения σ_0 от угла φ при выбранных углах скольжения из интервала $5-40^\circ$. По этим зависимостям определялась средневыборочная ширина диаграммы отражения (на уровне -3 дБ относительно экстремума). Измеренные значения средневыборочной ширины ($\Delta_{\text{экср}}$) указаны точками на рис. 3, а доверительный интервал с доверительной вероятностью 0,9 дан в виде заштрихованной полосы.

С целью сопоставления экспериментальных данных с теоретически на рис. 3 построена зависимость средней ширины диаграммы отражения от статистически шероховатой поверхности (кривая 2), рассчитанная по формуле

$$\Delta_{\text{теор}} = \frac{2\sqrt{11D}}{m_y \text{ctg } \psi}, \quad (2)$$

где D — дисперсия отклонений ординат поверхности.

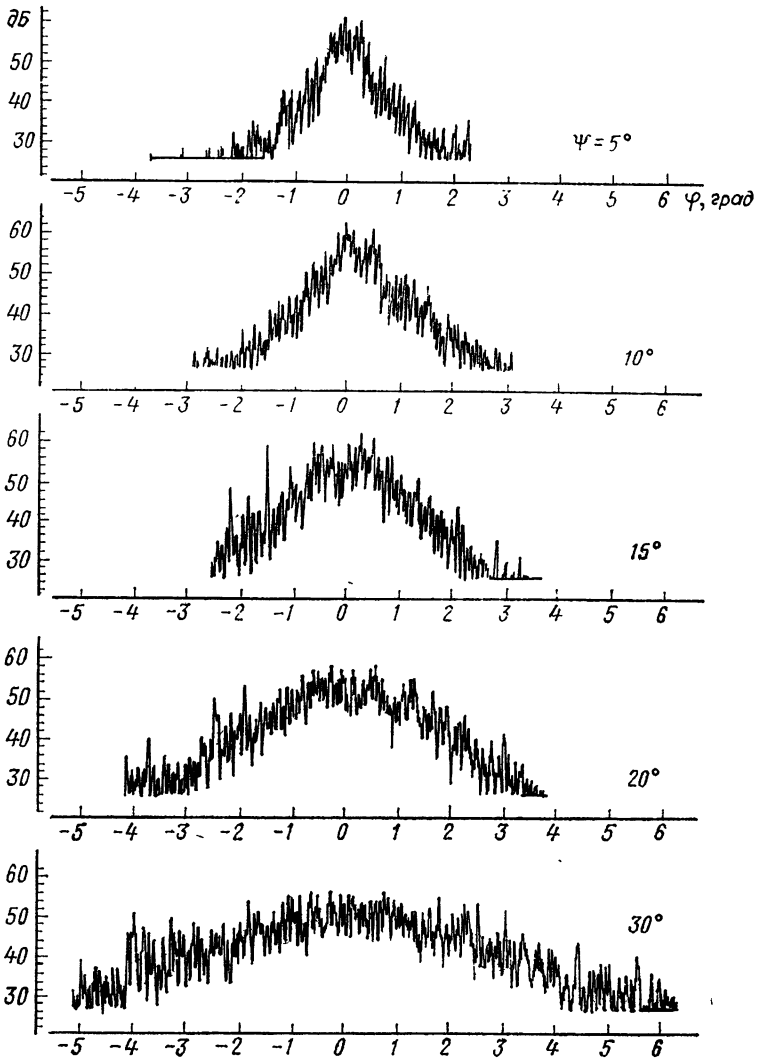


Рис. 2. Осциллограммы диаграмм отражения волн от статистически шероховатой поверхности для различных углов скольжения.

Формула (2) справедлива при условии, если $H = k^2 D \sin^2 \psi \gg 1$, [2]. В рассматриваемом эксперименте $3 \leq H \leq 140$, поэтому на участке $3 \leq H \leq 10$ теоретическая зависимость нанесена пунктиром, а на остальной части — сплошной линией.

Сопоставление теоретической зависимости с экспериментом показывает, что расхождение между ними уменьшается по мере роста угла скольжения. Это обстоятельство дает повод предложить эмпирическую

зависимость от ψ , которая близка к теоретической при $\psi > 40^\circ$ и согласуется с экспериментом на участке $5^\circ < \psi < 40^\circ$:

$$\Delta_{\text{экс}} = \frac{2\sqrt{11D}}{m_y \operatorname{ctg} \psi} \psi^{-2/3}. \quad (3)$$

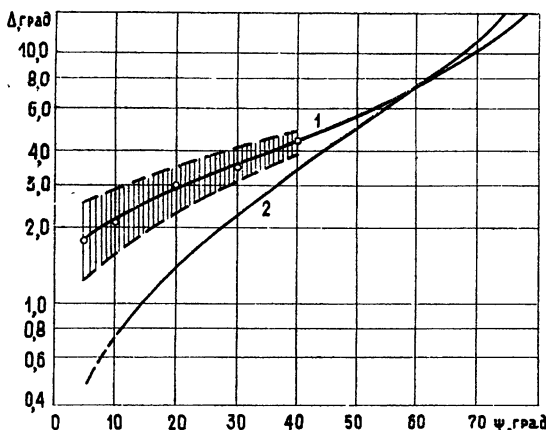


Рис. 3. Зависимости средней ширины диаграммы отражения от угла скольжения: 1 — эмпирическая зависимость по формуле (3), 2 — теоретическая зависимость по формуле (2), точки — результаты эксперимента, штриховка — доверительный интервал.

Наблюдаемые при малых углах скольжения различия между теоретической зависимостью (2) и экспериментальной (3) могут быть объяснены следующим. Формула (2) получена в приближении Кирхгофа, в ней правильно учитываются лишь отражения от пологих, крупных волн, характеризующихся m_y . В действительности (в том числе в условиях данного эксперимента) кроме крупных волн всегда присутствуют более мелкие. Они приводят к уменьшению эффективного интервала пространственной корреляции, выразившемуся в (3) в форме $m_{\text{эфф}} = m_y \psi^{2/3}$.

В заключение авторы выражают свою признательность А. И. Калмыкову за полезную дискуссию по данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исакович М. А. — ЖЭТФ, 1952, 23, № 3, с. 305.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972.
3. Бушман Л. Д., Хомякова Л. В., Штагер Е. А. — Изв. вузов — Радиопизика, 1971, 14, № 8, с. 1288.

Поступила в редакцию
12 августа 1980 г.

THE DIAGRAM WIDTH OF A WAVE REFLECTED FROM STATISTICALLY ROUGH SURFACE

L. V. Khomyakova, E. A. Shtager

By a method of reilluminating screen the diagram is changed for a wave reflected from a statistically rough surface with large and sloping roughness. Broadening of reflection diagrams is detected relative to theoretical ones in the region of small slip angles. An empirical dependence is suggested of the width of the reflection diagram in the function of the slip angle.