

УДК 534.87

РЕВЕРБЕРАЦИЯ МОРЯ ПРИ РАЗНЕСЕННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕ И ПРИЕМНИКЕ

*Н. Г. Гаткин, В. А. Геранин, М. И. Карновский,
Л. Г. Красный, В. Г. Лозовик*

Получены выражения для интенсивности объемной и поверхностной реверберации моря при ненаправленных излучателе и приемнике, разнесенных в пространстве.

Известные [1, 2] выражения интенсивности реверберационной помехи соответствуют случаю, когда координаты излучателя и приемника совпадают. Между тем возможны ситуации, когда излучатель и приемник разнесены на некоторое расстояние L . Ниже вычисляется интенсивность реверберации моря для этого случая при излучении импульса с монохроматическим заполнением; излучатель и приемник предполагаются ненаправленными.

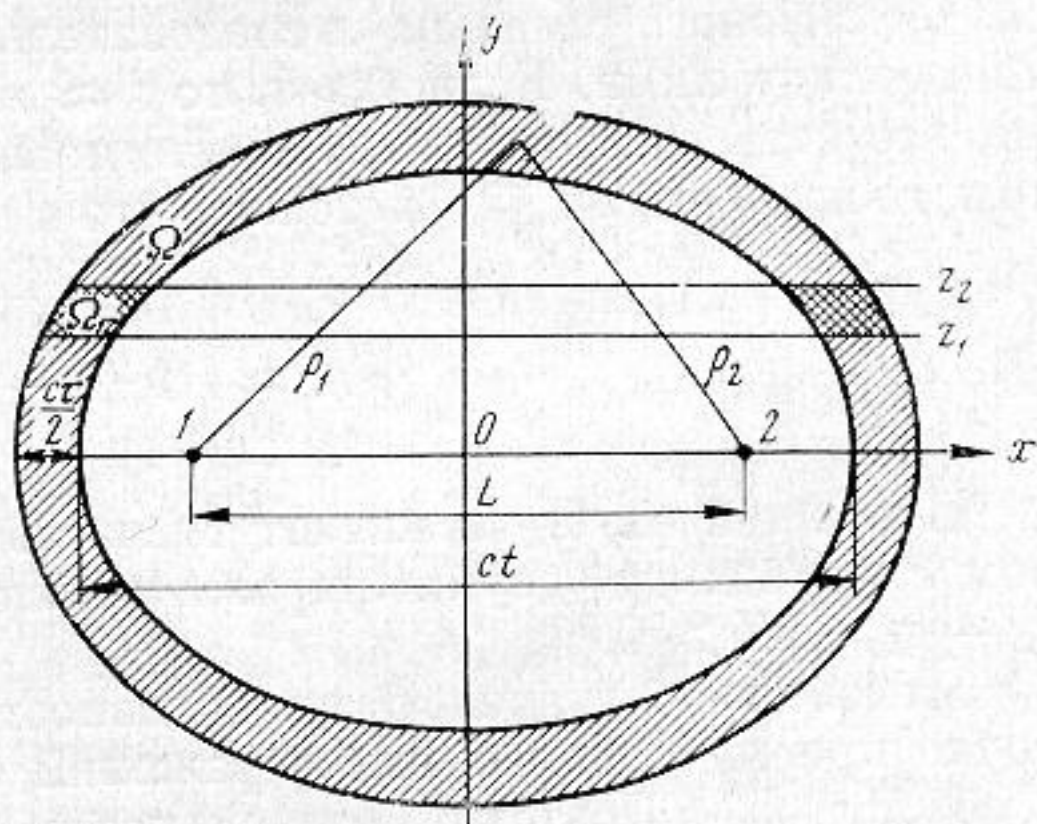
Построим два софокусных эллипса с фокусами в точке излучения и точке приема, один (малый) — с осями ct и $\sqrt{(ct)^2 - L^2}$, другой (большой) — с осями $c(t + \tau)$ и $\sqrt{c^2(t + \tau)^2 - L^2}$, где c — скорость звука, τ — длительность импульса, причем считается, что $t > L/c$. Вращая построенные эллипсы вокруг фокальной оси, мы получим два эллипсоида вращения, и ограниченную ими область обозначим через Ω (см. фигуру), где 1 — излучатель, 2 — приемник.

Мгновенное значение (в момент времени t) интенсивности объемной реверберации I в точке приема равно сумме отражений от рассеивателей, локализованных в области Ω , что приводит к следующему выражению для I :

$$I = \frac{Pk_v}{(4\pi)^2} \int \int \int_{\Omega} \frac{e^{-2\beta(\rho_1 + \rho_2)}}{\rho_1^2 \rho_2^2} dv. \quad (1)$$

Здесь P — излучаемая мощность, k_v — коэффициент объемного рассеяния, β — коэффициент пространственного затухания, а ρ_1 и ρ_2 — фокальные радиусы точки, пробегающей область Ω (см. фигуру).

При $t \gg L/c$, т. е. спустя длительное время после начала излучения, эксцентриситеты эллипсов становятся столь малыми, что эллипсы практически можно заменить окружностями и считать, что область Ω ограничена двумя концентрическими сферами. Тогда в формуле (1) можно бу-



дет положить $\rho_1 = \rho_2$. При этом мы придем к известному выражению для интенсивности I_0 объемной реверберации при условии, что координаты излучателя и приемника совпадают:

$$I_0 = \frac{Pk_v}{4\pi} \int_r^{r+\Delta r} \frac{e^{-4\beta x}}{x^2} dx, \quad (2)$$

где $r = ct/2$, $\Delta r = c\tau/2$.

В общем случае ($t > L/c$) формулу (1) можно привести к виду:

$$I = \frac{Pk_v}{4\pi r^n} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^{2n}}{2n+1} \int_1^{1+(\tau/t)} \frac{e^{-4\beta r\rho}}{\rho^{2n+2}} d\rho =$$

$$= \frac{\beta Pk_v}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2\beta L)^{2n}}{2n+1} \{\Gamma[-(2n+1), 4\beta r] - \Gamma[-(2n+1), 4\beta(r+\Delta r)]\}, \quad (3)$$

где

$$\varepsilon = L/ct \quad (4)$$

— эксцентриситет малого эллипса, а $\Gamma(a, x) = \int_x^{\infty} t^{a-1} \cdot e^{-t} dt$, $x > 0$ —

неполная гамма-функция, или к такому виду:

$$I = \left(1 + \frac{1}{3}\varepsilon^2 + \delta\right) \cdot I_0, \quad (5)$$

где $\varepsilon = L/c(t + v\tau)$, $0 \leq v = v(t, \tau, \beta) \leq 1$, а δ оценивается так:

$$0 < \delta < \frac{1}{5} \cdot \frac{\varepsilon^4}{1 - \varepsilon^2}. \quad (6)$$

Параметр ε можно истолковать как эксцентриситет некоторого эллипса, софокусного с малым, а следовательно и с большим эллипсом, и лежащим между ними. Если $t \gg \tau$, то $\varepsilon \approx \varepsilon$. Если, кроме того, ε столь мало, что его четвертой степенью можно пренебречь по сравнению с его квадратом, то из формулы (5) вытекает, что

$$I \approx \left(1 + \frac{1}{3}\varepsilon^2\right) I_0. \quad (7)$$

Пусть теперь Ω_{12} означает ту часть области Ω , которая лежит в тонком слое между двумя параллельными плоскостями: $z = z_1$ и $z = z_2$; $z_2 - z_1 = H > 0$.

Мгновенное значение интенсивности поверхностной реверберации в точке приема равно сумме отражений от рассеивателей, локализованных в области Ω_{12} . Поэтому интенсивность поверхностной реверберации определяется выражением:

$$I(z_1, z_2) = \frac{Pk_v}{(4\pi)^2} \int \int \int_{\Omega_{12}} \frac{e^{-2\beta(\rho_1 + \rho_2)}}{\rho_1^2 \rho_2^2} dv. \quad (8)$$

Если, например,

$$0 \leq z_1 < z_2 \leq \frac{1}{2} \sqrt{(ct)^2 - L^2},$$

$$I(z_1, z_2) = \frac{Pk_v}{8r\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \varepsilon^{2n} \sum_{m=0}^n (-1)^m \cdot (m^n) \times \\ \times \frac{z_2^{2m+1} - z_1^{2m+1}}{2m+1} \cdot \int_1^{1+(\tau/t)} \frac{e^{-4\beta r \rho} d\rho}{\rho^{2n+2} (\rho^2 - \varepsilon^2)^{m+1/2}}, \quad (9)$$

где $(-1)!! = 1$.

Несущественно изменив детали вычислений, можно найти $I(z_1, z_2)$ при других расположениях секущих плоскостей.

Обозначим через I_s значение $I(z_1, z_2)$ для случая, когда излучатель и приемник совмещены (т. е. при $\varepsilon = 0$); при этом мы возвратимся к известному выражению для интенсивности поверхностной реверберации:

$$I_s = \frac{Pk_v H}{8\pi} \int_r^{r+\Delta r} \frac{e^{-4\beta x}}{x^3} dx. \quad (10)$$

Из (9) вытекает, что

$$I(z_1, z_2) = \left\{ 1 + \left[\frac{1}{\left(1 + v_1 \frac{\tau}{t}\right)^2} - \frac{z_1^2 + z_1 z_2 + z_2^2}{6r^2 \left(1 + v_2 \frac{\tau}{t}\right)^4} \right] \varepsilon^2 + 0(\varepsilon^4) \right\} \cdot I_s, \quad (11)$$

где $0 \leq v_1 = v_1(t, \tau, \beta) \leq 1$, $0 \leq v_2 = v_2(t, \tau, \beta) \leq 1$.

Если $t \gg \tau$, то выражение (11) приводит к следующей приближенной формуле:

$$I(z_1, z_2) \approx \left[1 + \left(1 - \frac{z_1^2 + z_1 z_2 + z_2^2}{6r^2} \right) \varepsilon^2 \right] \cdot I_s. \quad (12)$$

Следует отметить, что, согласно формулам (11) — (12), интенсивность поверхностной реверберации при разнесенных излучателе и приемнике, зависит не только от толщины отражающего слоя H , как в случае $L = 0$ (см. (10)), но и от величин z_1 и z_2 .

При малом z_2/r (а следовательно, и малом z_1/r) выражение (11) приводится к виду

$$I(z_1, z_2) \approx (1 + \varepsilon^2) I_s. \quad (13)$$

Здесь правая часть зависит не от z_1 и z_2 в отдельности, а лишь от их разности $z_2 - z_1 = H$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Сухаревский. Теория реверберации моря, обусловленная рассеянием звука. Докл. АН СССР, 1947, 55, 9, 825—828.
2. Ю. М. Сухаревский. Реверберация моря при наличии поглощения звука. Докл. АН СССР, 1947, 58, 2, 229—232.

Киевский политехнический институт

Поступила в редакцию
15 октября 1968 г.