

УДК 534.231.1,621.391

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ПРИ ПРИЕМЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Гиндлер И. В., Кравцов Ю. А., Петников В. Г.

Исследовано ухудшение помехоустойчивости корреляционного приема широкополосных сигналов из-за дисперсионных свойств среды распространения. Для модели многомодового акустического волновода с поглощающей границей показано, что из-за внутримодовой и межмодовой дисперсии отличие выходных эффектов оптимального и корреляционного приемников может достигать существенных величин.

В [1] решена задача ухудшения отношения сигнал/шум на выходе квадратурного корреляционного приемника за счет линейных искажений принимаемого сигнала. В данной работе исследуется влияние дисперсионных свойств канала распространения сигнала. Для среды с функцией Грина $G(\omega, r)$ отношение сигнал/шум на выходе квадратурного приемника равно [1]:

$$q_0(r) = \frac{2}{N_0} \frac{\left| \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S^2(\omega) G'(\omega, r) d\omega \right|^2}{\frac{1}{\pi} \int_0^\infty S^2(\omega) d\omega}, \quad (1)$$

где $S(i\omega)$ — спектр сигнала, излученного в канале координат, $S^2(\omega) = |S(i\omega)|^2$, $G'(\omega, r)$ — функция Грина, из фазового множителя которой вычтено линейное по частоте слагаемое (которое не влияет на пиковое отношение сигнал/шум на выходе приемника).

Если $G'(\omega, r)$ не зависит от частоты, из (1) следует известная формула для свободного пространства:

$$q_0(r) = \frac{2E_0}{N_0} |G(r)|^2, \quad E_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S^2(\omega) d\omega$$

— энергия сигнала.

Для сигналов с большими базами $\Delta T \Delta F \gg 1$ спектральную плотность мощности сигнала можно считать равномерной в полосе $\Pi = \left(\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right)$. Тогда из (1) следует

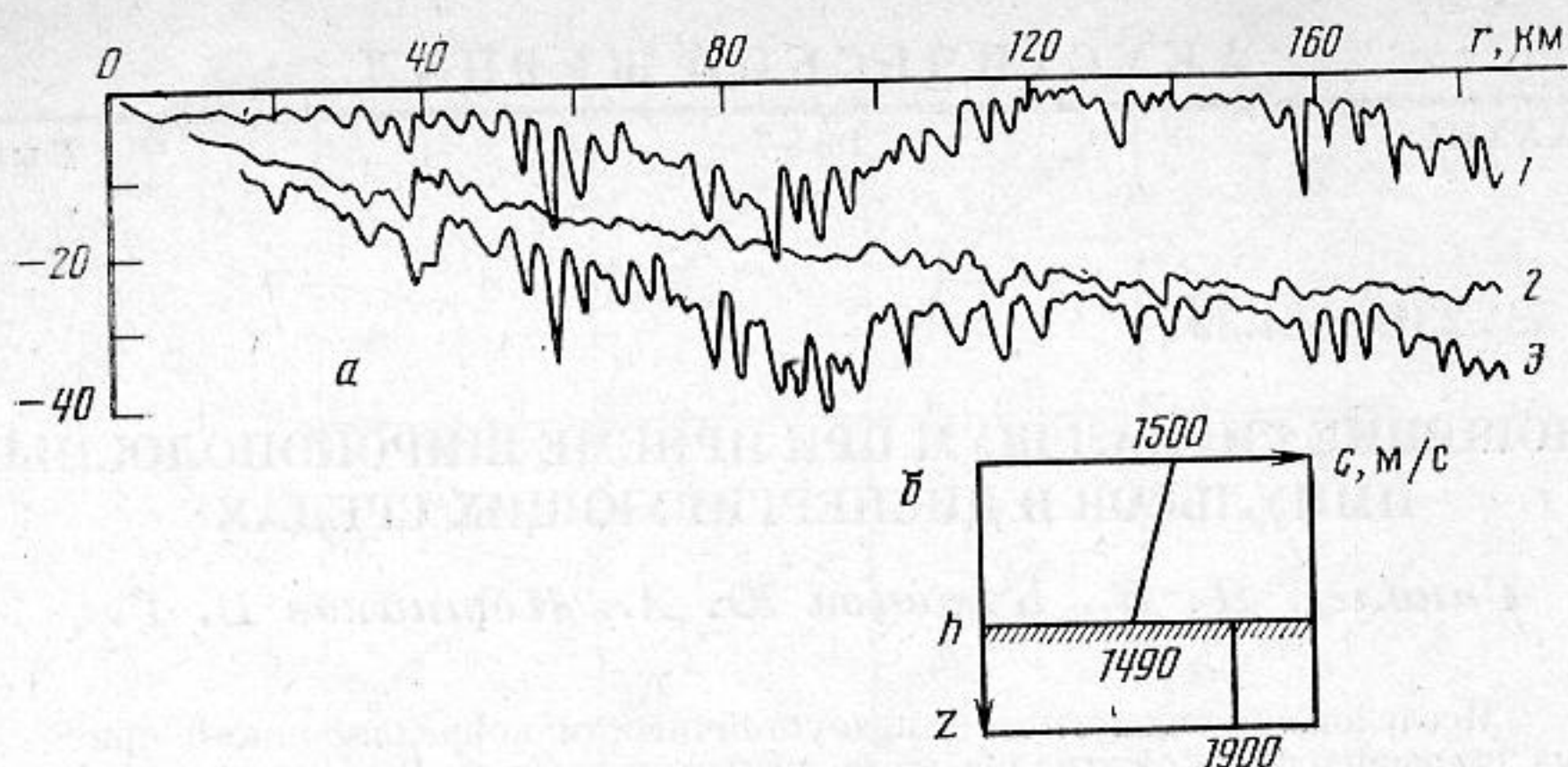
$$q_0(r) = \frac{2E_0}{N_0} \left| \frac{1}{\Delta\omega} \int_\Pi G'(\omega, r) d\omega \right|^2 = \frac{2E_0}{N_0} \alpha(r), \quad (2)$$

где $\alpha(r) = |\langle G'(\omega, r) \rangle_{\Delta\omega}|^2$ — коэффициент, учитывающий ухудшение отношения сигнал/шум в канале распространения с дисперсией.

Используя неравенство Буняковского — Шварца, из (2) получаем

$$q_0(r) \leq \frac{2E_0}{N_0} \langle |G'(\omega, r)|^2 \rangle_{\Delta\omega} = \frac{2E_0}{N_0} \beta(r) = q_{0 \max}. \quad (3)$$

Величина $q_{0 \max}$ является предельным значением отношения сигнал/шум для заданного канала с использованием сложного сигнала с полосой $\Delta\omega$



Отношение сигнал/шум на выходе оптимальной и корреляционной систем обработки сигнала. *a* — результаты расчета величин: 1 — $\gamma(r)$, 2 — $\beta(r)$, 3 — $\alpha(r)$; *b* — профиль скорости звука

в поле изотропного гауссовского шума. Для акустического волновода, например,

$$|G(\omega, r)|^2 = \sum_n a_n^2 \psi_n^2(z) \psi_n^2(z_s) + \sum_{n \neq m} a_n a_m \psi_n(z) \times \times \psi_m(z) \psi_n(z_s) \psi_m(z_s) \cos(\Delta k_{nm} r), \quad (4)$$

где первое слагаемое описывает средний уровень поля (регулярная составляющая $\Psi(\omega, r)$), второе — осцилляции от среднего уровня. При подстановке (4) в (3) вклад в интеграл от второго слагаемого в (4) пренебрежимо мал, что дает

$$q_{0 \max}(r) = \frac{2E_0}{N_0} \langle \Psi(\omega, r) \rangle_{\Delta\omega}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что оптимальный приемник многомодового сигнала должен обеспечивать когерентное сложение сигналов каждой моды. Если приемник реализован без учета многомодовости, ухудшение отношения сигнал/шум в последнем случае можно охарактеризовать коэффициентом $\gamma(r) = \alpha(r)/\beta(r) \leq 1$.

На фигуре показаны результаты численного расчета величин $10 \lg \alpha(r)/\alpha(1 \text{ км})$, $10 \lg \beta(r)/\beta(1 \text{ км})$, $10 \lg \gamma(r)$ для модели акустического волновода с параметрами $k_0 h = 188$; $\Delta\omega/\omega_0 = 0,05$; $\text{Im } k_2^2 = 10^{-2} \text{ Re } k_2^2$; $\rho_2/\rho_1 = 1,7$; $z = z_s = h/2$.

Для данной модели уже на небольших расстояниях за счет межмодовой дисперсии отношение сигнал/шум заметно ухудшается (во временной области этому соответствует разделение корреляционных откликов каждой моды). При увеличении расстояния за счет взаимодействия волн с поглощающим дном высшие моды «вымирают», основной вклад в поле дает только первая мода и приемник приближается к оптимальному. На расстояниях более 100 км начинает проявляться внутримодовая дисперсия, что приводит к разрушению корреляционного отклика.

Предельное отношение сигнал/шум $q_{0 \max}$ для сигнала с полосой $\Delta\omega$ не является максимально возможным для заданного дисперсионного канала распространения. При использовании оптимальных (согласованных со средой распространения) сигналов со спектром $S(i\omega, r) = A_0 G^*(\omega, r)$, $A_0 = \text{const}$, r_f — точка фокусировки, отношение сигнал/шум на выходе приемника, реализованного в виде широкополосного фильтра, равно

$$q_{0 \text{ opt}}(r_f) = \frac{2}{N_0} \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S^2(\omega, r_f) d\omega = \frac{2A_0^2}{N_0} \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |G(\omega, r_f)|^2 d\omega.$$

Обозначим через $\varepsilon(r) = q_{0 \text{ opt}}(r) / q_{0 \text{ max}}(r)$ выигрыш при использовании оптимальных сигналов.

В классе сигналов с различной полосой, но одинаковой энергией E_0

$$\varepsilon(r) |_{E_0 = \text{const}} = \langle |G(\omega, r)|^2 \rangle_{\Delta\omega}^{-1} = \beta^{-1}(r).$$

В классе сигналов с различной полосой, но одинаковой пиковой мощностью P_0

$$\varepsilon(r) |_{P_0 = \text{const}} = \frac{\int_0^{\infty} |G(\omega, r)|^2 d\omega}{\int_{\Pi} |G(\omega, r)|^2 d\omega} \approx \frac{\Omega}{\Delta\omega},$$

где Ω — полоса пропускания канала распространения.

Достаточно большой выигрыш $\Omega/\Delta\omega$ существенно зависит от флуктуаций в среде распространения и когерентности источника. Если полоса когерентности источника $\Delta W \gg \Delta\omega$, Ω , W , где W — полоса когерентности канала, то выигрыш от использования оптимальных сигналов будет иметь порядок $W/\Delta\omega$.

Авторы благодарны Л. Г. Кулапину за проведение численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиндлер И. В., Петников В. Г. Квазиоптимальный прием сложных гидроакустических сигналов: Препринт № 16. М.: ИОФ АН СССР, 1986. 41 с.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30.VII.1986

