

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ ЧЁРНОГО МОРЯ

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

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

The signal received on the hydrophone is modelled using the pulse characteristic with an input signal. The experimental signal recording of the underwater explosion is used for separating a pulse characteristic. The underwater explosion signal is corrected for reducing distortion following on the gas bubble pulsations. The dispersion distortions arising at the pulse signal propagation are analysed.

### ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сопоставление лучевого и модового подходов применительно к анализу распространения сигналов в подводном звуковом канале (ПЗК), а также уточнение границ их применимости до сих пор является актуальным вопросом акустики океана [1,2].

Сигнал, принятый гидрофоном, расположенным на значительном расстоянии от источника значительно отличается от излученного вследствие волноводной дисперсии. Принято считать, что в ПЗК «внутрилучевая» дисперсия отсутствует, а также, в отличие от волноводов мелкого моря, первыми в точку приема приходят низкие частоты и моды с большими номерами [3]. Однако, в реальных волноводах, в зависимости от малых изменений профиля скорости звука групповая скорость моды на низких частотах может оказаться как больше, так и меньше ее скорости на высоких частотах [4].

Гидроакустический волновод возможно рассматривать как канал связи с распределёнными по трассе параметрами. Отклик линейного канала на входной сигнал полностью определяется его импульсной характеристикой (ИХ)  $h(t)$ . Если она известна, то решение задачи о распространении сигнала сводится к свертке (конволюции) последнего с ИХ. При этом все операции выполняются в пределах временной области, что позволяет сохранить неизменными фазовые соотношения между спектральными составляющими сигнала.

Сигнал, формируемый ударной волной подводного взрыва близок к акустическому дельта-импульсу, тогда сигнал  $p(t)$ , приходящий в гидрофон можно рассматривать как приближение ИХ канала. В ПЗК сигнал  $p(t)$  является суммой элементарных сигналов, каждый из которых распространяется вдоль своей лучевой траектории, причем элементарный сигнал будет сверткой ИХ отдельного луча (или моды) с сигналом отличия дельта-импульса от импульса ударной волны. Кроме того, подводный взрыв формирует периодический сигнал пульсации газового пузыря (ППП), спектр которого накладывается на спектр ИХ [5,6]. Таким образом, для получения ИХ многолучевого канала ее необходимо выделить из сигнала  $p(t)$ , который предлагается обрабатывать в два этапа: 1) «отбеливание» спектра сигнала  $p(t)$  от низкочастотной составляющей импульсов ППП; 2) фильтрация импульсов ППП во временной области.

### ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЗРЫВНОГО СИГНАЛА

Сигнал, показанный на рис.1 – звук взрыва  $m=0.4$  кг ВВ, произведенного в Чёрном море 22-23 августа 1988 г. в точке  $43^{\circ}21'$  с.ш,  $39^{\circ}04'$  в.д на глубине 60 м - вблизи оси ПЗК. Сигнал принят в точке  $43^{\circ}39'$  с.ш,  $31^{\circ}56'$  в.д. на глубине 60 м, оцифрован 12-разрядным АЦП, частота дискретизации 10 кГц. Расстояние до источника  $R=197$  км [4,7].

Известно, что наименьшее время пробега будет иметь импульс, распространяющийся вдоль луча, выходящего под наибольшим углом к оси канала и пересекающего ось наименьшее число раз, а последним приходит импульс, распространяющийся вдоль оси. Интервалы между приходами импульсов с течением времени (возрастанием числа циклов) уменьшаются [3,8]. Вследствие взаимного перекрытия импульсов постепенно будет наблюдаться увеличение интенсивности сигнала с резким обрывом в конце, после прихода луча, меньше всего отклоняющегося от оси канала. Еще позднее приходят лишь лучи, идущие с отражениями от дна и имеющие слабую интенсивность [3].

Кратко описанные лучевые представления позволяют проанализировать временную структуру сигнала на рис.1. Начало отсчета времени здесь соответствует моменту вступления сигнала по горизонтальному лучу –  $t=0=R/c_0$ ,  $c_0$  – скорость звука на оси канала. Тогда «отрицательное» время будет опережением  $\tau$  вступления предыдущего канального импульса относительно последнего. Когда излучатель и приёмник находятся на

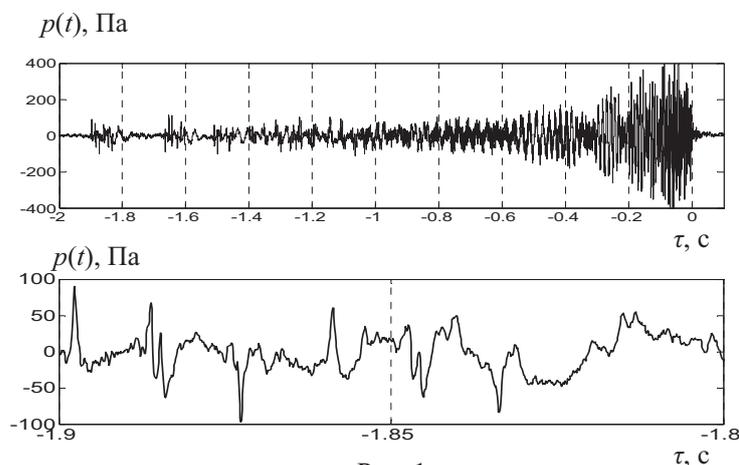


Рис. 1.

одинаковой глубине, имеются два луча, состоящие из одинакового числа полных циклов, и пересекающие ось ПЗК под равными (снизу-вверх и сверху-вниз) углами. Эти лучи имеют немного разное время прихода, если глубины источника и приёмника отличаются. Кроме того, есть ещё два луча, с наибольшим углом наклона с осью канала, для которых время прохождения пути минимально, но различно из-за несимметрии профиля  $c(z)$  или отклонения приемника от оси канала. Сигналы, распространяющиеся вдоль этих лучей формируют отклики, называемые «четвёрками» [1-4,8,9]. Первая, вторая, и третья группы «четвёрок», отличающиеся числом циклов луча, отчетливо разделяются на панораме реализации сигнала  $p(t)$ . Первая группа «четвёрок» показана на увеличенном фрагменте сигнала. Первая четвёрка сформирована импульсом ударной волны, вторая, и слабо выраженная третья - импульсами ППП. Разность времён вступления соответствующих импульсов в четвёрках совпадает с периодом ППП -  $T=39$ мс. С течением времени разность времён прибытия групп четвёрок уменьшается, и они перестают разделяться. Времена вступления сигналов в оконечной части импульса весьма чувствительны даже к малому изменению профиля скорости звука около оси канала. Малые изменения  $c(z)$  приводят к существенным изменениям во временах прихода лучей, при этом элементарные сигналы теряют когерентность (здесь – временную упорядоченность) и образуется лучевой хаос -

сплошное шумоподобное поле с равновероятным распределением амплитуд и фаз лучей [2, 4].

Последовательность временных интервалов между элементарными лучевыми сигналами в начале реализации отображает частотную зависимость групповой скорости первой нормальной волны [9]. Искомая частота определяется из условия  $f=2(t_{n+1}-t_n)^{-1}$ , где  $t_{n+1}-t_n$  - разность времен прихода сигналов по двум соседним четверкам. Из приведенного условия, учитывая рис.1, можно приближенно определить критическую частоту первой моды:  $f_{cf}=2(t_2-t_1)^{-1} \approx 9$  Гц.

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На первом этапе обработки исходного сигнала  $p(t)$  из его спектра была исключена низкочастотная составляющая импульсов ППП, для чего было проведено моделирование импульса давления ударной волны и сигнала ППП [5,6].

Для описания зависимости  $\tau(R,N)$  - опережения импульса по отдельным лучам относительно импульса, распространяющегося вдоль оси ПЗК, и разности  $\Delta\tau(R,N)$  времен распространения импульсов по лучам с отличным на единицу числом циклов могут быть применены формулы [4]:

$$\tau(R, N) = N^{1-a} \cdot (\alpha R)^a \quad \Delta\tau(R, N) = [(N-1)^{1-a} - N^{1-a}] \cdot (\alpha R)^a, \quad (1)$$

где  $R$  – дистанция,  $N$  – число циклов луча,  $a$  и  $\alpha$  – эмпирические коэффициенты, подлежащие определению. Подставляя значения  $a=1.7$ ,  $\alpha=0.0147$ , рекомендованные [4] для Черного моря, можно убедиться, что первая на рис.1 четверка, на самом деле является пятой (вероятно начало реализации обрезано для уменьшения размера файла). Подставляя в уравнения (1) значения  $\tau=1.885$ с и  $\Delta\tau=0.231$ с, взятые из рис.1 и решая систему, получаем уточненные значения:  $a=1.717$ ,  $\alpha=0.01438$ .

На втором этапе обработки, после обратного преобразования Фурье «исправленного» спектра, осуществлялась временная фильтрация сигнала с окнами, рассчитанными в соответствии с (1). Для снижения уровня шумов выполнялось шумопонижение по алгоритму трешолдинга с переменным порогом [10].

На рис.2 показана реализация восстановленной импульсной характеристики. По сравнению с рис.1 заметно снижение уровня реверберационного фона и шумов моря, значительное обострение лучевых вступлений и отсутствие импульсов ППП.

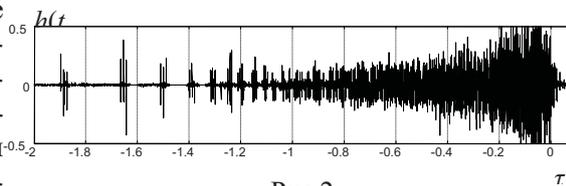


Рис.2

### ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Для моделирования влияния волновой дисперсии, ИХ канала была «свернута» со специально сформированными «входными» сигналами  $x(t)$ . Реализации моделированных «выходных» сигналов разделяются на три части: переходный процесс включения (ППВКЛ), неискажен-

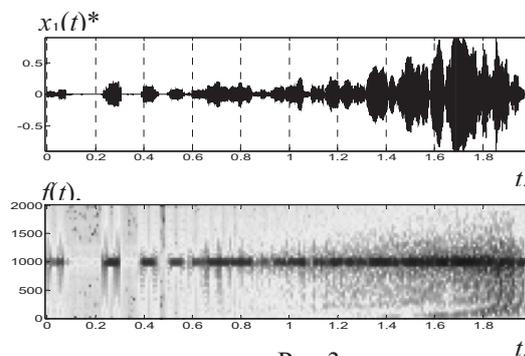


Рис.3

ная часть, и переходный процесс выключения (ППВЫКЛ).

На рис.3 – реализация и спектрограмма отклика канала на сигнал  $x_1 = \sin(2\pi 1000t)$  – короткий высокочастотный импульс длительностью 50 мс. Время отсчитывается от первого (по рис.1 и рис.2) лучевого вступления.

На реализации и спектрограмме различаются приходы импульса по отдельным канальным лучам, интервалы между которыми уменьшаются, пока импульсы не сливаются в непрерывный сигнал с периодически меняющейся амплитудой. На спектрограмме при первых лучевых вступлениях видны широкополосные «вспышки» спектра – ППВКЛ и ППВЫКЛ отдельных лучей. В первой половине сигнала дисперсия отсутствует, проявляется только многолучевой характер распространения. В оконечной части затянутого импульса, вступления формируются за счет «поздних» приосевых лучей, и низкочастотные компоненты «вспышек» спектра при ППВКЛ и ППВЫКЛ, распространяясь с большими групповыми скоростями мод уже успевают существенно опередить как высокочастотные компоненты, так и основную частоту. На реализации заметны короткие всплески амплитуды, синхронные со вступлениями высокочастотных компонент, распространяющихся с групповыми скоростями мод.

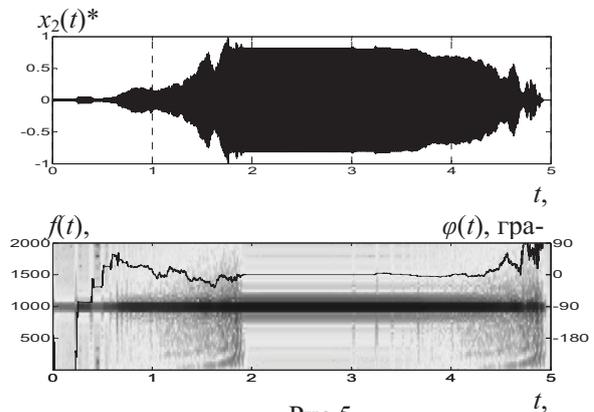


Рис.5

На рис.4 – детальные картины первых двух лучевых вступлений. Посередине – реализация импульса, сверху - синхронная картина увеличенных фрагментов рис.2. Для объективного анализа изменения фазы выходного сигнала, с последним была проведена операция фазового детектирования [10], полученная фазовая функция  $\varphi(t)$  – на рис.4 снизу.

Рассмотрим рис.4, первая четверка (слева). Последовательные вступления лучей четверки практически ступенчато изменяют фазу и амплитуду колебания, причем амплитуда установившегося колебания здесь становится меньше амплитуды, наблюдаемой после прихода первого луча. Фазовая функция во второй четверке - рис.4, справа, более стабильна, разность фаз колебаний между первым и четвертым лучами заключена в пределах  $90^\circ$ , вследствие чего амплитуда процесса возрастает. Ступенчатый характер ППВКЛ и ППВЫКЛ, следующий из лучевых (кинематических) представлений, подтверждается, кроме изменений амплитуды сигнала, рассчитанных с учетом сдвига фаз луча при его отражении от поверхности и касании каустики. Реальная фаза колебания отличается от теоретической из-за флуктуаций скорости звука вдоль луча [1,2].

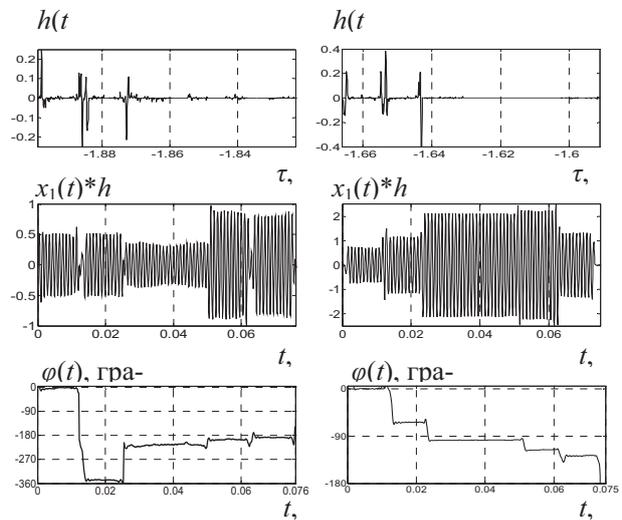


Рис.4.

На рис.5 – реализация, спектрограмма и фазовая функция отклика на сигнал  $x_2 = \sin(2\pi 1000t)$  – квазимонохроматический высокочастотный импульс длительностью 3с. В начале ППВКЛ следуют уверенно разделяемые лучевые вступления со вспышками спектра и ступенчатой фазовой функцией. Моменты прихода приосевых лучей случайны – здесь фазовая функция непрерывна и хаотична (диапазон изменения фазы  $180^\circ$ ), случайно меняется и амплитуда сигнала. Закон дисперсии мод более стабилен, поэтому с моментов вступления импульсов, распространяющихся с групповыми скоростями мод ( $\approx 1.6c$ ) флюктуации фазы уменьшаются, амплитуда суммарного сигнала монотонно возрастает. Затем, до начала ППВЫКЛ следует неискаженная часть импульса. ППВЫКЛ развивается иначе. Первоначально фазовая функция тоже ступенчатая, но последовательное выключение каждого из массы лучей, формирующих импульс, приводит к малому изменению фазы и амплитуды суммарного колебания, до тех пор, пока процесс выключения лучей не приобретает лавинообразный характер. Следует отметить симметрию ППВКЛ и ППВЫКЛ на этом временном интервале. В конце ППВЫКЛ «отключаются» моды, но поскольку основная частота уже успела «уйти вперед», и осталась только широкополосная часть спектра, амплитуда реализации снова кратковременно возрастает, а фаза процесса имеет случайный характер.

На рис.6 – реализация, спектрограмма и фазовая функция отклика на сигнал  $x_3 = \sin(2\pi 10t)$  – импульс длительностью 3с, частота которого лишь ненамного больше критической частоты первой моды. Вклад лучей в формирование такого сигнала мал, и на первом этапе ППВКЛ (до  $t \approx 1.2c$ ) вступления лучей проявляются в ряде быстрых изменений фазы импульса, диапазон которых не превышает  $\pi/2$ . На втором этапе ППВКЛ вступают высокочастотные составляющие импульса, распространяющиеся с групповыми скоростями мод. Затем, до начала ППВЫКЛ следует неискаженная часть импульса без фазовых искажений. ППВЫКЛ развивается аналогично сигналу  $x_3$ , однако еще более заметно отставание высокочастотных компонент от основной частоты.

Модовая структура акустического поля выявляется при рассмотрении отклика канала на ОЛЧМ сигнал  $x_4 = \sin(2\pi(100-45t)t)$  длительностью 1 с, показанный на рис.7. Закон изменения частоты в сигнале  $x_4$  (негативная линейная частотная модуляция, фазовая функция такого сигнала представляет квадратичную параболу) приблизительно обратен закону дисперсии групповой скорости мод. Вследствие компенсации внутримодовой дисперсии должно происходить частичное сжатие во времени всех модовых импульсов, а одного – в особенности. На реализации и спектрограмме различаются 1+5 сжатых импульсов с «колоколообразной» огибающей амплитуды, соответствующих различным модам. На фазовой функции отклика в облас-

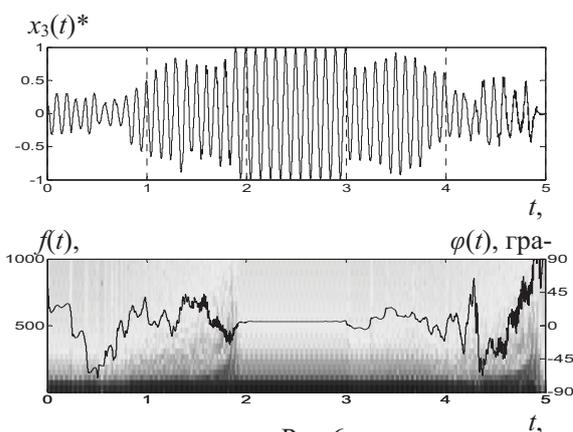


Рис.6

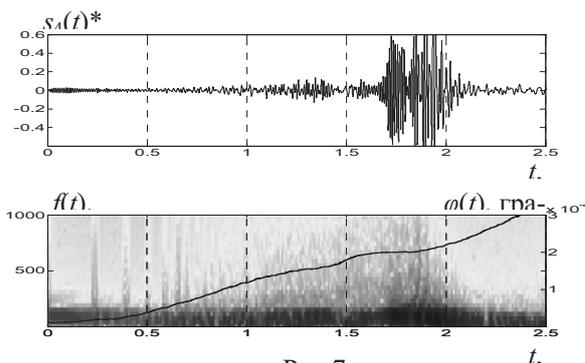


Рис.7.

тях, где происходит сжатие сигнала - почти горизонтальные участки, соответствующие постоянной частоте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особый характер проявления дисперсионных искажений импульсных сигналов в ПЗК, в отличие от мелкого моря приводит к «двухэтапности» переходных процессов включения и выключения. На первом этапе фазовые искажения возникают синхронно со вступлением лучей, вследствие чего изменение амплитуды имеет ступенчатый характер. На втором этапе лучевые и модовые вступления неразделимы, а фазовые искажения и изменение амплитуды сигнала непрерывны. Для описания второго этапа переходного процесса лучевая теория уже неприменима.

Черноморский ПЗК на низких частотах (<100 Гц) аналогичен приповерхностному каналу мелкого моря. Переходные процессы для импульсов, центральная частота которых лежит в этом диапазоне частот формируется составляющими, рефрагировавшими в глубинных слоях канала.

Записи звука взрывных источников как в мелком, так в глубоком море являются ценным первичным экспериментальным материалом, позволяющим моделировать частотно-временную структуру сигналов с различными видами внутриимпульсной модуляции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Студеничник Н.В. Энергетические и пространственно-временные характеристики звукового поля в подводном звуковом канале Черного моря / Н.В.Студеничник // Акуст.журн. – 2003. - Т.49.- №.2.- С.250-251.
2. Вадов Р.А. Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия / Р.А. Вадов // Акуст. журн.- 2007.- Т.53.- №.3.- С.313-328.
3. Бреховских Л.М. Теоретические основы акустики океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов – М.: Наука, 2007.- 370с.
4. Вадов. Р.А. Структура звукового поля точечного источника в подводном звуковом канале Черного моря / Р.А. Вадов // Акуст. журн.- 1998.- Т.44.- №.6.- С.769-756.
5. Лаврентьев Э.В. Взрывы в море / Э. В. Лаврентьев, О. И. Кузян. - Л.: «Судостроение», 1977. - 155с.
6. Krieger J.R Acoustic signals of underwater explosions near surfaces / J.R. Krieger, G.L. Chahine // J. Acoust. Soc. Am. – 2005. - Vol. 118, November. - P.2961-2974.
7. База наблюдений сигналов взрывных источников в океане: <http://www.akin.ru/spravka.htm>
8. Богушевич В.К. О спектре интервалов времени между двумя последовательно приходящими сигналами в подводном звуковом канале / В.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа // Акустичний симпозіум “Консонанс - 2005”. Збірник праць – Київ: Інститут гідромеханіки НАН України, 2005, С.97-102.
9. Студеничник Н.В. Пространственно-временная структура низкочастотного поля в ПЗК / Н.В.Студеничник // Акуст.журн. – 2002. - Т.48.- №.5.- С.675-683.
10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2007. – 751с.