

Ю. Ю. ЖИТКОВСКИЙ, Е. А. КОПЫЛ

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ КОГЕРЕНТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ПЕРЕИЗЛУЧЕННОГО ПОВЕРХНОСТЬЮ ОКЕАНА

(Представлено академиком Л. М. Бреховским 23 V 1975)

Поле, переизлученное статистически неровной поверхностью, можно разделить на когерентную, или регулярную, и некогерентную, флуктуирующую, компоненты. Соотношение между этими компонентами является важной характеристикой процесса рассеяния и количественно определяется коэффициентом отражения когерентной составляющей *. При экспериментальном изучении рассеяния звука на поверхности океана выделение когерентной компоненты является обычно весьма трудной задачей. Поэтому чаще всего о соотношении между регулярной и флуктуирующей составляющими судят косвенно по характеристикам флуктуаций амплитуды переизлученного поверхностного сигнала. Однако и для непосредственного определения коэффициента отражения нет необходимости отдельно регистрировать регулярную составляющую: можно воспользоваться методом интерференции, подобным тому, который применяется для определения отражательных свойств плоских границ раздела двух сред.

Пусть имеются ненаправленные источник и приемник звука, расположенные под статистически неровной поверхностью, и излучается непрерывный тональный сигнал частоты $\omega = 2\pi f$. Сигнал, зарегистрированный приемником в момент времени t , можно записать в виде

$$p(t) = p_0 \cos \omega t + p_0 \frac{R_0}{R} V \cos(\omega t - \varphi_0) + p_s(t) \cos[\omega t - \varphi_s(t)] = \\ = E(t) \cos[\omega t - \delta(t)]; \quad (1)$$

здесь p_0 — амплитуда прямого сигнала в точке приема; V — коэффициент отражения; φ_0 — фаза отраженного (регулярного) сигнала; $p_s(t)$ и $\varphi_s(t)$ — случайные амплитуда и фаза флуктуирующей части переизлученного поверхностным полем; $E(t)$ и $\delta(t)$ — случайные значения огибающей и фазы суммарного сигнала. В (1) учтено сферическое расхождение когерентной составляющей: R_0 — путь, пройденный прямым, а R — отраженным сигналами от излучателя до точки приема. Так как в дальнейшем мы будем рассматривать только случай малых углов скольжения (глубины погружения излучателя и приемника малы по сравнению с дистанцией между ними), то множитель $R_0/R \simeq 1$ в (1) можно опустить.

Для квадрата огибающей из (1) получим

$$E^2(t) = p_0^2 (1 + V \cos \varphi_0)^2 + p_0^2 V^2 \sin^2 \varphi_0 + p_s^2(t) + \\ + 2p_0 (1 + V \cos \varphi_0) p_s(t) \cos \varphi_s(t) + 2p_0 V \sin \varphi_0 p_s(t) \sin \varphi_s(t). \quad (2)$$

Члены $p_s(t) \cos \varphi_s(t)$ и $p_s(t) \sin \varphi_s(t)$ являются квадратурными составляющими рассеянного поля; они обычно характеризуются нормальным распределением с нулевым средним (^{1, 2}). Поэтому осреднение (2) по времени дает

$$\overline{E^2(t)} = p_0^2 (1 + V \cos \varphi_0)^2 + p_0^2 V^2 \sin^2 \varphi_0 + \overline{p_s^2(t)}. \quad (3)$$

* В дальнейшем для краткости употребляется термин «коэффициент отражения» вместо «коэффициент отражения когерентной составляющей».

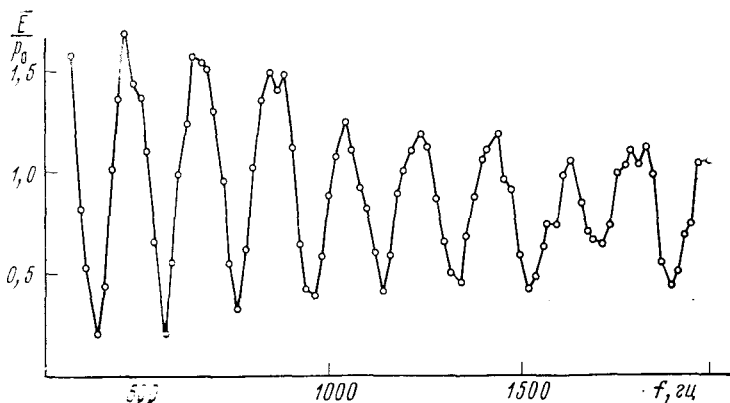


Рис. 1

Последний член в (3) можно представить в виде $\overline{p_s^2} = \alpha p_0^2$, так как средний квадрат давления флуктуирующей составляющей пропорционален интенсивности излученного (а следовательно, и прямого) сигнала.

Если изменяется частота излучения, то в результате интерференции прямого сигнала и регулярной составляющей переизлученного поверхностью сигнала происходит изменение величины $\overline{E^2(t)}$. Считая, что при небольшом изменении частоты, соответствующем соседним экстремумам $\overline{E^2(t)}$, коэффициенты V и α не изменяются, в максимуме ($\varphi_0 = \pm 2\pi n$, $n = 1, 2, \dots$) и минимуме ($\varphi_0 = \pm \pi(2n+1)$) получим соответственно

$$\overline{E_{\max}^2} = p_{\max}^2 (1+V)^2 + \alpha p_{\max}^2; \quad (4)$$

$$\overline{E_{\min}^2} = p_{\min}^2 (1-V)^2 + \alpha p_{\min}^2, \quad (5)$$

где $p_{\max}$ и $p_{\min}$ — амплитуды прямого сигнала, соответствующие максимуму и минимуму интерференционной картины. Они могут отличаться по величине при изменении расположения преобразователей или частоты излучения. Если обе части (4) и (5) на $p_{\max}^2$ и $p_{\min}^2$ соответственно и вычитая из (4), получим

$$V = \frac{1}{4} \left(\frac{\overline{E_{\max}^2}}{p_{\max}^2} - \frac{\overline{E_{\min}^2}}{p_{\min}^2} \right). \quad (6)$$

Интересно отметить, что коэффициент отражения по давлению определяется квадратичной (относительно давления) величиной — средним квадратом ошибающей.

Натурные измерения коэффициента отражения методом интерференции проводились в 1974 г. в открытом океане. Ненаправленный приемник звука, снабженный предварительным усилителем, подвешивался к плавучести и выпускался за борт лежащего в дрейфе судна. Кабель-трос, соединяющий гидрофон с судном, поддерживался на поверхности воды большим числом поплавков. Глубины погружения излучателя и приемника были одинаковыми и составляли 50 м. Выбранная величина угла скольжения луча, зеркально отраженного от средней плоскости поверхности, обеспечивалась подбором расстояния между концевой плавучестью и судном. Слабая направленность излучателя (не менее 40° по уровню 0,7 на высшей рабочей частоте 2000 Гц) позволяла пренебречь разницей в уровнях излучения в прямом и зеркальном направлениях при малых углах скольжения. Азимутальная ориентировка излучателя осуществлялась по направлению на концевую плавучесть. При неизменном расположении преобразователей

частота излучения менялась в диапазоне от 300 до 2000 гц с шагом в 20 гц, что обеспечивало регистрацию изменения уровня принятого сигнала, обусловленного интерференцией прямой и отраженной поверхностью волн, с достаточной степенью подробности.

Огибающая принятого сигнала фиксировалась на ленте регистратора. Длительность записи на каждой частоте была не менее 1,5 минуты, что значительно превосходит характерное время флуктуаций огибающей (которое по порядку величины совпадает с характерным периодом морского волнения и составляет единицы секунд). В процессе обработки вычислялось среднее значение $\bar{E}(t)$ и средний квадрат $\bar{E}^2(t)$ огибающей в пределах каждой записи.

По окончании измерений гидрофон подтягивали на расстояние 50—100 м от излучателя и определяли уровень излучения на каждой частоте, использованной в измерениях. Излучение велось в тонально-импульсном режиме, что давало возможность разделить по времени прямой и отраженный поверхностью сигналы. Затем с учетом сферического расхождения определяли величины p_0 прямого сигнала в точке приема на всех частотах.

К сожалению, работы не сопровождалась волнографическими измерениями. При визуальной оценке характеристик поверхности океана была получена величина 2 балла для степени ветрового волнения. Отмечалось также присутствие зыби. Скорость ветра во время измерений составляла 4,7—5,7 м/с. Слой воды от поверхности до глубины около 70 м был практически изоскоростным, поэтому рефракцию можно было не учитывать.

На рис. 1 приведена частотная зависимость относительной величины $\bar{E}/p_0$, полученная при угле скольжения 6° . На графике хорошо видна периодическая зависимость амплитуды сигнала от частоты, характерная для интерференционной картины. С повышением частоты перепады между максимумами и минимумами уменьшаются, так как все большая доля энергии, переизлученной поверхностью, уходит в нерегулярную, флуктуирующую компоненту, которая не принимает участия в интерференции.

На рис. 2 приведены величины коэффициента отражения, вычисленные согласно (6). Так как при вычислении предполагалась независимость коэффициента отражения от частоты в полосе, равной разности частот соседних экстремумов интерференционной картины, график на рис. 2 имеет вид ступенчатой линии. Приведенные величины следует рассматривать как экспериментальную оценку минимальных значений коэффициента отражения, так как положение преобразователей в процессе измерений нельзя считать строго неизменным. Гидрофон, подвешенный к плавучести, и излучатель вместе с судном совершали вертикальные перемещения, характерное время которых по порядку величины совпадает с характерным периодом волнения. Это вызывает дополнительные флуктуации сигнала, регистрируемого в опыте, что эквивалентно уменьшению его когерентности.

Авторы выражают благодарность И. Б. Андреевой и участникам руководимого ею семинара за дискуссию и полезные советы.

Акустический институт
Москва

Поступило
19 V 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. Б. Андреева, С. Д. Чупров, Отражение и рассеяние звука взволнованной поверхностью океана. В кн. Акустика океана, М., 1974, стр. 335. ² С. I. Beard, IEEE Trans., v. AP-15, 649 (1967).

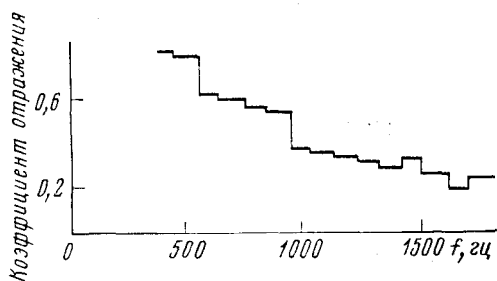


Рис. 2