

## Особенности применения сложных сверхширокополосных сигналов в гидроакустике

Г.Л. Черниковская

Таганрогский технологический институт Южного федерального университета, г. Таганрог, ГСП 347915, ул. Чехова, 22, [glchernih@tsure.ru](mailto:glchernih@tsure.ru), [chergl\\_trti@mail.ru](mailto:chergl_trti@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы применения сложных СШП сигналов – СШП ЛЧМ сигналов и сложных сигналов с кодово- импульсной модуляцией – для обнаружения гидроакустических объектов.*

*The questions of the using complex UWB signals is considered for finding sonar object. It is The UWB LFM signals and complex signals with code impulse modulation.*

Одной из сложных задач в гидроакустике является обнаружение предметов, погруженных в морские осадки на глубину единиц – десятков метров от поверхности дна. Для обнаружения таких объектов необходимо обеспечить высокое разрешение, то есть необходимо применять акустические сигналы с большой шириной спектра  $\Delta f$ . С другой стороны, поскольку объекты находятся в среде с поглощением (вода, грунт) энергии распространяющихся акустических волн, интенсивность которого растет с увеличением частоты, спектр сигнала целесообразно сдвигать в область нижних частот. Это приводит к необходимости использования сигналов, для которых ширина спектра  $\Delta f$  соизмерима со средней частотой  $f_0$  и коэффициент сверхширокополосности (СШП) находится в пределах  $0,5 \leq \nu < 2$ .

Проведенные в [1-2] исследования показали, что из-за поглощения в осадках энергия СШП эхосигналов уменьшается в 1000 раз при большой глубине погружения объекта. Проблему повышения помехоустойчивости приема таких сигналов можно решить, увеличивая энергию зондирующих сигналов или за счет повышения их амплитуды, или их длительности. Увеличение амплитуды ограничено порогом кавитации, увеличение длительности сигнала приводит к уменьшению энергетической ширины спектра и как следствие этого уменьшению разрешающей способности по дальности. Применение методов накопления энергии за счет многократных посылок зондирующих сигналов, подобных применяемым в подповерхностной радиолокации, в гидроакустике неэффективно из-за малой скорости распространения акустических волн в воде и осадках порядка 1500 м/с.

Выходом является использование сложных сигналов с частотной или фазоимпульсной модуляцией. Но и в этом случае существуют ограничения по увеличению энергии сложного зондирующего сигнала, которую можно получить в этом случае за счет увеличения или длительности сигнала  $T$ , или ширины спектра  $\Delta f$ , или обоих параметров одновременно. С одной стороны, ограничена сверху ширина спектра СШП сигнала

$$\Delta f_{max} < 2f_0.$$

С другой стороны, возможность увеличения энергии сигнала за счет  $T$  ограничена временем одного цикла излучения-приема локатора

$$T_{max} \leq 2(H+h_{max})/c,$$

где  $H$  – глубина дна (высота водяного столба),  $h_{max}$  – максимальная глубина погружения объекта в грунт,  $c$  – скорость звука в среде. При  $H = 100$  м и  $h_{max} = 10$  м, например, длительность зондирующего сигнала ограничена значением  $T_{max} \leq 130$  мс и максимально достижимая база сложного сигнала, пропорциональная коэффициенту увеличения энергии по сравнению с простым СШП сигналом, при этом составляет

$$B_{max} = \Delta f_{max} T_{max} = 2 f_0 \frac{2(H + h_{max})}{c} = 0,266 f_0.$$

Применению сложных СШП сигналов в гидролокации препятствует влияние среды распространения и вида объекта локации на форму эхосигнала. Отсутствие априорных сведений о параметрах частотно-зависимого поглощения среды и форме объекта делает невозможной оптимальную обработку СШП эхосигналов при их приеме. Применение квазиоптимальной обработки снижает помехоустойчивость приема и требует предварительной оценки допустимых потерь. Поэтому необходимо проведение анализа применимости сложных СШП сигналов для обнаружения гидроакустических объектов. Ниже рассмотрены два типа сложных СШП сигналов – сигналы с линейной частотной модуляцией и сигналы на основе кодово-импульсных последовательностей.

Традиционно в гидроакустике применялись узкополосные ЛЧМ сигналы. Для их описания в спектральной области использовалось приближенное выражение, которое совпадает с точным для узкополосных сигналов [3]. Такая модель при больших индексах модуляции  $m > 100$  хорошо аппроксимируется прямоугольным спектром. При этом среднеквадратичная погрешность аппроксимации уменьшается с увеличением индекса модуляции  $m$  и при индексах модуляции  $m > 150$  не превышает 3%. Поэтому можно считать, что ЛЧМ сигнал при больших индексах модуляции имеет такие же энергетические характеристики, как и аппроксимирующий его простой сигнал с прямоугольным спектром. Поскольку для аппроксимирующего сигнала легко определяются такие характеристики, как ширина спектра, квадратичный интервал корреляции, корреляционная функция, то упрощается и анализ ЛЧМ сигналов, причем не только зондирующих, но и эхосигналов. Проведенные исследования показали, что среднеквадратичная погрешность аппроксимации спектра эхосигнала увеличивается с ростом глубины  $h$  погружения объекта в осадки и с увеличением ширины спектра  $\Delta f$ . Но тем не менее, для глубин  $h < 5$  м и при индексе модуляции  $m > 200$  она составляет не более 10%.

Для сверхширокополосных ЛЧМ сигналов упрощенное описание в спектральной области, справедливое для узкополосных сигналов, использовать нельзя. Поскольку спектральные составляющие такого СШП сигнала располагаются в низкочастотной области, примыкающей к нулевой частоте, то необходимо учитывать составляющие спектра в области отрицательных частот двустороннего спектра Фурье.

Уточненное выражение для спектра СШП ЛЧМ сигнала

$$s(t) = A_0 \cos \left( \left( \omega_0 - \frac{\omega_\delta}{2} \right) t + \frac{\pi m t^2}{T^2} \right), \text{ при } 0 \leq t \leq T; \quad (1)$$

где  $T$  – длительность сигнала,  $f_0$  – несущая частота сигнала,  $\omega_\delta = 2\pi f_\delta$  – полная девиация частоты,  $m = T \cdot f_\delta$  – индекс модуляции или база сигнала,  $|\beta| = \frac{2\pi f_\delta}{T}$  – скорость линейного изменения частоты, имеет следующий вид [4]:

$$S(j\omega) = \frac{A_0 T}{2\sqrt{2m}} \left[ \exp \left( -j \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\beta} \right) \cdot \{C(u_1) + C(u_2) + j(S(u_1) + S(u_2))\} + \right. \\ \left. + \exp \left( j \frac{(\omega + \omega_0)^2}{2\beta} \right) \cdot \{C(x_1) + C(x_2) - j(S(x_1) + S(x_2))\} \right], \quad (2)$$

где  $C(x)$  и  $S(x)$  определяются интегралом Френеля  $C(x) + jS(x) = \int_0^x e^{j\frac{\pi X^2}{2}} dX$ ,

$$x = \sqrt{\frac{2f_\delta}{T}} \left( t + \frac{(\omega + \omega_0)T}{\Delta\omega} \right), \quad x_1 = \sqrt{\frac{m}{2}} \left( 1 - 2 \frac{\omega + \omega_0}{\Delta\omega} \right), \quad x_2 = \sqrt{\frac{m}{2}} \left( 1 + 2 \frac{\omega + \omega_0}{\Delta\omega} \right).$$

Для вычисления интегралов Френеля удобно пользоваться аппроксимацией  $C(z)$  и  $S(z)$  рациональными функциями  $f(z)$  и  $g(z)$ :

$$C(z) = 0,5 + f(z) \sin\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) - g(z) \cos\left(\frac{\pi}{2} z^2\right),$$

$$S(z) = 0,5 - f(z) \cos\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) - g(z) \sin\left(\frac{\pi}{2} z^2\right),$$

$$f(z) = \frac{1 + 0,926z}{2 + 1,792z + 3,104z^2} + \varepsilon(z), \quad g(z) = \frac{1}{2 + 4,142z + 3,492z^2 + 6,670z^3} + \varepsilon(z),$$

$$|\varepsilon(z)| \leq 2 \cdot 10^{-3}.$$

Как показали исследования, при  $\nu > 1$  спектр ЛЧМ сигнала становится несимметричным относительно центральной частоты  $f_0$  и появляется составляющая при  $\omega = 0$ . Поскольку для СШП ЛЧМ сигналов не выполняется первый постулат Релея т.е.  $|S(j\omega)|_{\omega=0} \neq 0$ , то необходимо модифицировать выражение (4) с целью удаления постоянной составляющей.

Одним из серьезных недостатков применения ЛЧМ сигналов является значительное искажение спектров и формы эхосигналов при распространении в среде с поглощением. Приведенные на рис. 1 графики спектров реального и аппроксимированного ЛЧМ эхосигнала наглядно иллюстрируют деформации спектров, возрастающие с увеличением глубины  $h$ . Расчеты были выполнены для ЛЧМ сигналов с индексом модуляции  $m=100$ ,  $f_0 = 10 \text{ кГц}$  и  $\Delta f = 12 \text{ кГц}$  при разных глубинах  $h = 0 \dots 10 \text{ м}$ .

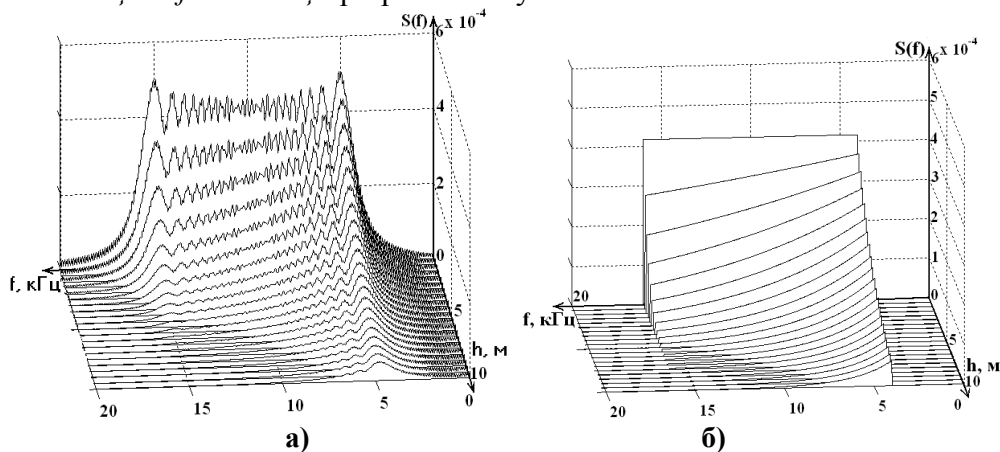


Рис. 1. Спектры ЛЧМ эхосигналов: а) реального; б) аппроксимированного

Результаты численных расчетов формы эхосигналов при двух значениях  $h$  1 и 10 м представлены на рис. 2. Они демонстрируют значительные изменения формы огибающей ЛЧМ зондирующего сигнала с параметрами  $m=300$ ,  $f_0 = 10 \text{ кГц}$  и  $\Delta f = 16 \text{ кГц}$ .

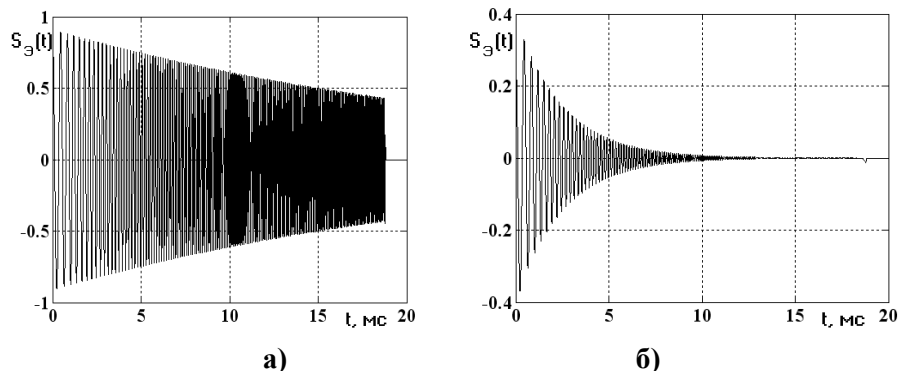


Рис. 2. Вид ЛЧМ эхосигналов на глубине: а)  $h = 1 \text{ м}$ ; б)  $h = 10 \text{ м}$

Таким образом, исследования показали, что применение СШП ЛЧМ сигналов в гидроакустике наталкивается на серьезные трудности, связанные с изменением формы эхосигналов и необходимостью модификации спектральной модели при больших коэффициентах широкополосности. Дополнительным недостатком таких сигналов является сравнительно большой уровень боковых лепестков корреляционной функции, что требует применения весовой обработки при оптимальной или квазиоптимальной обработке. Поэтому более предпочтительным является использование сложных сигналов с кодово-импульсной модуляцией.

В [5] в качестве таких сигналов исследуются последовательности импульсов, модулированные по знаку кодовой последовательностью Баркера и псевдослучайной m-последовательностью. Для этих сложных сигналов уровень боковых лепестков корреляционной функции уменьшается по сравнению с максимальным значением главного лепестка в N раз, где N – число импульсов последовательности.

Импульсы представляют СШП сигнал в виде первой производной от Гауссова видеоимпульса [6-7], называемый моноциклом Гаусса. Выбор такой модели сигнала обусловлен тем, что она хорошо отражает физику процессов при использовании ударного возбуждения антенны. Отличительной особенностью моноцикла Гаусса является компактность описания модели и возможность получения интегральных преобразований для нее в замкнутом виде. Этот сигнал имеет постоянный коэффициент широкополосности 1,204 и описывается выражениями во временной области

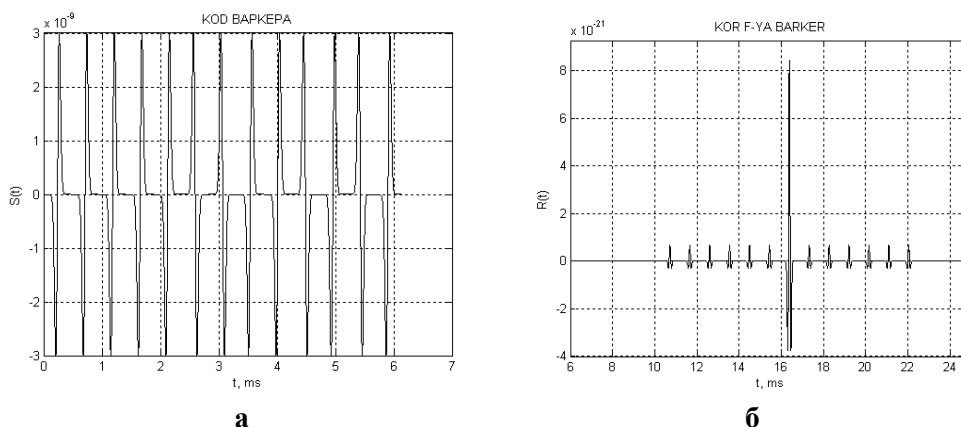
$$s(t) = A_m \frac{t}{t_m} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{t^2}{t_m^2} - 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

и, соответственно, в спектральной области

$$S(j\omega) = -jA_m \frac{\sqrt{2\pi}}{\omega_0^2} \omega e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (4)$$

где  $A_m$ ,  $t_m = \frac{1}{\omega_0}$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – параметры модели.

На рис. 3, а представлен вид зондирующего сложного сигнала, составленного из импульсов моноцикла Гаусса, модулированных по знаку кодовой последовательностью Баркера.



**Рис.3. Зондирующий сигнал (а) и его корреляционная функция (б)**

На рис.3, б приведен вид его корреляционной функции, у которой уровень боковых лепестков составляет 1/13 от максимума.

С помощью моделирования был рассчитан вид сложного эхосигнала, прошедшего расстояние  $R$  (м) в воде. На рис. 4 представлен вид фрагмента эхосигнала. На рис. 5 для сравнения приведены вид корреляционной функции зондирующего сигнала (кривая 1) и корреляционной функции эхосигнала (кривая 2) в области главного лепестка.

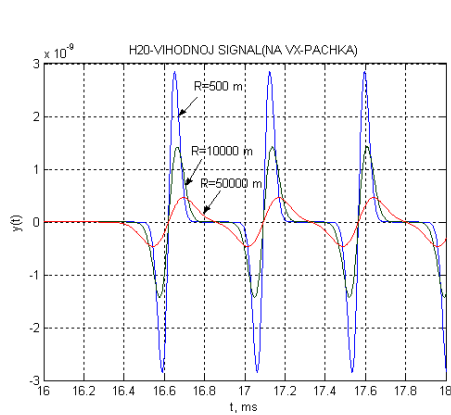


Рис. 4. Вид эхосигнала

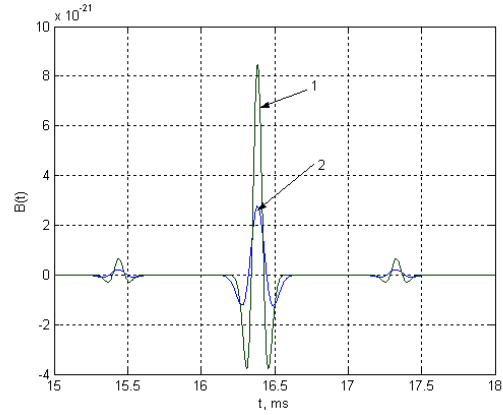


Рис. 5. Вид корреляционных функций

В [8] показано, СШП эхосигналы  $s_r(t)$  моноцикла Гаусса при распространении в среде с квадратичной зависимостью поглощения от частоты (например, вода, жидкие осадки) не меняют свою форму, изменяются только параметры модели по закону

$$A_{mr} = \frac{A_m}{(1 + 2br\omega_0^2)}, \quad (5)$$

$$t_{mr} = t_m \sqrt{1 + 2br\omega_0^2}, \quad (6)$$

где  $b = const, [\text{дБ}/(\text{м}\cdot\Gamma\text{ц}^2)]$  – зависит от свойств среды,  $r$  – пройденное в среде с поглощением расстояние. Нормированная корреляционная функция зондирующего сигнала (4) описывается формулой [9]

$$R(\tau) = \left(1 - \frac{\tau^2}{2t_m^2}\right) e^{-\frac{\tau^2}{4t_m^2}}, \quad (7)$$

для эхосигнала в формуле (7) значение  $t_m$  меняется на  $t_{mr}$  в соответствии с (6).

Автокорреляционной функция излучаемого сигнала принимает значения, равные нулю, при сдвигах  $\tau_0 = \pm\sqrt{2}t_m$  относительно точки  $\tau = 0$ . Временные сдвиги, соответствующие минимальным значениям  $R(\tau)$ , определяются по формуле

$$\tau_{min} = \pm\sqrt{6}t_m,$$

значения самих экстремумов составляют  $R(\tau_{min}) = -2e^{-3/2} \approx -0,446$ . Таким образом, расстояние между экстремумами  $\Delta\tau$  связано с параметром  $t_m$  излучаемого сигнала, а в общем случае для сигнала, прошедшего расстояние  $r$ , с параметром  $t_{mr}$  соотношением

$$\Delta\tau = 2\sqrt{6}t_{mr} = 2t_m \sqrt{6(1 + 2br\omega_0^2)}. \quad (9)$$

Если можно измерить время  $\Delta\tau$  между экстремумами, то при известном поглощении  $b$  из (12) можно определить пройденное сигналом расстояние  $r$  по формуле

$$r = \frac{\Delta\tau^2}{48b} - \frac{1}{2b\omega_0^2}. \quad (10)$$

Несомненным достоинством полученных результатов (5) – (9) является то, что они позволяют осуществить синтез согласованного фильтра для выделения сигнала из помех. Кроме того, при локации значения параметров принимаемого эхосигнала, таких как  $\Delta\tau$ , энергетическая ширина спектра, квадратичный интервал корреляции, частота максимума спектральной плотности [8-9], могут явиться дополнительными признаками, несущими информацию о расстоянии до объекта.

### Литература

1. Черниховская Г.Л., Мусатова М.М. Согласованная фильтрация сверхширокополосных гидроакустических сигналов от объектов, находящихся в осадках. Россия, XI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», «RLNC-2005», том 3, 12-14 апреля 2005 г., Воронеж. – НПФ «САКВОЕЕ» ООО, ISBN 5-9900094-5-3, с. 1354 – 1365
2. Черниховская Г.Л., Мусатова М.М. Влияние среды распространения на помехоустойчивость согласованной фильтрации сверхширокополосных гидроакустических сигналов. Материалы международной научной конференции «Оптимальные методы решения научных и практических задач». Часть 3. «Оптимизация исследований в области естественных наук». – Таганрог: ТРТУ, 2005, с. 85-95.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986.
4. М.М. Мусатова, Черниховская Г.Л. Анализ модели сверхширокополосного сигнала с линейной частотной модуляцией. Материалы международной научной конференции «Проблемы развития естественных, технических и социальных систем» – ч.3– Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2007, с.54-60.
5. Мусатова М.М., Федосов В.П. Анализ моделей сложных сверхширокополосных гидроакустических сигналов, манипулированных по фазе // Материалы международной научной конференции «Проблемы развития естественных, технических и социальных систем» - часть 3, Таганрог: Изд-во «Антон», ТТИ ЮФУ, 2007г. стр. 48 – 54
6. Покровский Ю.О., Черниховская Г.Л. Модель сверхширокополосных локационных сигналов в виде производной от гауссова видеоимпульса. Материалы международной научной конференции «Информационные технологии в современном мире». Часть 4. – Таганрог: ТРТУ, 2006, с. 63 – 67
7. Черниховская Г.Л., Шеверда Д.А. Исследование влияния поглощения в среде распространения на свойства СШП сигнала в виде моноцикла Гаусса. Материалы международной научной конференции «Методы и алгоритмы принятия эффективных решений». – Часть 4 – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, с. 91 – 98
8. Черниховская Г.Л., Криуленко А.А. Свойства СШП сигнала в виде моноцикла Гаусса при распространении его в среде с квадратичной зависимостью поглощения от частоты. Материалы Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы исследования общественных и технических систем» - часть 3 – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. с.68-72.
9. Черниховская Г.Л., Криуленко А.А. Свойства корреляционной функции моноцикла Гаусса. Материалы Всероссийской научной конференции «Актуальные вопросы исследования общественных и технических систем» - часть 3 – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. с.63-67.