

К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.С. Запевалов, А.Н. Большаков,
В.Е. Смолов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

Показано, что на рассеяние звука морской поверхностью существенное влияние оказывают отклонения распределения волновых смещений от распределения Гаусса. При значении параметра Релея равном 1.5 различие коэффициентов отражения, рассчитанных для гауссовой и реальной морской поверхности лежат в пределах 10 %, при $R=2$ они могут достигать 30-40 %.

Для определения рассеянного поля по известным характеристикам поверхности, а также при решении обратной задачи необходимо знать связь между свойствами рассеивающей поверхности и характеристиками рассеянного ею поля. Основные положения теории рассеяния акустических волн на шероховатой поверхности были сформулированы в период с начала 50-х до начала 70-х годов [1, 2]. Тем не менее, в теории рассеяния волн на морской поверхности остается ряд нерешенных вопросов. В первую очередь это обусловлено недостаточной изученностью статистических характеристик поля поверхностных волн.

Как правило, при расчете отражений волн разных видов от границы океан-атмосфера используется ее представление в виде случайной движущейся гауссовой поверхности. В тоже время натурные исследования выявили заметные отклонения статистических характеристик поверхности от значений, соответствующих распределению Гаусса [3, 4]. Анализ показал, что при лазерном зондировании подобные отклонения существенно влияют на характеристики поля рассеянных электромагнитных волн и, в частности, могут приводить к 10-20% росту вероятности появления бликов зеркального отражения [5].

В настоящей работе на основе данных натурных измерений характеристик поля

морских ветровых волн анализируется рассеяние акустических волн на крупномасштабных неоднородностях морской поверхности. Используются данные волнографических измерений, полученные на океанографической платформе МГИ НАН Украины.

Измерительная аппаратура. Исследования статистических характеристик волнового поля осуществлялись с помощью струнного резистивного волнографа [6]. Чувствительным элементом волнографов этого типа является отрезок вертикально натянутой неизолированной проволоки, пересекающий границу раздела вода-воздух. Волнограф имеет следующие характеристики:

- частотный диапазон - 0.05 - 40 Гц.
- диапазон амплитуд - 0.5 - 6 м - в зависимости от применяемого типа резистивных первичных преобразователей.
- разрешающая способность - 0.5 - 2.5 мм - в зависимости от диаметра и применяемого типа резистивных первичных преобразователей.
- динамический диапазон - 75 - 80 дБ.

Измерения скорости ветра проводились анемометром пропеллерного типа. Прибор был установлен на высоте 4 м.

Коэффициент отражения. Введем обозначения: K – волновое число акустической волны; ξ – отклонение взволнованной поверхности от среднего уровня; ρ – радиус корреляции взволнованной поверхности θ – угол падения акустической волны. Будим рассматривать случай, когда поверхностные неоднородности являются крупномасштабными, $K\rho \gg 1$, и будем полагать, что акустическое зондирование происходит под несколькими углами, $K\rho \cos^2 \theta \gg 1$. В этом случае среднее поле можно рассчитать в приближении Кирхгофа, и коэффициент отражения определяется выражением [7]

$$v = \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) \exp(-2i\gamma\xi) d\xi. \quad (1)$$

где $P(\xi)$ – одномерная плотность вероятностей смещения поверхности; $\gamma = K \cos \theta$.

Распределение высот поверхностных волн является квазинормальным. Для опи-

сания плотности вероятностей подобных процессов используются аппроксимации, построенные на основе рядов Грама-Шарлье [8], коэффициенты которых определяются по эмпирическим статистическим моментам. Поскольку в экспериментах обычно определяются статистические моменты до четвертого включительно, то, плотность вероятностей имеет вид,

$$P(\xi) = \frac{\exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi\xi^2}} \left[1 + \frac{A}{6}H_3 + \frac{E}{24}H_4\right], \quad (2)$$

где черта сверху означает осреднение; A и E – коэффициенты асимметрии и эксцесса; H_3 и H_4 – полиномы Чебышева-Эрмита третьего и четвертого порядка соответственно.

Подставляя (2) в (1), получаем

$$\nu = \exp\left(-\frac{R^2}{2}\right) \left[1 + i\frac{A}{6}R^3 + \frac{E}{24}R^4\right], \quad (3)$$

где $R = 2K\sqrt{\xi^2} \cos\theta$ – параметр Релея.

Статистические моменты волнового поля. Объем данных волнографических измерений составил 508 пятиминутных сеансов. Измерения проводились с дискретностью 0.1 сек.

Характер зависимости асимметрии и эксцесса возвышения поверхности от скорости ветра W показан на рис. 1. Оба параметра характеризуются значительным разбросом значений при фиксированных скоростях ветра. Наблюдается слабый рост параметра A с усилением ветра, коэффициент корреляции между A и E равен 0.33. Среднее по всем ситуациям величина асимметрии равняется 0.092.

Параметр E от скорости ветра не зависит. Его среднее значение равно 0.007, при среднеквадратической ошибке равной 0.25.

Характеристики коэффициента отражения. Статистические характеристики, включающие средние по всему диапазону скоростей ветра величины коэффициента отражения $\bar{\nu}$, среднеквадратическое отклонение (СКО) и коэффициент вариаций k_ν ,

рассчитанные для нескольких значений параметра Релея, представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что эффект отклонения плотности вероятностей возвышения поверхности от нормального закона распределения растет с ростом значений параметра Релея. Он слабо влияет на значения коэффициента отражения при $R < 1.5$, а при $R = 2$ значения коэффициента вариаций приближаются к 0.1

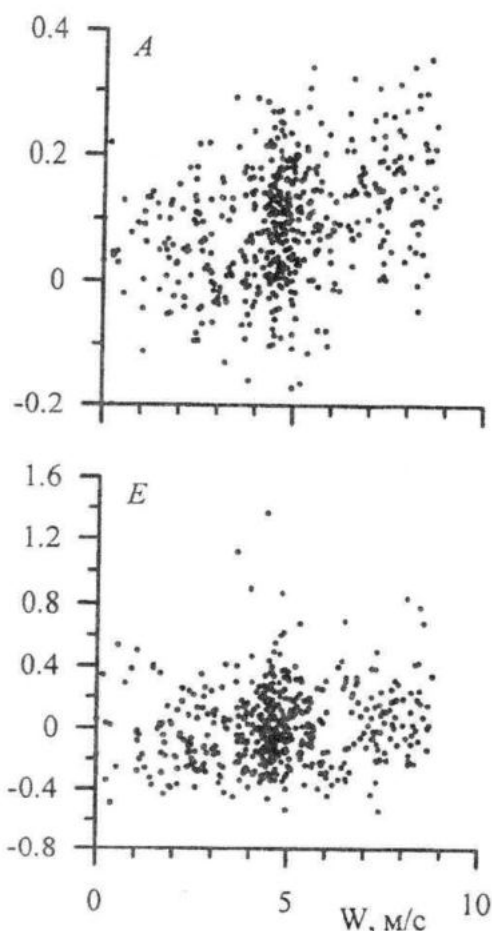


Рис. 1 – Зависимости асимметрии A и эксцесса E распределений возвышения поверхности от скорости ветра W

Таблица 1 – Статистические характеристики коэффициента отражения

R	$\bar{\nu}$	СКО	k_ν
0.8	0.88	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$
1	0.61	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$
1.5	0.33	$9.1 \cdot 10^{-3}$	0.027
2	0.15	0.014	0.096

Отклонения отдельных оценок ν от среднего значения при $R=1.5$ в основном не превышают 10 %, при $R=2$ они могут достигать 30-40 % (см. рис. 2). Наблюдае-

мые отклонения имеют несимметричный характер, Отклонения в сторону более высоких значений сильнее, чем в сторону низких.

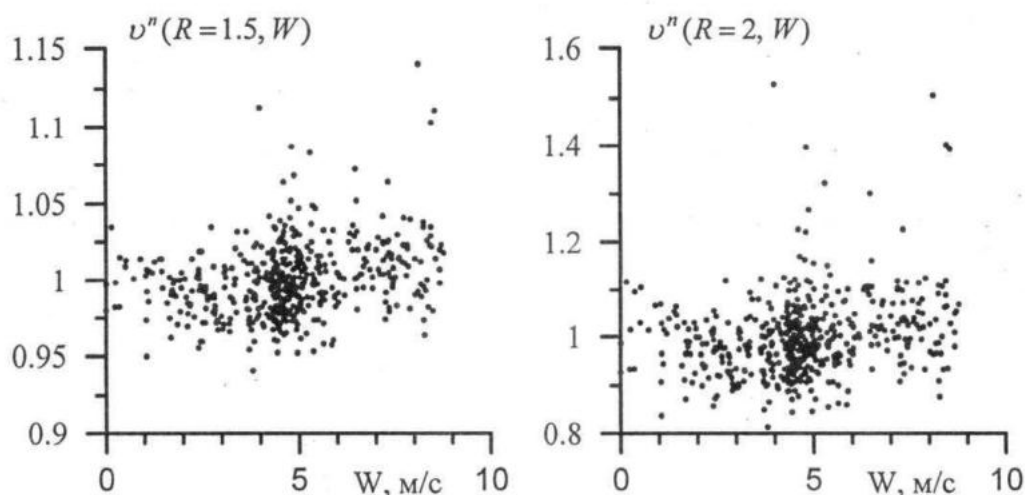


Рис. 2 – Нормированные значения коэффициента отражения $\nu^n = \nu / \bar{\nu}$

Выводы. Анализ рассеяния акустического излучения на крупномасштабных неоднородностях морской поверхности показал, что отклонения распределения волновых смещений поверхности от распределения Гаусса приводят к заметным изменениям коэффициента отражения. При значении параметра Релея равном 1.5 различие коэффициентов отражения, рассчитанных для гауссовой и реальной морской поверхности лежат в пределах 10 %, при $R=2$ они могут достигать 30-40 %

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л.М. Дифракция волн на неровной поверхности. I. – Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1952. – Т. 23, № 3. – С. 275–288.
2. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука. – 1972. – 424 с.

3. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. 1954, V. 44, N 11. – P. 838–850.

4. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-waves components // Deep Sea Res. 1977, V. 24, N. – 12, P. 1211–1223.

5. Запевалов А.С. Вероятность бликов зеркального отражения при наклонном зондировании морской поверхности // Океанология. – 2005. – Т. 45, № 1. – С. 16–20.

6. Смоллов В.Е., Запевалов А.С. Дифференциальный волнограф для исследования высокочастотных составляющих поля морских ветровых волн / Системы контроля окружающей среды, МГИ НАН Украины, Севастополь, 2001. – С. 57–61

7. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Акустика океана // Океанология, Сер. Физика океана. – 1978. – Т. 2. – С. 49–146.

8. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений // М.: “Наука”. – 1966. – 587 с.