

О СПЕКТРЕ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПРИХОДЯЩИМИ СИГНАЛАМИ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

В.К. Богусевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа

*Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины,
г. Одесса*

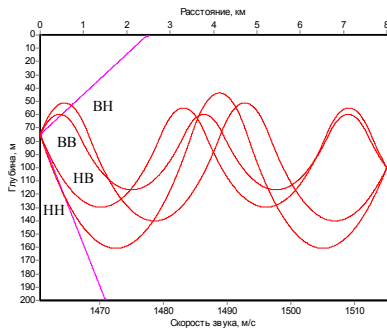
Предлагается новая форма представления временной структуры сигнала в подводном звуковом канале (ПЗК) – спектр интервалов времени между последовательно приходящими сигналами. Спектр интервалов времени позволяет выделить последовательности интервалов времени между приходом пар четырех семейств водных лучей. Исследуется зависимость изменения последовательностей интервалов от глубины размещения излучателя и приемника. Обсуждается возможность использования спектра интервалов времени для достижения оптимальной временной структуры сигнала в точке приема для задач гидроакустики в условиях ПЗК Черного моря.

The new form of representation of signal time structure in underwater sound channel as a spectrum of time intervals between consistently arrived signals is offered. The time interval spectrum allows separating the sequences of time intervals between arrivals of pairs of four water ray families. The time interval sequences dependence on depth of a source and a receiver placement is investigated. The possibility of using of the time interval spectrum for achievement of optimal signal time structure in a point of reception for hydroacoustics problems in conditions of Black sea underwater sound channel is discussed.

С точки зрения лучевой акустики при излучении достаточно короткого одиночного импульса сигнал в точке приема представляет собой последовательность элементарных сигналов, приходящих по разрешенным лучам через определенные интервалы времени. Временная структура сигнала в ПЗК исследовалась в виде зависимости разности времени прихода в точку наблюдения сигналов по лучам четырех семейств от расстояния [1] и времени прихода элементарного сигнала от расстояния и глубины [1-3]. Времени прихода также ставятся в соответствие характеристики траектории луча [4]. Здесь предлагается новое представление временной структуры сигнала – в виде спектра интервалов времени между последовательно приходящими в точку приема сигналами, которое оказывается полезным при решении задач информационной гидроакустики.

СПЕКТР ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим временную структуру водных лучей в билинейном, однородном ПЗК. В соответствии с классификацией [1], в точку приема сигналы приходят по лучам четырех семейств: НН (луч выходит из излучателя вниз и приходит на приемник снизу), ВВ (луч выходит вверх и приходит сверху), НВ (луч выходит вниз и приходит сверху) и ВН (луч выходит вверх и приходит снизу). На рис. 1 показан ход лучей в ПЗК между излучателем и приемником, когда градиент скорости звука выше оси канала больше, чем ниже оси. Расстояние, проходимое лучом, состоит из трех составляющих: целого числа N полных циклов (время пробега полного цикла T_u); пути от излучателя до точки заворота (время пробега $t(z_u)$); пути от точки заворота до приемника (время пробега $t(z_{np})$). Полное время распространения по лучам четырех семейств ВН, ВВ, НН, НВ составляет, [5]:



$$\begin{aligned}
 t_{BH} &= NT_u \pm t(z_u) \mp t(z_{np}), \quad N = 0, 1, 2, \dots \\
 t_{BB} &= NT_u \pm t(z_u) \pm t(z_{np}), \\
 t_{HH} &= (N + 1)T_u \mp t(z_u) \mp t(z_{np}), \\
 t_{HB} &= (N + 1)T_u \mp t(z_u) \pm t(z_{np}),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Верхний знак в выражениях (1) соответствует случаю $z_u > z_{np}$, нижний – $z_u < z_{np}$.

Рис. 1

Рассмотрим спектр интервалов времени в виде диаграммы, показывающей зависимость интервала времени прихода сигналов по соседним лучам от номера прихода пары лучей при фиксированном расстоянии и глубине излучателя и приемника. Ось ординат соответствует интервалам времени, $\mathcal{G}_{m,n}$, а ось абсцисс – номерам интервалов, $i = 1, 2, 3, \dots$. Т.к. в однозначном волноводе сигналы приходят в порядке возрастания числа циклов, то и интервалы времени зависят от числа циклов m и n лучей, участвующих в их формировании:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}_{BH-HH(m,n)} &= t_{BH(m)} - t_{HH(n)}, & \mathcal{G}_{HB-BH(m,n)} &= t_{HB(m)} - t_{BH(n)}, \\
 \mathcal{G}_{BB-HB(m,n)} &= t_{BB(m)} - t_{HB(n)}, & \mathcal{G}_{HH-BB(m,n)} &= t_{HH(m)} - t_{BB(n)}, \\
 \mathcal{G}_{BB-HH(m,n)} &= t_{BB(m)} - t_{HH(n)}, & \mathcal{G}_{BH-BB(m,n)} &= t_{BH(m)} - t_{BB(n)}, \\
 \mathcal{G}_{BH-HB(m,n)} &= t_{BH(m)} - t_{HB(n)}, & \mathcal{G}_{BB-BH(m,n)} &= t_{BB(m)} - t_{BH(n)}, \\
 \mathcal{G}_{HH-BH(m,n)} &= t_{HH(m)} - t_{BH(n)}.
 \end{aligned}$$

В общем случае $m = n$ либо $m = n + 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$. В качестве группы интервалов времени рассматриваются четыре интервала, сформированные лучами одной четверки и первым лучом следующей или лучами одной четверки и крайними лучами соседних четверок (исключение составляет переходная группа, в которой этот порядок нарушается). Номер интервала связан с числом циклов лучей, образующих интервал. Совокупность интервалов времени, состоящая из разности времен пробега сигналов по лучам одних и тех же семейств со всеми числами циклов, рассматривается как последовательность интервалов. Например, последовательность \mathcal{G}_{BB-HH} составляют интервалы времени прихода всех лучей семейства ВВ и НН, $\mathcal{G}_{BB-HH(m,n)}$. Спектр интервалов зависит от положения излучателя и приемника: выделяются последовательности интервалов между приходом лучей одних и тех же пар семейств; изменяются величины интервалов в последовательностях и в пределах группы и состав группы интервалов. Вид спектра определяется интервалом времени прихода лучей одной четверки, $t_{BB(n)} - t_{HH(n)}$, и интервалом между соседними лучами одноименных семейств $t_{HH(n+1)} - t_{HH(n)}$. Интервал между границами соседних четверок $t_{HH(n+1)} - t_{BB(n)}$ может быть, как положительным (семейства разделяются во времени), так и отрицательным (семейства перекрываются).

Рассмотрим спектр интервалов для билинейного ПЗК с глубиной оси 75 м, аппроксимирующего ПЗК в районе материкового склона северо-западной части Черного моря летом (см. рис. 1), в зависимости от положения излучателя и приемника. По результатам расчета лучевой структуры на расстоянии 50 км для фиксированного положения излучателя и приемника сформирована возрастающая последовательность времен прихода элементарных сигналов, каждому времени прихода поставлено в соответствие семейство лучей, и, наконец, рассчитаны интервалы времени между

приходом лучей соседних семейств. Спектр интервалов определяется тем, в какую сторону относительно оси ПЗК происходит изменение глубины излучателя и приемника.

Спектр интервалов времени при одинаковой глубине излучателя и приемника

В качестве исходного (Спектр I) рассмотрим спектр интервалов времени при размещении излучателя и приемника на оси ($z_u = z_{np} = 75$ м), рис. 2а. Каждая последовательность интервалов прихода сигналов по лучам соседних семейств показана своим цветом. Порядок прихода лучей с текущим числом циклов j следующий: НН, ВН, НВ, ВВ: $t_{НН(j)} < (t_{ВН(j)} = t_{НВ(j)}) < t_{ВВ(j)}$. Этому условию соответствует порядок интервалов в группе: $\mathcal{G}_{ВН-НН(j,j)} = t_{ВН(j)} - t_{НН(j)}$, $\mathcal{G}_{НВ-ВН(j,j)} = t_{НВ(j)} - t_{ВН(j)}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НВ(j,j)} = t_{ВВ(j)} - t_{НВ(j)}$, $\mathcal{G}_{НН-ВВ(j+1,j)} = t_{НН(j+1)} - t_{ВВ(j)}$. Последовательность $\mathcal{G}_{НВ-ВН}$, сформированная лучами семейств с одинаковым временем прихода и целым числом циклов, присутствует во всех спектрах при $z_u = z_{np}$. Ее номера интервалов: $i_{НВ-ВН}^l = 4k + 2$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, числа циклов $j^l = N_{\min} + (i_{НВ-ВН} - 2)/4$ (для $r = 50$ км $N_{\min} = 9$). С ростом j все последовательности интервалов монотонно убывают, а наибольшие значения имеет последовательность $\mathcal{G}_{НН-ВВ}$.

При глубине излучателя и приемника выше оси сохраняются группы интервалов, аналогичные Спектру I. С уменьшением глубины $z_u = z_{np}$ значения интервалов в последовательностях $\mathcal{G}_{НН-ВВ}$ увеличиваются, а $\mathcal{G}_{ВН-НН}$ и $\mathcal{G}_{ВВ-НВ}$ уменьшаются. Из этого следует, что уменьшается интервал, в течение которого приходят лучи одной четверки, что и приводит к увеличению интервала между крайними лучами соседних семейств, $\mathcal{G}_{НН-ВВ(j+1,j)} = t_{НН(j+1)} - t_{ВВ(j)}$.

В случае смещения излучателя и приемника вниз от оси спектр изменяется. Интервал, занимаемый четверкой, расширяется, что приводит к наложению четверок при некотором значении j . Состав группы, идентичный Спектру I, сохраняется, формируется переходная группа и далее новая, либо сразу появляется новый состав группы.

Первый случай соответствует спектру с двумя группами и одной переходной, рис. 2б для $z_u = z_{np} = 90$ м. Первая группа интервалов совпадает с составом группы Спектра I до $j = 11$. Переходная группа состоит из интервалов $\mathcal{G}_{ВН-НН(j,j)}$, $\mathcal{G}_{НВ-ВН(j,j)}$, $\mathcal{G}_{НН-НВ(j+1,j)}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НН(j+1,j+1)}$, для нее $t_{НН(j)} < (t_{ВН(j)} = t_{НВ(j)}) < t_{НН(j+1)} < t_{ВВ(j+1)}$. При $j > 12$ формируется новый состав группы: $\mathcal{G}_{ВН-ВВ(j+1,j)}$, $\mathcal{G}_{НВ-ВН(j+1,j+1)}$, $\mathcal{G}_{НН-НВ(j+2,j+1)}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НН(j+1,j+2)}$, связанный с изменением времени пробега по лучам семейств, когда выполняется условие $t_{ВВ(j)} < (t_{ВН(j+1)} = t_{НВ(j+1)}) < t_{НН(j+2)}$. Последовательность $\mathcal{G}_{НВ-ВН}$ имеет номера $i_{НВ-ВН}^l = i_{НВ-ВН}^l$ и числа циклов $j = j^l$. Монотонно убывающие последовательности составляют пары: $\mathcal{G}_{ВН-НН}$ и $\mathcal{G}_{ВН-ВВ}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НВ}$ и $\mathcal{G}_{НН-НВ}$. Интервалы в последовательностях $\mathcal{G}_{НН-ВВ}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НН}$ изменяются не монотонно. С ростом числа циклов $\mathcal{G}_{НН-ВВ}$ уменьшаются: $t_{ВВ(j)} < t_{НН(j)}$ при $j \leq 11$, а $\mathcal{G}_{ВВ-НН}$ сначала увеличиваются, затем уменьшаются: $t_{НН(j)} < t_{ВВ(j)}$ при $j > 12$.

Второй случай, спектра с новой группой, показан на рис. 2в, $z_u = z_{np} = 100$ м. Изменение состава группы интервалов связано с новым порядком прихода лучей: ВН, НВ, НН, ВВ и изменением соотношения времен: $(t_{ВН(j+1)} = t_{НВ(j+1)}) < t_{НН(j+2)} < t_{ВВ(j+1)}$. Группа интервалов имеет состав: $\mathcal{G}_{НВ-ВН(j+1,j+1)}$, $\mathcal{G}_{НН-НВ(j+2,j+1)}$, $\mathcal{G}_{ВВ-НН(j+1,j+2)}$, $\mathcal{G}_{ВН-ВВ(j+2,j+1)}$. В $\mathcal{G}_{НВ-ВН}$

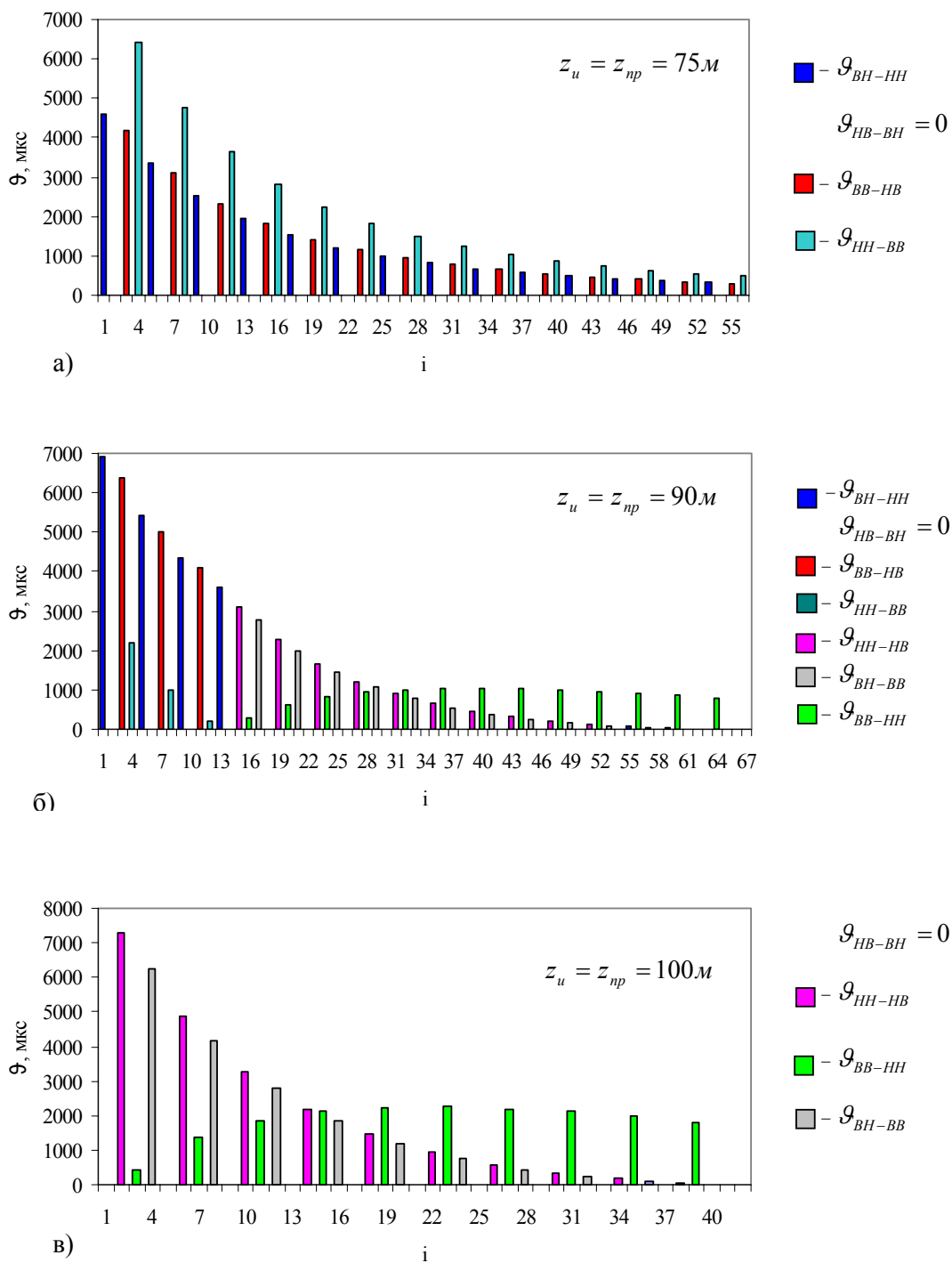


Рис. 2

номера интервалов $i_{HB-BH} = 4k + 1$, числа циклов $j = N_{\min} + (i_{HB-BH} - 1)/4$. ϕ_{HH-HB} и ϕ_{BH-BB} монотонно убывают, а значения ϕ_{BB-HH} возрастают до максимума при $j = 14$ и далее уменьшаются. С ростом глубины излучателя и приемника значения интервалов в последовательностях ϕ_{BB-HH} становятся больше, а ϕ_{HH-HB} и ϕ_{BH-BB} меньше.

Спектр интервалов времени при изменении глубины приемника

Рассмотрим случай $z_u = 75 \text{ м} = \text{const}$. Если $z_u \neq z_{np}$, спектр, нулевые составляющие в котором отсутствуют (рис. 3), определяется тем, выше или ниже оси ПЗК находится приемник. В первом случае интервал, занимаемый четверкой, сужается, во втором – расширяется.

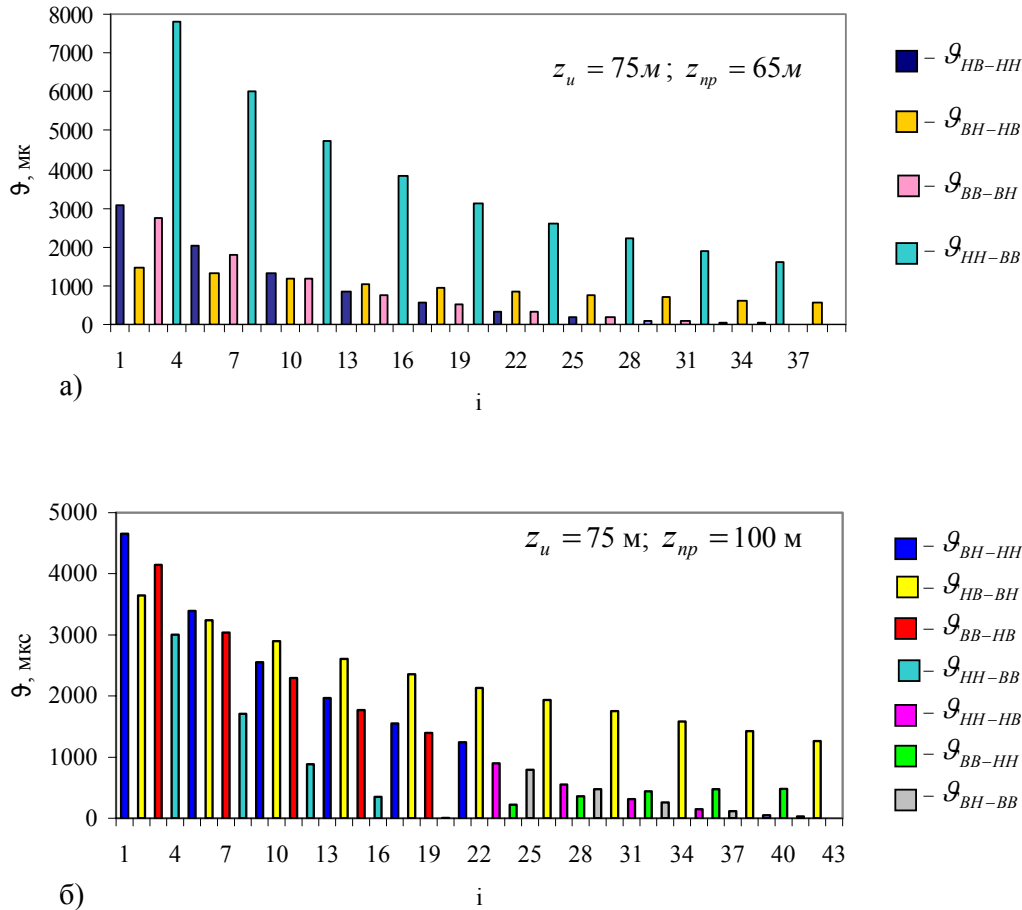


Рис. 3

При положении приемника выше оси спектр интервалов состоит из групп $\mathcal{G}_{HB-HH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{BH-HB(j,j)}$, $\mathcal{G}_{BB-BH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{HH-BB(j+1,j)}$ при условии соотношения времен пробега по лучам семейств: $t_{HH(j)} < t_{HB(j)} < t_{BH(j)} < t_{BB(j)} < t_{HH(j+1)}$. На рис. 3а приведен спектр для случая $z_{np} = 65 \text{ м}$: $i_{BH-HB} = 4k + 2$. Все последовательности с ростом числа циклов монотонно убывают, а наибольшие значения имеет \mathcal{G}_{HH-BB} . При уменьшении глубины приемника происходит увеличение интервалов в последовательности \mathcal{G}_{HH-BB} , \mathcal{G}_{BH-HB} и уменьшение в последовательностях \mathcal{G}_{HB-HH} , \mathcal{G}_{BB-BH} , так как $t_{HH(j)}$ увеличивается, а $t_{BB(j)}$ уменьшается.

Иной спектр интервалов наблюдается при глубине приемника ниже оси ПЗК. На рис. 3б приведен спектр при $z_{np} = 100 \text{ м}$: $i_{HB-BH} = 2 + 4k$. Он сформирован группой $\mathcal{G}_{BH-HH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{HB-BH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{BB-HB(j,j)}$, $\mathcal{G}_{HH-BB(j+1,j)}$ до $j = 13$: $t_{HH(j)} < t_{BH(j)} < t_{HB(j)} < t_{BB(j)}$. Затем

следует переходная группа $\mathcal{G}_{BH-HH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{HB-BH(j,j)}$, $\mathcal{G}_{HH-HB(j+1,j)}$, $\mathcal{G}_{BB-HH(j,j+1)}$: $t_{HH(j)} < t_{BH(j)} < t_{HB(j)} < t_{HH(j+1)}$. При $j > 14$ формируется новая группа $\mathcal{G}_{BH-BB(j+1,j)}$, $\mathcal{G}_{HB-BH(j+1,j+1)}$, $\mathcal{G}_{HH-HB(j+2,j+1)}$, $\mathcal{G}_{BB-HH(j+2,j+2)}$: $t_{BB(j)} < t_{BH(j+1)} < t_{HB(j+1)} < t_{HH(j+2)}$. Пара последовательностей \mathcal{G}_{BH-HH} , \mathcal{G}_{BH-BB} рассматривается как одна, так же, как пара \mathcal{G}_{BB-HB} , \mathcal{G}_{HH-HB} . Эти последовательности и \mathcal{G}_{HB-BH} монотонно убывают с ростом числа циклов. В отличие от них интервалы в последовательности \mathcal{G}_{HH-BB} затухают до переходной группы, а затем появляется последовательность \mathcal{G}_{BB-HH} , в которой значения интервалов возрастают, достигают максимума и начинают уменьшаться. При увеличении глубины приемника значения интервалов в монотонных последовательностях \mathcal{G}_{HB-BH} и \mathcal{G}_{BH-HH} , \mathcal{G}_{BH-BB} увеличиваются, а в \mathcal{G}_{BB-HB} , \mathcal{G}_{HH-HB} уменьшаются, что связано с уменьшением $t_{HH(j)}$ и увеличением $t_{BB(j)}$.

Зависимость спектра интервалов от глубины размещения приемо-передающих систем позволяет использовать спектры для получения заданной временной структуры принимаемого сигнала. В частности, соответствующий выбор глубины размещения излучателя и приемника позволяет получить требуемое количество приходов элементарных сигналов с заданными интервалами, позволяющими осуществить их временное разрешение и обеспечить необходимую лучевую структуру, с этой целью и были использованы спектры интервалов в задаче лучевого зондирования водной среды [6].

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к представлению временной структуры сигнала в однозначном ПЗК в виде спектра интервалов времени между последовательно приходящими сигналами по лучам семейств водных лучей. Спектр интервалов времени позволяет выделять последовательности интервалов между приходом сигналов по лучам отдельных семейств. Зависимость спектра интервалов от глубины излучателя и приемника демонстрирует формирование групп интервалов между приходом лучей соседних семейств, изменение их состава с ростом числа циклов и значений интервалов в последовательностях, сформированных лучами определенных пар семейств. Спектр интервалов позволяет получить оптимальную временную структуру сигнала (например, интервалы времени заданной величины) в задачах информационной гидроакустики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акустика океана/ Под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974. – 692 с.
2. В.А. Апанасенко. О временных соотношениях между импульсами, распространяющимися по различным лучам в подводном звуковом канале// Акуст. ж. – 1965. – **11**, №3. – С. 300-305.
3. F. J. Beron-Vera, M. G. Brown. Travel time stability in weakly range-dependent sound channels// J. Acoust. Soc. Am. – 2004. – **115**, №3. – P.1068-1077.
4. E.K. Skarsoulis, B. D. Cournuelle. Travel time sensitivity kernels in ocean acoustic tomography// J. Acoust. Soc. Am. – 2004. – **116**, №1. – P.227-238.
5. Л.М. Бреховских. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 292 с.
6. Исследовать процессы распространения и рассеяния гидроакустических сигналов в подводном и приповерхностном звуковых каналах (ПЗК и ППЗК) Черного моря с целью решения задач выявления динамических образований: Отчет о НИР/ Отделение гидроакустики МГИ НАНУ. – №ГР0199U001197; инв. №148. – Одесса, 2003. – 420 с.