

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ВОЛНОВОДАХ МЕЛКОГО МОРЯ

О. Р. ЛАСТОВЕНКО, В. А. ЛИСЮТИН, А. А. ЯРОШЕНКО

*Севастопольский национальный технический университет
Университетская 33, Севастополь 99053, Крым, Украина*

Гидроакустический волновод рассматривается как канал связи, отклик которого на входной сигнал определяется импульсной характеристикой канала. Импульсная характеристика восстанавливается с помощью обратного преобразования Фурье от акустического поля, представленного в виде суммы мод. Осуществляя дискретную свертку реализации сигнала с импульсной характеристикой волновода, моделируются его отклики на сигналы с быстро меняющимся спектром.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается устойчивый интерес к акустике мелкого моря, поскольку именно в зоне морского шельфа сосредоточена значительная доля природных ресурсов, важных для хозяйственной деятельности человека.

Мелким принято считать море, в котором звуковое поле определяется акустическими характеристиками дна и изменчивым профилем скорости звука. Телекоммуникационное обеспечение как подводных стационарных, так и погружаемых объектов различного назначения осуществляется в том числе с помощью звукоподводных систем связи, передающих и принимающих акустические сигналы со сложными видами модуляции [1]. Сигнал, принятый антенной, расположенной на значительном расстоянии от источника из-за волноводной межмодовой и внутримодовой дисперсии будет значительно отличаться от излученного.

Теоретически задача о распространении сигнала со стационарным спектром через канал с известным законом дисперсии решается с помощью интеграла Фурье. Для широкополосного сигнала решение интеграла Фурье чаще всего находят с помощью метода стационарной фазы, а для узкополосного используют приближения теории дисперсии [2]. Однако, методы, в основе которых лежит преобразование Фурье, оказываются в принципе неприменимы для сигналов с быстро изменяющимся спектром.

Гидроакустический волновод возможно рассматривать как четырехполосник, отклик которого на входной сигнал определяется комплексным коэффициентом передачи (ККП) $H(\omega)$ или импульсной характеристикой (ИХ) $h(t)$, связанными парой преобразований Фурье. Если ИХ канала известна, то выходной сигнал можно определить, «свернув» входной сигнал с ИХ, при этом все операции выполняются в пределах временной области.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Горизонтально-слоистую модель волновода сравнения, дисперсионные характеристики которой соответствуют реальному волноводу в главном (порядок и время вступления нормальных волн в пределах диапазона частот, ограничивающего основную часть спектра сигнала) будем считать физически адекватной, если ограничиться только детер-

минированной функцией передачи $H(\omega)$. Воздействие случайных факторов можно учесть с помощью случайной функции $E(\omega)$, так что $\mathbf{H}(\omega) = H(\omega) \cdot E(\omega)$ [3].

Рассмотрим только детерминированную составляющую ККП. Будем представлять точечный источник в виде пульсирующей сферы малого волнового размера, тогда комплексную амплитуду акустического давления можно записать как

$$p = \frac{-i\omega \rho x}{4\pi R} \exp(i\omega / c_1 R), \quad \omega/c_1 R \ll 1, \quad (1)$$

где c_1 – скорость звука в воде, x – объемная скорость источника, называемая ниже «сигнал». Записав выражение для акустического поля в волноводе как сумму мод, отнеся к нему (1), можно получить ККП волновода по акустическому давлению (полю) в виде

$$H_p(\omega) = i \sum_{l=1}^{\infty} A_l \sin(b_l z_0) \sin(b_l z) H_0^{(1)}(\xi_l r), \quad (2)$$

где z_0, z – глубина источника и приемника (переменная); b_l, ξ_l – вертикальное и горизонтальное волновые числа; A_l – коэффициент возбуждения мод. Волновые числа рассчитываются из дисперсионного уравнения, соответствующего модели волновода.

Кроме приемников акустического давления (гидрофонов), в последнее время получили развитие и приемники градиентов давления – датчики колебательной скорости, совместное применение которых с гидрофонами позволяет создавать комбинированные скалярно-векторные антенны [4].

Комплексные коэффициенты передачи по горизонтальной и вертикальной составляющим колебательной скорости, учитывая связь p, v_r, v_z [3] следует определить как

$$H_r(\omega) = \frac{\partial H_p(\omega)}{\partial r} = -i \sum_{l=1}^{\infty} A_l \xi_l \sin(b_l z_0) \sin(b_l z) H_1^{(1)}(\xi_l r), \quad H_z(\omega) = \frac{\partial H_p(\omega)}{\partial z} = i \sum_{l=1}^{\infty} A_l b_l \sin(b_l z_0) \cos(b_l z) H_0^{(1)}(\xi_l r). \quad (3)$$

Импульсные характеристики $h_p(t), h_r(t), h_z(t)$ – результат обратного дискретного преобразования Фурье от соответствующих ККП (2), (3).

В более общем случае, волноводу-четырёхполоснику имеющему M входов и N выходов соответствует матрица импульсных характеристик $\mathbf{h}(t) = (h_{ij}(t))$, где $i=1, 2, \dots, M$, $j=1, 2, \dots, N$, а элемент $h_{ij}(t)$ определяет связь между i -тым входом и j -тым выходом. Тогда вектор выходного сигнала можно вычислить как $\mathbf{y} = \mathbf{x} \otimes \mathbf{h}$, где $\mathbf{y} = (y_j)$, $\mathbf{x} = (x_i)$ – вектор-строка входного сигнала.

Ниже моделируется распространение сигналов в волноводе Пекериса с поглощающим дном. Модель волновода Пекериса состоит из областей «1» и «2»: водного слоя глубиной h и полупространства с плотностями $\rho_1 = 1033 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1900 \text{ кг/м}^3$ и скоростями звука $c_1 = 1490 \text{ м/с}$, $c_2 = 1800 \text{ м/с}$ соответственно, тангенс потерь 0.01. Источник и приемник давления расположены вблизи дна, расстояние между ними – r .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис.1-3 показаны реализации и спектрограммы выходного сигнала при импульсном включении тонального источника $x(t) = \sin 2\pi f t$. Длительность импульса 2с, расстояние $r = 5c_1$, кинематический момент вступления грунтовой волны $\approx 4.14 \text{ с}$, водной – 5 с.

На рис.1 частота источника $f = 30 \text{ Гц}$ – немного меньше критической частоты 1-й моды (33 Гц). На спектрограмме видно «ударное» возбуждение большого количества мод в моменты включения и выключения источника, затем затухание сложного многочастотного процесса. Поскольку значительная доля энергии в спектре импульса сосредоточена в

окрестности критической частоты, возникает хорошо заметная на реализации грунтовая волна. Основная частота через волновод не проходит.

На рис.2 частота источника $f=40$ Гц, ниже критической для второй моды (101 Гц) – «одномодовый» сигнал. Грунтовая волна выражена значительно слабее, переходный процесс включения (ППВКЛ) - с плавно возрастающей частотой и амплитудой, с картиной биений вплоть до момента ≈ 5.3 с, когда устанавливается единая основная частота в двух каналах распространения сигнала – грунтовом и водном. ППВКЛ практически завершается примерно в момент ≈ 5.5 с, после затухания колебаний 2-й моды. Переходный процесс выключения (ППВЫКЛ) начинается с постепенного отключения канала грунтовой волны и возобновления биений. В момент ≈ 7 с колебания обогащаются высокочастотными составляющими за счет «вспышки» спектра. В целом, на реализации и спектрограмме отчетливо прослеживается «сгон» низкочастотных компонент спектра в направлении «раньше», а высокочастотных – «позже».

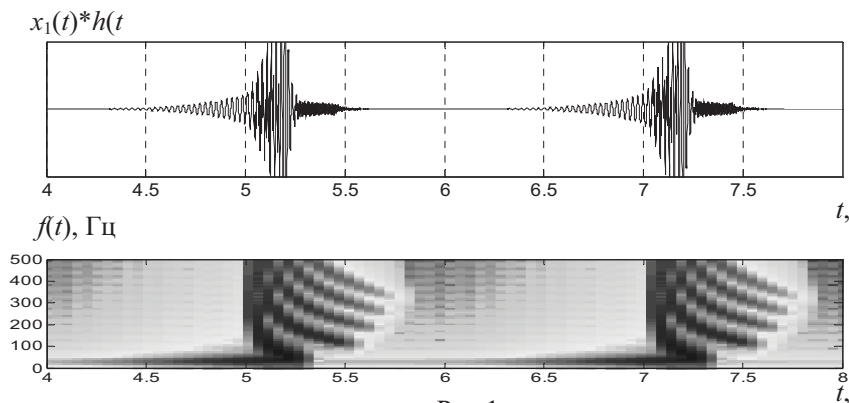


Рис.1

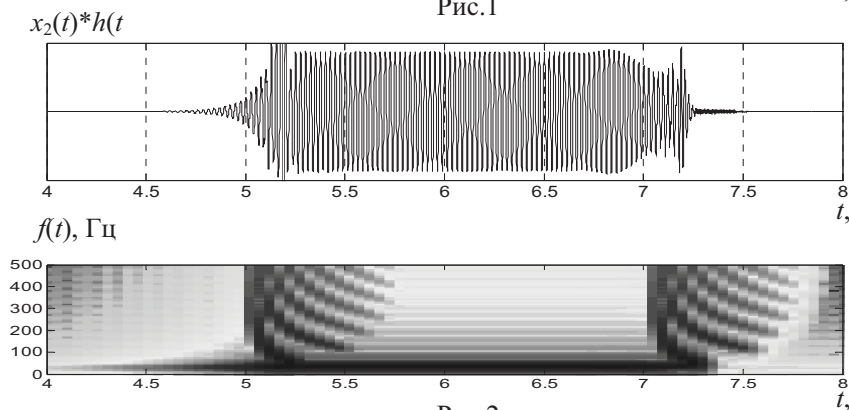


Рис.2

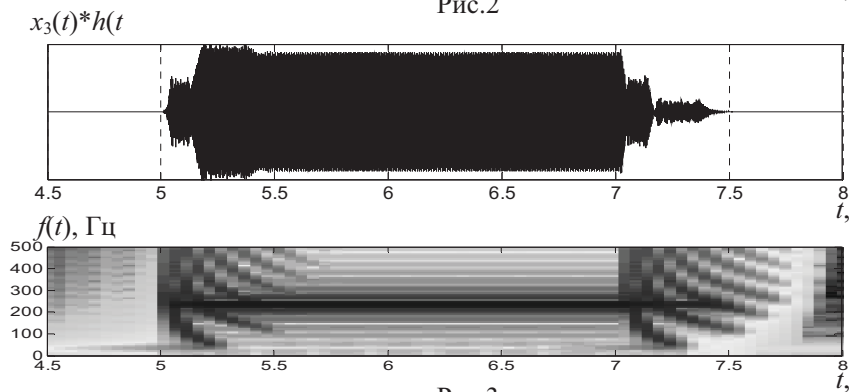


Рис.3

На рис.3 – «трехмодовый» импульс с $f=238$ Гц – равной критической для 4-й моды. Здесь грунтовой волны практически нет (на реализации незаметна, слабо видна на спектрограмме вследствие высокой чувствительности процедуры). ППВКЛ и ППВЫКЛ имеют почти «кинематически» ступенчатый вид. На рис.2 и на рис.3 неискаженная часть импульса с установившейся амплитудой оказывается укороченной и задержанной.

Экспериментальной оценкой импульсной характеристики канала является сигнал

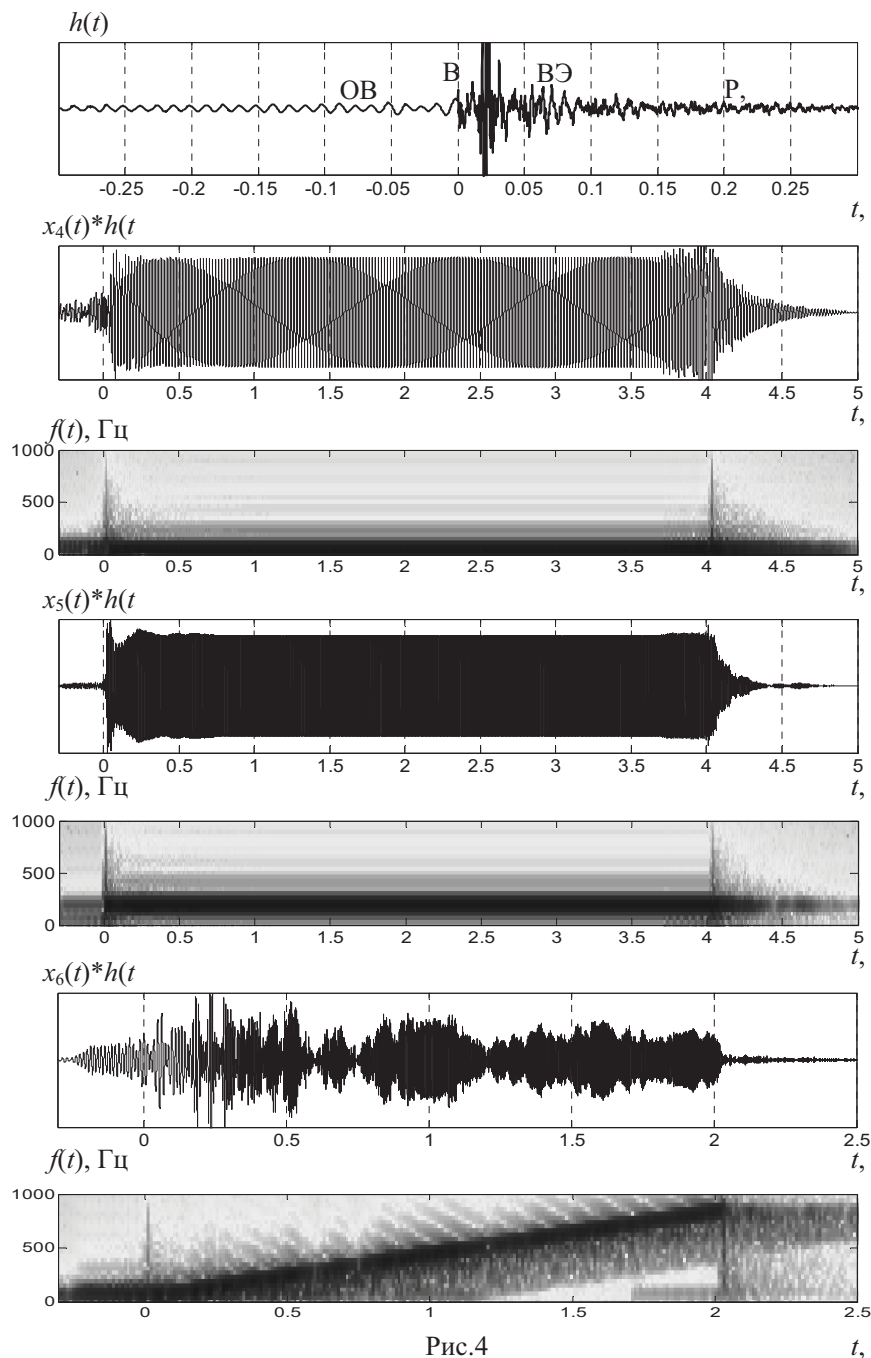


Рис.4

взрывного источника. На рис.4 показаны: ИХ волновода мелкого моря, выделенная из сигнала взрывного источника [5,6] (из спектра сигнала взрыва отфильтрована периодиче-

ская составляющая импульсов пульсации газового пузыря, во временной области из реализации сигнала взрыва вырезано вступление импульса ПГП), отклики волновода на тестовые сигналы и спектрограммы. На рис.5 – то же (исключая ИХ), но для модельного волновода с совпадающими параметрами. Глубина волновода $h=84$ м, расстояние $r=13$ км, глубина моря в точках взрыва и приема ≈ 84 м, глубина подрыва заряда и приема 50 м, период ПГП 40 мс [5,6]. В отличие от модельного, реальный волновод неизоскоростной, ось

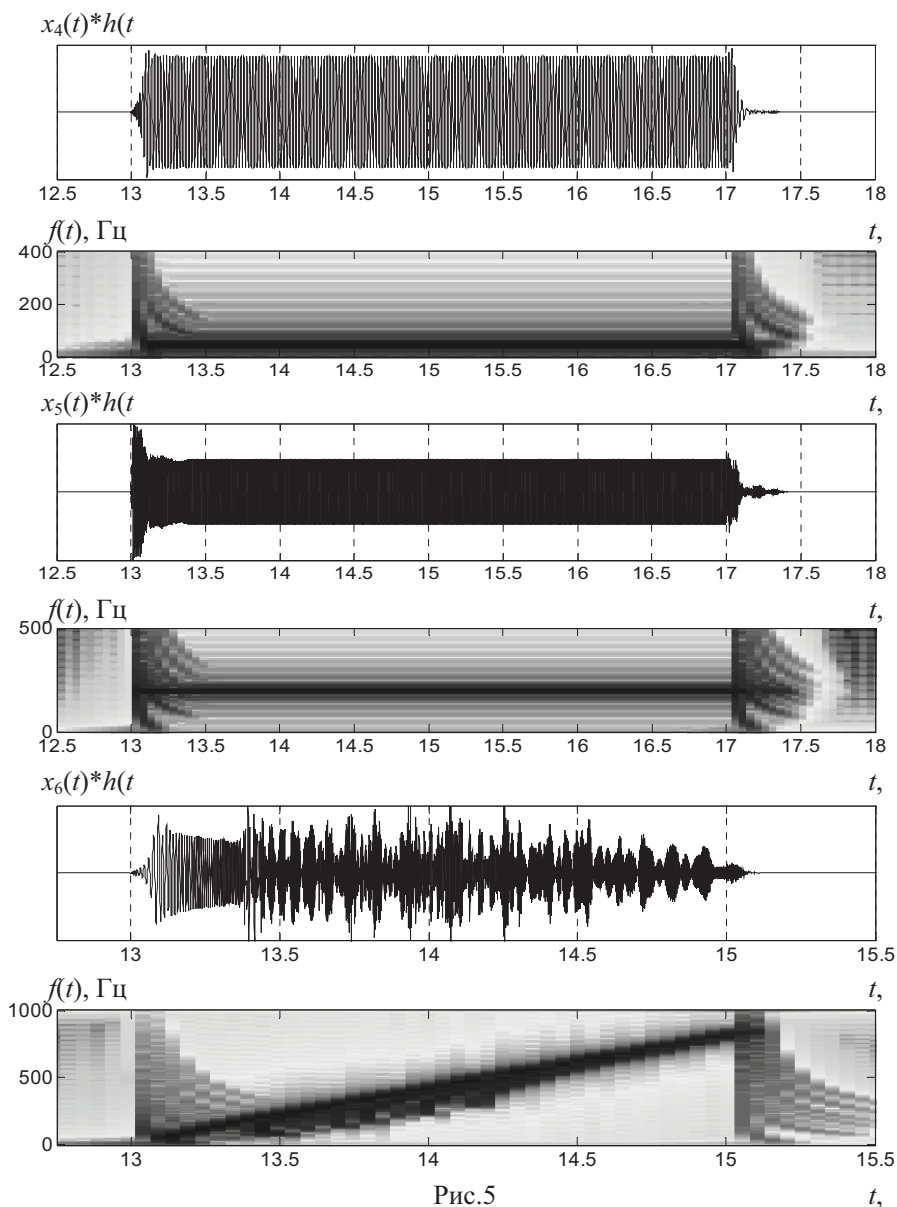


Рис.5

ПЗК – на глубине 50 м, разница скоростей между осью и границами – 8-10 м/с. Скорость звука в грунте, вычисленная по разнице времен вступления грунтовой и водной волн - ≈ 1560 м/с [6]. Критические частоты мод модельного волновода: 16, 48, 81, 113, 146 Гц.

На ИХ волновода обозначено: «ОВ» – опережающая волна, «ВВ» – водная волна, к моменту вступления которой привязано начало отсчета времени, «ВЭ» – волна Эйри, вступление которой почти совпадает с 3-им (неотфильтрованным) импульсом ПГП,

«ПП, Р» - реверберационная помеха и слабые импульсы ППП. Опережающая волна похожа на грунтовую, однако поскольку приведенная запись сделана не геофоном [5], «ОВ», вероятно, сформирована низкочастотными составляющими спектра импульса, распространяющимися по «крутым» лучевым траекториям, где скорость звука больше. Плавное вступления водной волны – следствие технического ограничения спектра. В водной волне можно различить два вступления волны Эйри – в моменты 0.065с и 0.12с, соответствующие минимумам групповой скорости двух мод. Следует обратить внимание, что импульсы в водной волне в результате сложения многих мод приобретают характерную остроконечную «лямбдообразную» форму с высокочастотным заполнением.

Сравнение переходных процессов при включении и выключении квазимонохроматических сигналов $x_4(t)=\sin(2\pi 50t)$, $x_5(t)=\sin(2\pi 200t)$ для модельного и реального волноводов показывает, что законы дисперсии более схожи в области высоких и менее – в области низких частот. Это объясняется наличием в реальном волноводе ПЗК и существованием опережающей волны, которой в модельном волноводе нет. На спектрограмме реального волновода видно ударное возбуждение мод, но визуально они не разделяются, на спектрограмме модельного – возбуждение мод неравномерное, 2-я мода практически отсутствует.

Отдельные моды возможно различить на реализации и спектрограмме свертки ИХ с ЛЧМ импульсом $x_6(t)=\sin(2\pi(50+200t)t)$ длительностью 2 с. Сжатые импульсы имеют классическую «колоколообразную» форму, наибольшую компрессию испытывает часть импульса, изменяющаяся в диапазоне частот 200 – 500 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свертка сигнала с импульсной характеристикой волновода является эффективным инструментом формирования опорных сигналов для корреляционного анализа. В волноводах с глубинами ≈ 100 м профиль скорости звука, а в особенности сформированный ПЗК уже оказывают заметное влияние на закон дисперсии мод, при этом низкочастотные составляющие спектра импульса, с большими углами скольжения эквивалентного луча могут существенно опережать высокочастотные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кебкал К.Г. Способ цифровой связи по многолучевым гидроакустическим каналам с применением частотно-модулированного несущего сигнала/ К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, С.Г. Яковлев // Акуст. журн.- 2004.- Т.50.- №.2.- С.220-230.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах/Л.М.Бреховских – М.: Наука, 1973.- 343с.
3. Лаваль Р. Влияние неоднородностей и нестабильности среды на пространственную и временную обработку сигналов / Р. Лаваль, И. Лабаск // Подводная акустика и обработка сигналов / Под ред. Л. Бьёрне –М.: Мир, 1985.-С.32-43.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике / В. А. Гордиенко, В. И. Ильичев, Л. Н. Захаров. – М.: Наука, 1989. – 223с.
5. База наблюдений сигналов взрывных источников в океане: <http://www.akin.ru/spravka.htm>
6. Вадов Р.А. Дальнее распространение звука в центральной части Балтийского моря/ Р.А. Вадов // Акуст. журн.- 2001.- Т.47.- №.2.- С.189-199.