

Н.В Ильин, И.И Орлов

О ВЛИЯНИИ ДИСПЕРСИИ ПОТЕРЬ НА ФОРМУ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В ПОДВОДНОМ АКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Рассматриваются искажения формы узкополосных импульсных сигналов при распространении в подводном акустическом канале. Показано, что искажение их формы в основном сводится к появлению дополнительного вклада в квадратурные составляющие. Его амплитуда связана как с формой излученного сигнала, так и с параметрами канала – с частотной зависимостью затухания. В подводном акустическом канале дополнительный вклад, появляющийся за счет дисперсии, измерим практически во всех диапазонах частот. Приведены оценки величины искажения в зависимости от дальности и частоты для морской воды.

Для получения наиболее полной информации о канале, через который проходит сигнал, следует обеспечить регистрацию формы сигнала, так как именно в ней и содержатся все те изменения, которые он «приобрел» в акустическом канале. Изменение формы сигнала обычно называют дисперсионными искажениями. В подводном акустическом канале фазовая дисперсия (зависимость скорости звука от частоты) практически отсутствует, но зато ярко выражена дисперсия затухания. При рассмотрении узкополосных сигналов обычно используется так называемое «квазимонохроматическое приближение», которое сводится к тому, что дисперсией просто пренебрегается. Это приближение основано на предположении о том, что если в полосе сигнала передаточная функция канала слабо зависит от частоты, то сигнал не изменяет своей формы. В данной статье мы рассматриваем влияние частотной зависимости модуля передаточной функции в полосе сигнала на его форму.

Прежде чем говорить об изменении формы, нужно определить, что мы, собственно, понимаем под формой сигнала. Сигналы, используемые в подводной акустике, волноводной технике и т.д., рассматриваемые как функции времени, как правило, имеют специальный вид. Часто они являются высокочастотными колебаниями с медленно изменяющимися характеристиками, к которым обычно относят амплитуду и фазу (либо частоту). И именно эти медленно изменяющиеся параметры сигнала являются информационными, т.е. используются для передачи информации.

Если спектральная полоса сигнала мала по сравнению с частотой заполнения, это соответствует тому, что скорость изменения информационных параметров мала по сравнению со скоростью изменения сигнала как функции времени (с несущей частотой). Такие сигналы принято называть узкополосными.

Известно, что для описания таких сигналов общего вида достаточно задать две «медленно изменяющиеся» вещественнозначные функции [1], например, амплитуду и фазу. В данной статье, мы будем систематически придерживаться описания сигналов с помощью квадратурных компонент, что для узкополосных сигналов, точнее, сигналов с финитным спектром, эквивалентно аналитическому сигналу [3], однако в качестве первичных понятий здесь выступают не огибающая и фаза, а вещественные квадратурные компоненты.

Таким образом, сигнал в нашем описании характеризуется двумя «медленными» квадратурными компонентами, модулирующими косинус и синус несущей частоты

$$f(t) = a(t) \cos \omega_0 t + b(t) \sin \omega_0 t. \quad (1)$$

Любой линейный стационарный волновой канал в самом общем случае может быть описан с помощью его импульсной характеристики, т.е. отклика на δ -импульс. При этом прохождение сигнала через такой канал описывается интегралом Дюамеля

$$u_p(t) = \int_{-\infty}^t h(t - \tau) u(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Здесь $h(\tau)$ – импульсный отклик; $u(t)$ – сигнал на входе канала, а $u_p(t)$ – на выходе. Импульсный отклик является функцией Грина системы, а его Фурье–образ как отклик на монохроматический сигнал является передаточной функцией (ПФ) системы.

Для стационарного канала спектр отраженного сигнала связан со спектром зондирующего сигнала следующим образом:

$$U_p(\omega) = H(\omega) U(\omega) . \quad (3)$$

Представим как зондирующий, так и отраженный сигналы в виде суммы квадратурных компонент (составляющих). В качестве зондирующего сигнала рассмотрим узкополосный амплитудно-модулированный импульс (АМ) (общий случай – сумма двух таких сигналов со сдвинутой на $\pi/2$ фазой). Для амплитудно-модулированного сигнала амплитуды $a(t)$ и $b(t)$ в (1) будут пропорциональны друг другу (это свойство именно АМ-сигналов), и выбором фазы одна из квадратур может быть обращена в нуль. Поэтому зондирующий импульс выберем в форме

$$U(t) = a(t) \cos (\omega_0 t) , \quad (4)$$

опустив начальную фазу. Здесь ω_0 – несущая частота; $a(t)$ – амплитуда, медленно меняющаяся функция времени, спектр которой $A(\omega)$ сосредоточен вблизи нуля. Спектр зондирующего сигнала в этом случае имеет вид

$$U(\omega) = 1/2 [A(\omega - \omega_0) + A(\omega + \omega_0)] \quad (5)$$

и сосредоточен вблизи частот $\pm \omega_0$.

Применяя к (2) обратное преобразование Фурье для отраженного сигнала как функции времени, используя (5), получаем

$$\begin{aligned} u_p(t) &= 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i \omega t) H(\omega) [A(\omega - \omega_0) + A(\omega + \omega_0)] d\omega = \\ &= 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i \omega t) A(\omega) [\exp(-i \omega_0 t) H(\omega + \omega_0) + \exp(i \omega_0 t) H(\omega - \omega_0)] d\omega . \end{aligned} \quad (6)$$

Представим ПФ в экспоненциальном виде: $H(\omega) = \exp(-\mu(\omega) + i\varphi(\omega))$ и, учитывая условия сопряжения $H(-\omega) = H^*(\omega)$, которые следуют из вещественности импульсного отклика и свойств преобразования Фурье, приведем (6) к виду

$$\begin{aligned} u_p(t) &= 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i \chi t) A(\chi) \{ \exp[(-i \omega_0 t) - i \varphi(\omega_0 + \chi) - \\ &- \mu(\omega_0 + \chi)] + \exp[i \omega_0 t + i \varphi(\omega_0 - \chi) - \mu(\omega_0 - \chi)] \} d\chi . \end{aligned} \quad (7)$$

В этой форме интегрирование по частоте ведется по спектральной полосе амплитуды зондирующего импульса и χ , фактически, – отклонение частоты от несущей; другими словами, $\chi \ll \omega_0$ для узкополосного сигнала. Запишем отраженный сигнал в виде суммы квадратурных компонент, но учтем, что отраженный сигнал имеет время запаздывания, и выделим его явно. В результате получим

$$u_p(t) = a_1(t) \cos (\omega_0 t - \varphi_0) + b_1(t) \sin (\omega_0 t - \varphi_0) . \quad (8)$$

Здесь φ_0 – фаза ПФ на несущей частоте, а для a_1 , b_1 из (7) получаем точные формулы, выражающие их через спектр амплитуды зондирующего импульса:

$$a_1(t) = 1/2 \int \exp[-i\chi(t-\tau)] A(\chi) [\exp[-\mu(\omega_0 + \chi) - i\varphi_+(\chi)] + \exp[-\mu(\omega_0 - \chi) + i\varphi_-(\chi)]] d\chi ;$$

$$b_1(t) = 1/2 i \int \exp[-i\chi(t-\tau)] A(\chi) \{[\exp[-\mu(\omega_0 + \chi) - i\varphi_+(\chi)] - \exp[-\mu(\omega_0 - \chi) + i\varphi_-(\chi)]]\} d\chi .$$

Здесь групповое запаздывание $\tau = d\varphi(\omega_0)/d\omega_0$, $\varphi_{\pm}(\chi) = \Phi(\omega_0 \pm \chi) - \Phi(\omega_0) \pm \chi\tau$, остаток от фазы ПФ после вычитания константного и линейного по χ членов. Обозначив выражения в квадратных скобках через Z и V , перепишем предыдущую формулу более компактно:

$$a_1(t) = 1/2 \int \exp[-i\chi(t-\tau)] A(\chi) Z(\chi) d\chi ; \quad (9)$$

$$b_1(t) = 1/2 \int \exp[-i\chi(t-\tau)] A(\chi) V(\chi) d\chi . \quad (9 a)$$

При отсутствии дисперсии, когда нет никаких искажений, а есть только сдвиг по времени и по фазе, $V = 0$, а $Z = 1$. Искажения появляются при $Z \neq \text{const}$ и $V \neq 0$. Имея явные выражения для Z и V , проанализируем, какие факторы играют роль и как они ведут себя в зависимости от ширины полосы сигнала. Воспользуемся тем, что рассматриваются малые искажения узкополосного сигнала, и разложим Z и V по χ , оставляя только низшие степени χ . Получаемые выражения имеют вид

$$Z(\chi) = \exp(-\mu_0) (1 - i\gamma \varphi'' \chi^3/2^2) ; \quad (10)$$

$$V(\chi) = \exp(-\mu_0) (i\gamma \chi - \varphi'' \chi^2/2^2) , \quad (10 a)$$

где

$$\gamma = \left. \frac{d\mu(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} ; \quad \varphi'' = \left. \frac{d^2\varphi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} ; \quad \mu_0 = \mu(\omega_0).$$

Величина γ имеет размерность времени. Являясь производной мнимой части фазы ПФ, тем самым является мнимой частью групповой задержки и определяет наклон амплитудно-частотной характеристики канала (АЧХ). Величина φ'' – первый член в разложении $\varphi_{\pm}(\chi)$, фактически вторая производная фазы ПФ в точке ω_0 . Если γ и φ'' равны нулю, то $b_1 = 0$, и $a_1 = e^{-\mu_0} a(t-\tau)$, т.е. прошедший сигнал представляет собой точную копию излученного, задержанную на время τ и ослабленную в $e^{-\mu_0}$ раз. Если эти величины не равны нулю, но малы по величине, то синфазная компонента (9) приобретает добавку, пропорциональную третьей степени ширины полосы. Поскольку область интегрирования в (9), (9 a) определяется $A(\omega)$, т.е. шириной полосы зондирующего сигнала, а добавочный член в Z имеет зависимость χ^3 , постольку можно приближенно считать, что эта добавка с уменьшением ширины полосы убывает как куб ширины полосы. Пренебрегая степенями χ выше первой, для квадратурных компонент сигнала, прошедшего канал, получаем явные выражения

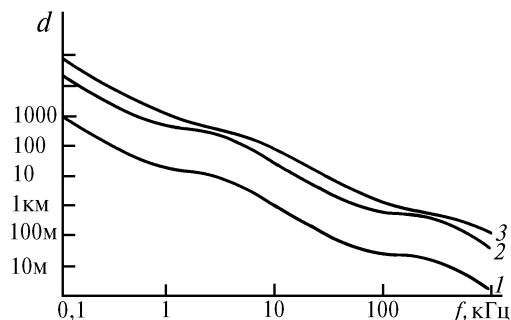
$$a_1(t) = e^{-\mu_0} a(t-\tau) ; \quad (11)$$

$$b_1(t) = e^{-\mu_0} \gamma da(t-\tau) / dt. \quad (11 a)$$

Таким образом, для узкополосного сигнала в случае малых искажений основное искажение его формы связано с появлением дополнительной квадратурной компоненты. Появление второй квадратурной компоненты означает появление дополнительной фазовой модуляции в сигнале. Для визуализации фазовой модуляции можно воспользоваться фазовой диаграммой.

Определим фазовую диаграмму следующим образом. В прямоугольных координатах по одной оси будем откладывать $a_1(t)$, а по другой – величину $b_1(t)$. Время при этом играет роль параметра, соответствующего параметрическому описанию получаемой кривой. Амплитудно-модулированный импульс на фазовой диаграмме будет иметь вид отрезка прямой, проходящей через начало координат. Наличие дополнительной квадратурной составляющей, не пропорциональной первой компоненте, приводит к тому, что фазовая диаграмма сигнала принимает вид замкнутой петли. Форма петли зависит от того, какое из слагаемых в (10 а) преобладает и какова форма амплитуды излученного сигнала. Так, если искажение сигнала связано с непостоянством коэффициента поглощения, то дополнительная квадратурная компонента имеет вид производной по времени от синфазной компоненты и для зондирующего импульса, близкого к прямоугольному, фазовая диаграмма будет иметь вид эллипса, при этом отношение ширины лепестка к его длине будет пропорционально $2\gamma\Delta\omega$. В случае преобладания второго слагаемого в (10 а) дополнительная квадратурная компонента пропорциональна второй производной амплитуды исходного импульса и форма фазовой имеет совершенно другой вид, что позволяет различить эти случаи визуально.

Фазовая диаграмма удобна тем, что она позволяет наглядно представить фазовую структуру сигнала и открывает возможность для регистрации таких малых изменений, которые на огибающей не видны. Так, если ширина петли (на фазовой диаграмме) составляет 10% от длины, то это означает, что вторая квадратурная компонента составляет по амплитуде порядка 5% от первой, изменение огибающей составляет при этом менее 1%.



В подводном акустическом канале коэффициент поглощения имеет ярко выраженную зависимость от частоты: в широком диапазоне частот он растет квадратично по частоте. Здесь учитывается только часть затухания, связанная с поглощением, к дополнительным эффектам могут приводить рассеяние и так называемая волноводная дисперсия. Добавки к показателю затухания в рассмотренном приближении за счет этих факторов будут аддитивны. Рассмотрим, к каким величинам искажений приведет поглощение. Для оценок возьмем зависимость, приведенную в [3]. На рисунке проведены кривые, определяющие пороговую дальность, в зависимости от частоты, на которой величина вклада в квадратурные компоненты за счет дисперсии поглощения равна 2% (кривая 1) и 50% (кривая 2) для отношения ширины полосы сигнала к несущей частоте $d/f = 0,1$. Для сравнения приведена кривая 3, определяющая дальность, на которой при данной частоте затухание за счет поглощения составляет 80 дБ. Из рисунка видно, что практически для всех частот существует дальность, на которой искажения сигнала измеримы. Порог 2% выбран условно как порог наблюдаемости искажений (начиная с этой величины, фазовая диаграмма визуально отличается от отрезка прямой), а 50% – порог сильных искажений, когда использованное приближение перестает быть применимым.

Приведенные выше результаты можно сформулировать следующим образом: искажение амплитудно-модулированного импульса при распространении его в линейном канале в основном сводится к появлению дополнительной квадратурной составляющей, воспроизводящей производную синфазной компоненты исходного импульса, с амплитудой, пропорциональной наклону амплитудно-частотной характеристики канала. Соответствующая этому случаю фазовая диаграмма будет иметь форму лепестка, ширина которого пропорциональна крутизне фронта импульса и наклону амплитудно-частотной характеристики канала. Для морской воды искажения, вызванные частотной зависимостью поглощения, измеримы практически во всех частотных диапазонах, начиная с некоторой дальности.

Поскольку при рассмотрении роли дисперсии затухания использовались только общие свойства передаточных функций линейных стационарных каналов, указанные искажения существуют во всех таких каналах: в радиотехнике, радиофизике, волоконной оптике, акустике, когерентной оптике и т.д. Значимость и измеримость рассмотренных искажений в каждой из указанных физических систем необходимо анализировать отдельно. Необходима также возможность когерентной работы с сигналом (с квадратурными компонентами).

В коротковолновом радиозондировании ионосферы эффект влияния дисперсии затухания наблюдался экспериментально [4] и оказался больше теоретических оценок и расчетов, учитывающих только поглощение. Наблюдались искажения за счет дисперсии модуля коэффициента передачи и в радиотехнических цепях с сосредоточенными параметрами, где расчетные значения согласуются с измеренными.

При коротковолновом радиозондировании ионосферы основной вклад в частотную зависимость ПФ, а следовательно, и в искажения сигнала, вносит не поглощение, а неоднородная структура области отражения. Именно наличие неоднородностей в среде приводит к наблюдаемым величинам искажений большим, чем теоретически рассчитанные за счет поглощения. Аналогичная ситуация может оказаться и в подводном акустическом канале, поэтому для акустического канала необходима экспериментальная проверка величин искажений, которые должны быть измеримы даже без учета неоднородностей и интерференционных эффектов.

1. Харкевич А.А. Линейные и нелинейные системы. Т. 2. М.:Наука, 1973. 566 с.
2. Вайнштейн Л.А., Вакман Д.Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. М.:Наука, 1983. 288 с.
3. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.:Мир, 1980. 580 с.
4. Засенко В.Е. Ильин Н.В. Орлов И.И. Тонкая структура сигналов, отраженных от ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1993. Вып. 100. С. 158 – 173.

ИСЗФ СО РАН,
Иркутск

Поступила в редакцию
15 июля 1994 г.

N. V. Ilyin, I. I. Orlov. On Effect of Loss Scattering on a Pulse Shape inside Underwater Acoustic Channel.

A distortion of narrowband pulses' shape when passing through an underwater acoustic channel is treated in the paper. The shape distortion is shown to be mainly due to appearance of an additional contribution to quadrature components. Its amplitude depends both on the pulse shape and the channel parameters, i. e. frequency dependence of attenuation. The additional contribution due to dispersion inside the underwater acoustic channel is detectable practically in all frequency ranges. The obtained values are presented for marine water for distortion as a function of distance and frequency.