

## СВОЙСТВА ОТРАЖЕННОГО СЛУЧАЙНОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ С НЕПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ

П.В. Григорьев, М.В. Солнцев, В.Г. Михалевич, Т.Б. Шевченко

*В работе изучается зависимость мощности обратного отражения от условий волнения и ее изменчивость в условиях натурального эксперимента при лазерной локации морской поверхности с неподвижной платформы.*

Значительное внимание уделяется развитию дистанционных лазерных методов измерения характеристик поверхностного морского волнения. Низкая расходимость, высокая интенсивность лазерного излучения, существующие методы управления лазерным лучом открывают возможность выполнять такие измерения с высоким пространственным разрешением. Однако при экспериментальной реализации лазерных методов возникают значительные трудности в интерпретации результатов измерений, обусловленные сложным статистическим характером морского волнения, его пространственной и временной изменчивостью.

Существенную помощь в развитии методики лазерного зондирования морской поверхности могут оказать измерения, выполненные с океанографической платформы, поскольку в этом случае можно фиксировать с высокой точностью условия измерений (скорость ветра, течения и т.д.), а также независимо получать характеристики волнения с помощью струнного волнографа.

В настоящей работе сообщаются результаты измерений мощности отраженного назад лазерного излучения, выполненных с океанографической платформы МГИ АН УССР в мае 1986 г. и мае 1987 г.

Средняя мощность отраженного взволнованной поверхностью излучения и его угловая зависимость определяются дисперсией уклонов поверхности /1/, которая, согласно эмпирическим наблюдениям, линейно зависит от скорости ветра. В /2/ из анализа фотографий морской поверхности сделан вывод об асимметрии в распределении уклонов при больших скоростях ветра, что связывается с нелинейным взаимодействием волн и отклонением статистики морской поверхности от гауссовой.

Целью настоящей работы было изучение угловой зависимости мощности обратного отражения и ее изменчивости в условиях натурального эксперимента при лазерной локации морской поверхности.

Платформа расположена на расстоянии  $\sim 500$  м от берега в прибрежной зоне Черного моря, в районе пос. Качивели; лазерный волнограф устанавливался на высоте 13 м от морской поверхности. Измерения направления и скорости ветра выполнялись на высоте 15 м. Обработывались результаты измерений, для которых в течение нескольких часов реализовывались стабильные метеорологические условия.

Конструкция лазерного волнографа аналогична описанной в /3/. В нем использовался He-Ne лазер ЛГ-79/2 со средней мощностью  $\sim 10$  мВт и совмещенной приемно-передающей оптической системой. Диаметр светового пятна на поверхности равнялся 5 см.

В условиях морского волнения отраженный от поверхности сигнал носит импульсный бликовый характер. Экспериментальная установка позволяет измерять среднюю мощность отраженного назад лазерного излучения с различным временем усреднения.

Мощность отраженного назад лазерного излучения  $W = W_0(\pi D^2/4Z^2)L(a/\Omega)$ , где  $D$  – диаметр приемной апертуры;  $W_0$  – падающая мощность;  $Z$  – расстояние до морской поверхности;  $L$  – коэффициент, характеризующий потери излучения при распространении;  $a$  – коэффициент отражения;  $\Omega$  – телесный угол обратного отражения;  $a$  и  $\Omega$  являются функциями угла зондирования  $\theta$ . При углах зондирования до  $20^\circ$  и небольших высотах можно пренебречь потерями на распространение  $L$  и зависимостью  $a(\theta)$ .

В /1/ получено сечение обратного рассеяния радиоволн в предположении о гауссовом характере распределения высот и уклонов морской поверхности, справедливое и для случая лазерного зондирования. Основываясь на результатах /1/, имеем:  $1/\Omega = \sigma_0/4\pi = (1/4\cos^4\theta)\exp[-(\text{tg}^2\theta/2)((\cos^2\varphi/\langle\sigma_{\parallel}^2\rangle) + (\sin^2\varphi/\langle\sigma_{\perp}^2\rangle))/[2\pi(\langle\sigma_{\parallel}^2\rangle)^{1/2}(\langle\sigma_{\perp}^2\rangle)^{1/2}]$ , где  $\langle\sigma_{\parallel}^2\rangle$  – дисперсия уклонов в направлении по ветру,  $\langle\sigma_{\perp}^2\rangle$  – в направлении, перпендикулярном ветру;  $\sigma_0$  – эффективное сечение рассеяния;  $\varphi$  – азимутальный угол зондирования. Таким образом, экспериментальные угловые зависимости мощности обратного отражения позволяют определить дисперсии уклонов морской поверхности.

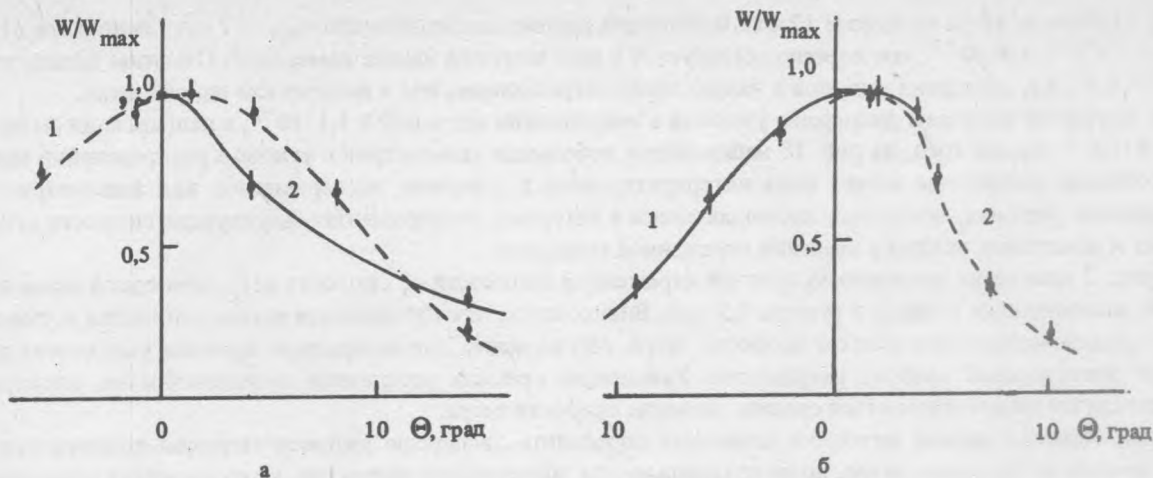


Рис. 1. Экспериментальные угловые зависимости отраженной мощности для различных океанографических ситуаций: а – ветровое волнение; б – ветровое волнение и зыбь.

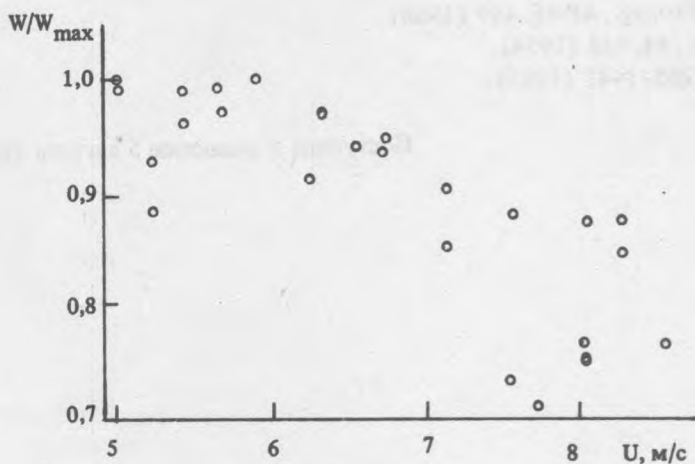


Рис. 2. Зависимость средней отраженной мощности  $W$  от скорости ветра  $U$  для одной серии измерений.

На рис. 1 представлены типичные экспериментальные угловые зависимости мощности обратного отражения, полученные при скоростях ветра в диапазоне  $6,3 \div 8,7$  м/с для двух океанографических ситуаций. На рис. 1а представлен случай наличия ветрового волнения (направление ветра  $80^\circ$ ), кривая 1 соответствует изменению угла зондирования  $\theta$  вдоль направления ветра, кривая 2 – поперек направления ветра. На рис. 1б – случай, когда наряду с ветровым волнением (направление ветра  $255^\circ$ ) имеется зыбь (направление зыби  $130^\circ$ ), кривая 1 соответствует изменению угла зондирования  $\theta$  вдоль направления действия ветра, кривая 2 – вдоль направления зыби. Время усреднения при измерениях мощности составляло 100 с, при измерении скорости ветра – 120 с. Каждая экспериментальная точка получена на основе усреднения 10 измерений.

Характерные значения дисперсии уклонов для случая 1а равны: в направлении по ветру  $\langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle = 2,5 \cdot 10^{-2}$ , в поперечном направлении  $\langle \sigma_{\perp}^2 \rangle = 1,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $\langle \sigma^2 \rangle = \langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle + \langle \sigma_{\perp}^2 \rangle = 3,8 \cdot 10^{-2}$ . В [2] получена эмпирическая зависимость дисперсии уклонов от скорости ветра

$$\langle \sigma^2 \rangle = \langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle + \langle \sigma_{\perp}^2 \rangle = 0,003 + 5,12 \cdot 10^{-3} u_{12,4}, \quad (1)$$

где  $u_{12,4}$  — скорость ветра на высоте 12,4 м. В условиях данных экспериментов  $u_{12,4} \sim 7$  м/с; используя (1), получаем  $\langle \sigma^2 \rangle \sim 3,9 \cdot 10^{-2}$ , что хорошо согласуется с результатами наших измерений. Отметим также, что  $\langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle / \langle \sigma_{\perp}^2 \rangle = 1,92$ , т.е. дисперсия уклонов в направлении ветра больше, чем в поперечном направлении.

Для случая 1б получаем дисперсию уклонов в направлении ветра  $\langle \sigma_{\parallel}^2 \rangle = 1,1 \cdot 10^{-2}$ , в направлении зыби —  $\langle \sigma_{\perp}^2 \rangle = 0,8 \cdot 10^{-2}$ . Кроме того, на рис. 1б наблюдается небольшая асимметрия в угловом распределении мощности, которая, однако, не может быть интерпретирована в условиях экспериментов как асимметрия в распределении уклонов, поскольку наблюдающиеся в натуральных экспериментах флуктуации скорости ветра приводят к заметному разбросу значений отраженной мощности.

На рис. 2 приведена зависимость средней отраженной мощности от скорости ветра для одной серии измерений, выполненных в надир в течение 1,5 часа. Видно, что хотя и наблюдается четкая тенденция к уменьшению средней мощности с ростом скорости ветра, тем не менее при выбранном времени усреднения существует значительный разброс результатов. Увеличение времени усреднения нецелесообразно, поскольку в этом случае может изменяться среднее значение скорости ветра.

Таким образом, данная методика позволяет определить дисперсию уклонов морской поверхности и ее зависимость от скорости ветра, но не оптимальна для обнаружения эффектов, которые могут свидетельствовать о негауссовом характере волнения. Для этого целесообразно применять двухлучевую схему с одновременной регистрацией отраженной мощности для двух различных углов зондирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Barrick D. E. IEEE Trans. Antennas Propag., AP-16, 449 (1968).
2. Cox C. and Munk W. J. Opt. Soc. Am., 44, 838 (1954).
3. Бункин Ф. В. и др. Докл. АН СССР, 281, 1441 (1985).

Поступила в редакцию 5 августа 1987 г.