

О КОРРЕЛЯЦИОННОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ДНА И ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

В. В. Краснобородько

В настоящее время для определения коэффициента отражения звука от дна и поверхности океана наиболее часто используется тонально-импульсное излучение [1]. В тех случаях, когда в точке приема отраженная и прямая волны не разделяются по времени, используют шумовое излучение и корреляционную обработку принятого сигнала. Этот метод определения коэффициента отражения основан на вычислении функции взаимной корреляции принятого сигнала с излученным [2, 3]. Однако измерения можно существенно упростить, если вычислять не функцию, а коэффициент взаимной корреляции, т. е. функцию взаимной корреляции, нормированную на корень квадратный из произведения средних интенсивностей принятого и излученного шумовых сигналов. Как будет показано ниже, в нормировочном множителе содержится дополнительная информация о коэффициенте отражения.

Сущность рассматриваемого метода заключена в следующем. Пусть ненаправленные приемник и излучатель, расположенные на расстоянии R_0 друг от друга, находятся на глубине H_0 от отражающей поверхности. Тогда на приемник после излучения шумовой посылки приходят прямой $f_0(t)$ и отраженный $f_1(t-\tau_1)$ сигналы, где t — текущее время, а τ_1 — разность между временами прихода прямой и отраженной волн. В дальнейшем для краткости сумму этих волн будем называть принятым сигналом.

Коэффициент взаимной корреляции принятого сигнала с излученным имеет вид

$$(1) \quad B(\tau) = \frac{\langle f_0(t-\tau) [f_0(t) + f_1(t-\tau_1)] \rangle}{\{\langle f_0^2(t) \rangle \langle [f_0(t) + f_1(t-\tau_1)]^2 \rangle\}^{1/2}},$$

где $\langle \rangle$ — угловые скобки означают осреднение по длительности посылки, существенно превышающей расширение отраженного импульса вследствие рассеяния на отражающей поверхности. Можно показать [1, 4], что

$$(2) \quad \frac{\langle f_1^2(t) \rangle}{\langle f_0^2(t) \rangle} = \left(\frac{VR_0}{R_1} \right)^2,$$

где V — коэффициент отражения звука, а $R_1 = \sqrt{R_0^2 + (2H_0)^2}$. Подставив (2) в (1), получим

$$(3) \quad B(\tau) = \frac{N_{00}(\tau) + (VR_0/R_1)N_{01}(\tau-\tau_1)}{[1 + 2(VR_0/R_1)N_{01}(\tau_1) + (VR_0/R_1)^2]^{1/2}}.$$

Здесь $N_{00}(\tau) = \langle f_0(t-\tau)f_0(t) \rangle / \langle f_0^2(t) \rangle$ — коэффициент автокорреляции излучаемого шумового сигнала, а $N_{01}(\tau) = \langle f_0(t-\tau)f_1(t) \rangle / [\langle f_0^2(t) \rangle \langle f_1^2(t) \rangle]^{1/2}$ — коэффициент взаимной корреляции отраженного шумового сигнала с излученным. В тех случаях, когда временной интервал корреляции коэффициента $N_{01}(\tau)$ существенно меньше τ_1 , можно считать, что $N_{01}(\tau_1) = 0$ [5]. Тогда коэффициент взаимной корреляции $B(\tau)$ будет иметь два максимума; при $\tau=0$ и $\tau=\tau_1$, значения которых определяются из соотношений

$$(4) \quad \begin{aligned} B(0) &= \frac{R_1}{[R_1^2 + (VR_0)^2]^{1/2}}, \\ B(\tau_1) &= \frac{VR_0 N_{01}(0)}{[R_1^2 + (VR_0)^2]^{1/2}}. \end{aligned}$$

Измерив экспериментально значения $B(0)$ и $B(\tau_1)$ и решив уравнения (4) относительно V , можно найти коэффициент отражения

$$(5) \quad V = \frac{R_1}{R_0} \sqrt{\frac{1}{B^2(0)} - 1}.$$

Кроме того, это позволяет найти и коэффициент взаимной корреляции собственно отраженного сигнала с излученным при нулевом временном сдвиге:

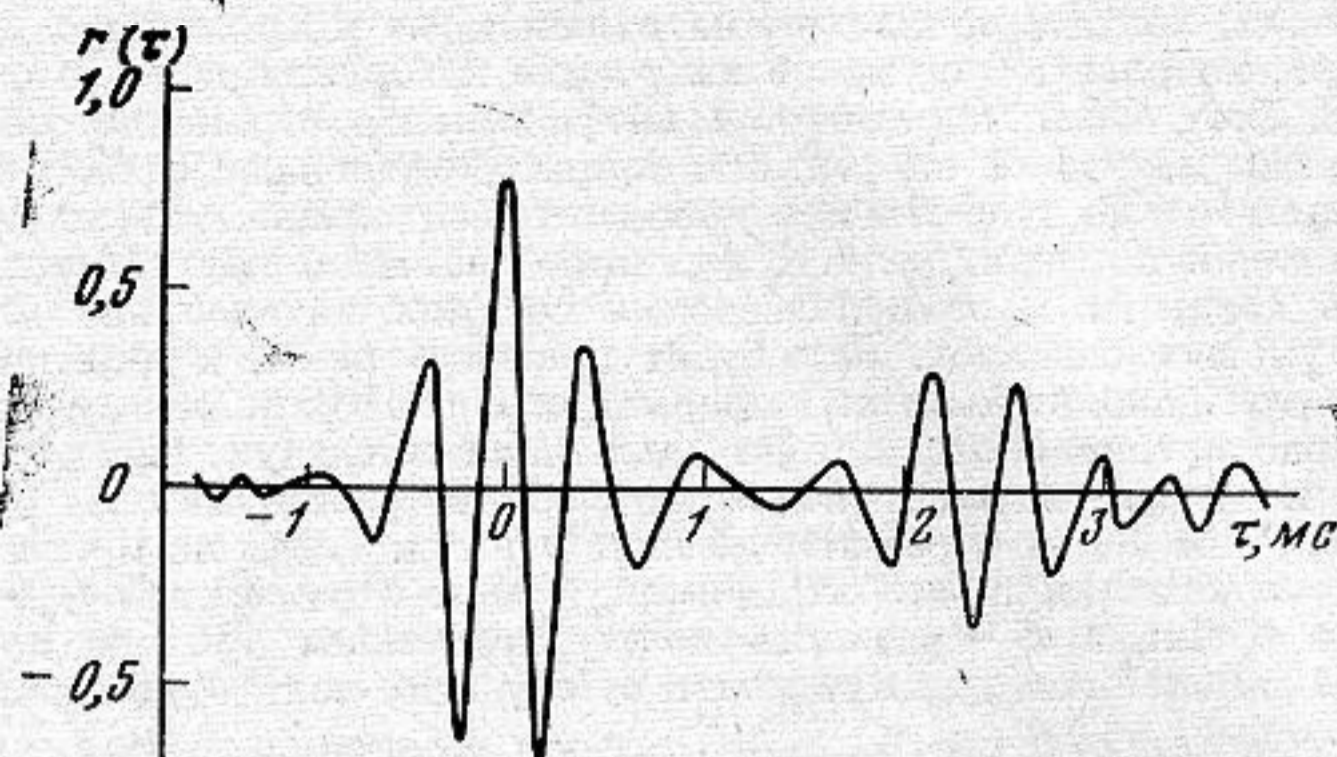
$$(6) \quad N_{01}(0) = \frac{B(\tau_1)}{[1 - B^2(0)]^{1/2}}.$$

Так как $|N_{01}(0)| \leq 1$, то из (4) следует неравенство

$$(7) \quad B^2(0) + B^2(\tau_1) \leq 1,$$

т.е. сумма квадратов максимумов коэффициента взаимной корреляции не должна превышать единицу. Если звук отражается от мягкой границы, то фаза отраженной волны изменяется на π , и, следовательно, $N_{01}(0)$ и $B(\tau_1)$ будут отрицательными. Таким образом, знак $N_{01}(0)$ (или $B(\tau_1)$) указывает на фазу коэффициента отражения V .

Следует, однако, отметить, что полученное выражение (5) справедливо лишь при несущественной зависимости коэффициента отражения от частоты в пределах ширины полосы шума, и, кроме того, когда влиянием водной среды на корреляционные характеристики сигналов можно пренебречь.



Коэффициент взаимной корреляции принятого шумового сигнала с излученным

Для иллюстрации работоспособности рассмотренного корреляционного метода на фигуре представлен коэффициент взаимной корреляции между принятым и излученным шумовыми сигналами при полосе 1600–3200 Гц и угле падения 31° ($R_0/R_1 \approx 0,5$) [2]. Авторами использовался знаковый коррелометр, поэтому измеряемый ими коэффициент корреляции $r(\tau)$ связан с $B(\tau)$ следующим соотношением:

$$(8) \quad r(\tau) = (2/\pi) \arcsin [B(\tau)].$$

Как видно из фигуры, кривая $r(\tau)$ имеет два максимума: при $\tau=0$ и $\tau=2,4$ мс, причем второй максимум отрицателен. Следовательно, коэффициент отражения, определяемый по формуле (5), равен $-0,78$, что удовлетворительно совпадает с результатами измерений, приведенными в работе [2].

Автор благодарит Ю. П. Лысанова за руководство и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воловов В. И., Житковский Ю. Ю. Отражение и рассеяние звука дном океана. В кн. Акустика океана, под ред. Л. М. Бреховских. М., «Наука», 1974, 395–490.
2. Jones J. L., Leslie C. B., Barton L. E. Acoustic Characteristics of Underwater Bottoms. J. Acoust. Soc. America, 1964, 36, 1, 154–157.
3. Serbyn M. R. Experiment design and test plan for the measurement of the surface reflection coefficient. Technical Report 117 february 20, 1974. Applied Hydro-Acoustics Research, Incorporated.
4. Житковский Ю. Ю., Лысанов Ю. П. О некоторых особенностях френелевой дифракции звука на взволнованной поверхности и дне океана. Изв. АН СССР, Физ. атм. и океана, 1969, 5, 9, 982–985.
5. Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П. Корреляция шумовых сигналов при отражении от дна океана. IX Всесоюзная акуст. конференция. М., 1977, 105–108.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила
15 января 1979 г.