Анализ искажающего влияния гидроакустическеого канала при дистанционном зондировании морского дна с использованием сигналов с линейной частотной модуляцией

Назаров Л.Е., Смольянинов И.В.
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г.Фрязино, Россия

Цель работы - оценивание вероятностных характеристик обнаружения для сигналов с линейным частотно-модулированным заполнением (ЛЧМ) с учетом искажений их комплексных огибающих при распространении по гидроакустическим каналам и сравнительный анализ вероятностных характеристик обнаружения сигналов с искажениями и без искажений при наличии теплового аддитивного канального шума (АБГШ).

Для ЛЧМ сигналов длительностью T мгновенная частота $f(t)$ определяется как

$$f(t) = f_0 + \beta t\,,\ -T/2 \le t \le T/2\,,$$

где $\beta = 4\pi f_{\text{д}}/T$ - скорость линейного изменения частоты; $f_{\text{д}}$ - девиация частоты, определяющая спектр сигнала $\Delta F = 2 f_{\text{д}}$.

Сформированные ЛЧМ сигналы $s(t)$ с амплитудой A на входе канала задаются как

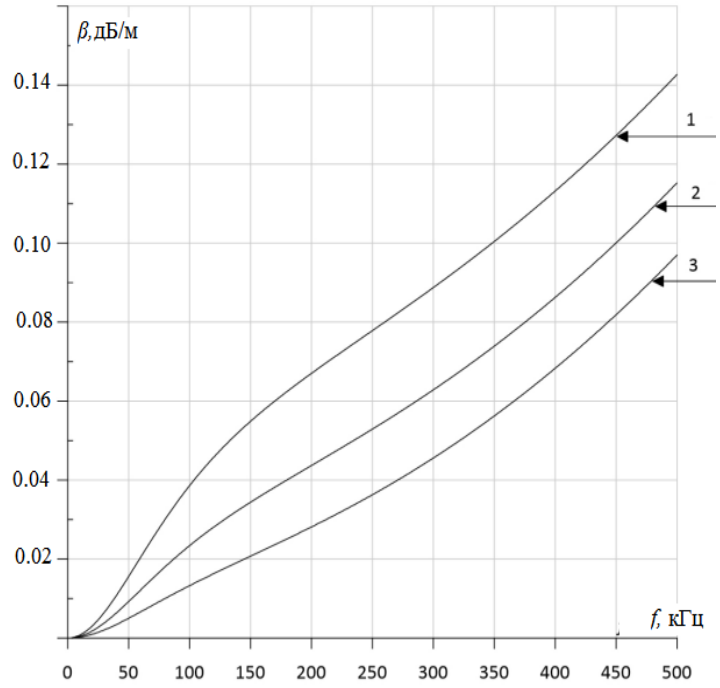
$$s(t) = A\cos(2\pi f_0 t + \pi m t^2/T^2),\ -T/2 \le t \le T/2,\ m = 2 f_{\text{д}} T.$$

Известны эмпирические соотношения, которые определяют модель гидроакустических каналов с затуханием сигналов. Наиболее известное соотношение, определяющее зависимость коэффициента затухания β (дБ/м) от частоты f (Гц) в диапазоне 3...500 кГц, имеет вид (формула Марша и Шулькина):

$$\beta = 8.686\cdot 10^{-9}\left(\frac{SAf_t f^2}{f_t^2 + f^2} + \frac{Bf^2}{f_t}\right)(1 - 6.54\cdot 10^{-4} p)\,,$$

здесь $f_t = 21.9\cdot 10^{9-1520/(T+273)}$ - релаксационная частота (Гц); T - температура (°C); S - соленость ‰ (промилле); p - давление (атм); значения параметров $A = 2.34$, $B = 3.38$; затухание амплитуды сигналов A при распространении по каналу длиной z (м) определяется коэффициентом $10^{-\beta z/20}$. В этой формуле первый член суммы описывает зависимость от релаксации соли магния $MgSO_4$, второй член в сумме обусловлен вязким поглощением. Второй сомножитель обусловлен влиянием гидростатического давления p.

На рисунке приведены вычисленные зависимости значения коэффициента затухания β от параметров частоты f, солености S и температуры T.



Зависимость коэффициента затухания β от частоты: 1 – $S = 35$ ‰; 2 - $S = 20$‰; 3 – $S = 10$‰.

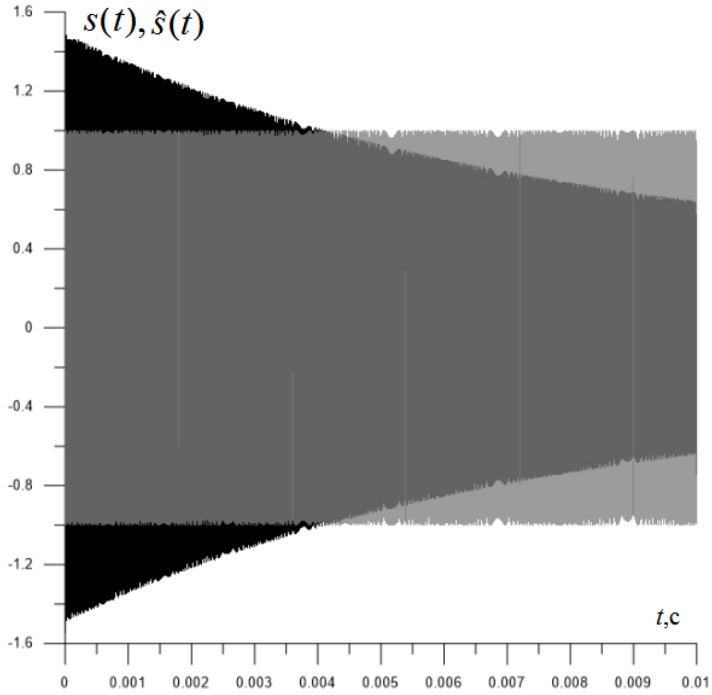
Наиболее информативный метод описаний сигналов с искажениями $\hat{s}(z,t)$ при распространении основан на использовании комплексного коэффициента передачи $\dot{H}(z, f)$

$$\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f)\dot{H}(z, f)\exp\left(j2\pi ft\right)df ,$$

$\dot{S}(f)$ - спектр исходного сигнала $s(t)$; в соответствии с (5) коэффициент передачи определяется соотношением $\dot{H}(z, f) = 10^{-2\beta(f)z/20}$; z - длина канала распространения сигналов в прямом направлении (коэффициент 2 при вычислении $\dot{H}(z, f)$ обусловлен распространением локационных сигналов в прямом и обратном направлениях).

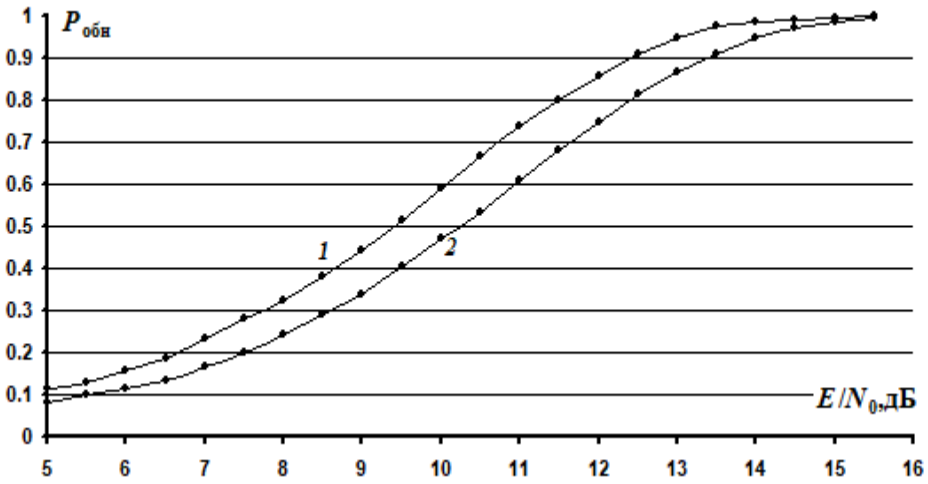
При моделировании алгоритма обнаружения задавались параметры ЛЧМ сигналов и канала: несущая частота $f = 100$ кГц, длительность сигналов 0.01 сек, частотная полоса ΔF до 60 кГц, соленость S до 45‰, температура воды $T = 10$°C.

На рисунке приведен вид искаженного $\hat{s}(t)$ (черный) и без искажений $s(t)$ (серый) ЛЧМ сигнала (частотная полоса $\Delta F = 60$ кГц, соленость $S = 45$‰, амплитуда сигнала $s(t)$ $A = 1$, длина канала $z = 250$ м). Видно искажение огибающей сигнала $\hat{s}(t)$ при распространении относительно постоянной огибающей $s(t)$ (энергии сигналов равны).

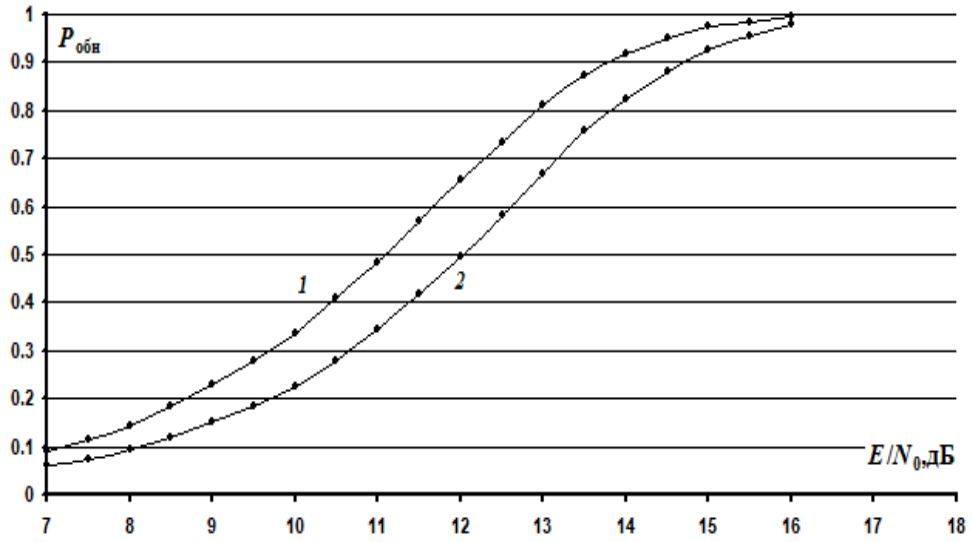


Вид искаженного $\hat{s}(t)$ (черный) и неискаженного $s(t)$ (серый) ЛЧМ сигнала.

На рисунках ниже приведены вычисленные зависимости вероятностей обнаружения $P_{\text{обн}}$ от значений сигнал/шум E/N_0 для когерентного и некогерентного приема ЛЧМ сигналов. Кривые 1 соответствуют обнаружению при передаче по идеальному каналу и наличию АБГШ, вероятность правильного обнаружения $P_{\text{обн}} = 0.5$ достигается при отношении сигнал/шум E/N_0 9.5 и 11.0 дБ соответственно. Вероятностные кривые 2 на рисунках вычислены для искаженного ЛЧМ сигнала. В этом случае вероятность правильного обнаружения $P_{\text{обн}} = 0.5$ достигается при отношении E/N_0 10.35 и 12.0 дБ соответственно, то есть энергетические проигрыши ΔE достигают 0.85 дБ и 1.0 дБ.



Вероятностные характеристики когерентного обнаружения ЛЧМ сигнала: 1 - передача по идеальному АБГШ каналу; 2 - передача по гидроакустическому каналу.



Вероятностные характеристики некогерентного обнаружения ЛЧМ сигнала: 1 - передача по идеальному АБГШ каналу; 2 - передача по гидроакустическому каналу.

Заключение

Путем моделирования процедуры когерентного и некогерентного обнаружения Неймана-Пирсона (вероятность ошибки 2-го рода $P_{\text{лтр}} = 10^{-3}$) показано наличие энергетических потерь до 0.85 дБ и до 1.0 дБ соответственно для ЛЧМ сигналов с частотной полосой 60 кГц, несущей частоты 100 кГц и солености 45‰. Полученные значения энергетических проигрышей необходимо учитывать при оценке точности измерения параметров, например, фаз или разности фаз гидроакустических интерферометрических систем.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!