АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2009, том 55, № 2, с. 188–192

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.23

ПРОБЛЕМЫ ФАЗИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК ГИДРОФОНОВ, ЛЕЖАЩИХ НА ДНЕ МЕЛКОВОДНОГО РАЙОНА ОКЕАНА

© 2009 г. О. П. Галкин, А. В. Гринюк*, В. Н. Кравченко*, Р. Ю. Попов, Ю. В. Семенов, Ю. И. Тужилкин

Акустический институт им. акад.Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул.Шверника, 4
E-mail:galkin@akin.ru
** Научно-исследовательский институт «Атолл»,*
141981 Дубна Московской обл., ул. Приборостроителей, 5
E-mai: kvn@ atoll.ru

Поступила в редакцию 3.05.07 г.

Рассмотрен вопрос о фазировании линейных донных цепочек гидрофонов в Баренцевом море. Использованы результаты натурного эксперимента. В качестве импульсного источника звука применялась пневмопушка, прием проводился на три цепочки, разнесенные между собой. Получена оценка пространственного интервала корреляции сигнала на их апертуре. Проведено сравнение выходных откликов цепочек с учетом и без учета интервалов пространственной корреляции звукового поля.

PACS: 43.30.Cq

Часто в качестве приемных антенн различных гидроакустических устройств в мелководных районах океана используются лежащие на дне прямолинейные цепочки гидрофонов. Привлекательность таких систем заключается в относительной дешевизне изготовления и простоте их постановки. Однако азимутальные углы на источник звука могут изменяться в широких пределах, и возникает проблема возможности фазировки таких цепочек, которая связана с характеристиками пространственной когерентности звуковых полей в выбранном районе. Фазировка цепочки гидрофонов, размещенной в волноводе, заключается в приведении фазы суммарного многолучевого сигнала на гидрофонах путем введения одной предполагаемой средневзвешенной временной задержки.

Решение этой проблемы и является целью данной работы. Эксперимент, результаты которого приводятся, выполнялся в средней части Баренцевого моря. В качестве источника звука использовалась пневмопушка, которая излучала импульсные сигналы. Ее глубина составляла ~10 м; средняя частота сигнала – ~21 Гц; полоса частот – 6 Гц. Прием сигналов производился тремя донными линейными цепочками гидрофонов. Каждая цепочка, длина которой ~1000 м, содержала гидрофоны, расположенные приблизительно через половину длины звуковой волны λ. Фазовые центры всех цепочек находились от излучателя на расстояниях примерно от 30 км до 55 км. Исследования были направлены на оценку интервала корреляции сигналов на апертуре цепочек, расположенных под разными азимутальными углами на источник звука.

На рис.1 представлена типичная зависимость скорости звука от глубины для начала октября, когда проводился эксперимент. Согласно данному профилю скорости звука, сигналы, достигающие дна в месте расположения приемных систем,

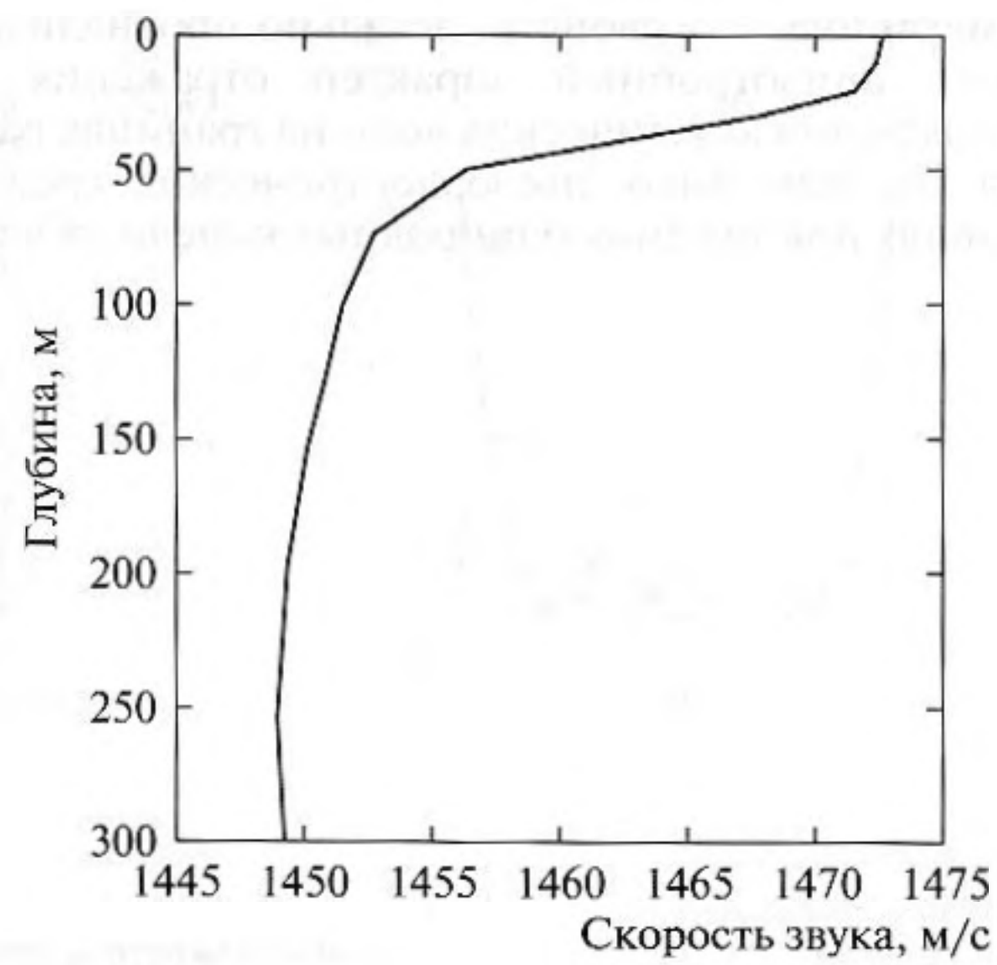

Рис. 1. Зависимость скорости звука от глубины.

приходят по лучам с углами скольжения не менее ~9°.

Глубина волновода до каждой из цепочек изменялась по-разному вдоль трасс распространения сигналов, но в относительно небольших пределах с точки зрения характеристик звукового поля. Максимальное изменение глубины (от ~250 м до ~330 м) происходило на 55-ти километровой трассе. Если оценить средний угол наклона дна, то он составляет всего $\chi = 5'$. Как известно, при таких наклонах ($D/M \ll 1$, где D и M характеризуют масштаб изменения длины цикла луча и глубины места) длина циклов лучей практически не изменяется и взаимодействие мод не происходит [1].

Типичный вид сигнала, принимаемого одним из гидрофонов цепочек, представлен на рис. 2. Как видно, принимаемый сигнал значительно превышает уровень помех (справа и слева от сигнала), а длительность его достигает ~8 с.

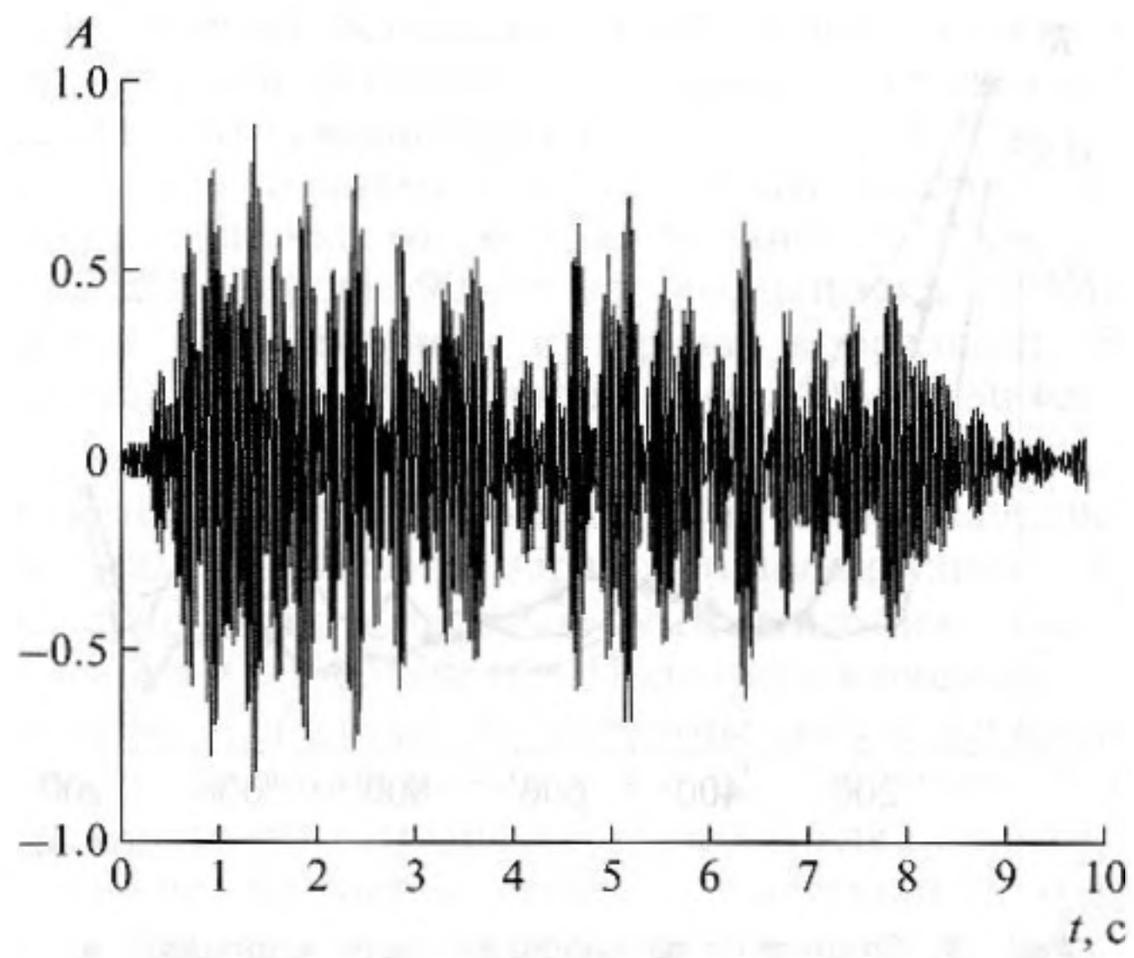

Рис. 2. Вид сигнала, принимаемого одним из гидрофонов цепочек. A – звуковое давление в условных единицах.

В условиях эксперимента вклады стохастических процессов в корреляционные характеристики полей (случайные флуктуации звуковых полей, обусловленные термическими неоднородностями среды, внутренними волнами, волнением морской поверхности и др.) не играли существенной роли. В частности, в работе [2] на основе экспериментальных материалов, полученных в Баренцевом море (практически в том же районе), было показано, что влияние стохастических процессов начинает сказываться на частотах выше ~250 Гц и на дистанциях, превышающих 60 км. Расчетные оценки также подтверждают эти выводы. Как известно [3], оценку интенсивности флуктуации времени распространения сигналов, обусловленные неоднородностями среды, можно получить по формуле (оценка сверху, т.к. предполагается, что весь волновод заполнен неоднородностями):

$$\sigma_\tau = \left(\frac{\pi^{\frac{1}{2}}}{2c^2}\langle\mu^2\rangle ar\right)^{\frac{1}{2}},$$

где σ_τ – среднеквадратичное значение флуктуации времени распространения; $\langle\mu^2\rangle$ – средний квадрат флуктуаций показателя преломления; a – средний размер случайных неоднородностей среды; c – скорость звука; r – расстояние. Для рассматриваемых трасс, если неоднородности малы ($a = 1.5–1.9$ м, $\langle\mu^2\rangle = (16–22) \times 10^{-10}$), получим $\sigma_\tau = 0.008$ мс. В случае крупных неоднородностей (в мелком море они встречаются крайне редко), $a = 110–115$ м, $\langle\mu^2\rangle = (100–270) \times 10^{-10}$ [4], имеем $\sigma_\tau = 0.21$ мс. В то же время средний период сигнала пневмопушки составляет $T = 48$ мс.

В отличие от глубоководных областей океана, в мелководных районах распространение звука происходит с многократными отражениями от верхней поверхности и дна. Влияние взволнованной поверхности, которая также может приводить к флуктуациям времени прихода сигналов, как свидетельствуют оценки, незначительно. Действительно, модуль коэффициента отражения в зеркальном направлении $|V| = e^{-\frac{P^2}{2}}$, где $P = 2k\sigma\sin\chi$ – параметр Рэлея, k – волновое число, σ – среднеквадратичное отклонение поверхности моря, χ – угол скольжения относительно гладкой поверхности. При 3-х бальном волнении, в условиях которого проводился эксперимент, и угле скольжения $\chi = 10°$, имеем $P = 0.006$, а при $\chi = 20°$ – $P = 0.012$. Следовательно, $|V| = 0.9999 \approx 1$ или $0.9998 \approx 1$ соответственно и отражение происходит как от гладкой поверхности.

Поэтому основное внимание было сконцентрировано на оценке роли многолучевого (многомодового) характера распространения звука, отражающегося на структуре временных и угловых (в вертикальной плоскости) спектров принимаемых сигналов, зависящих от рельефа дна на исследуемых трассах. Изменчивостью именно этих спектров и определяется пространственная когерентность звукового поля в рассматриваемом случае.

При оговоренных выше условиях (частота, полоса частот, расстояние до источника и др.) про-

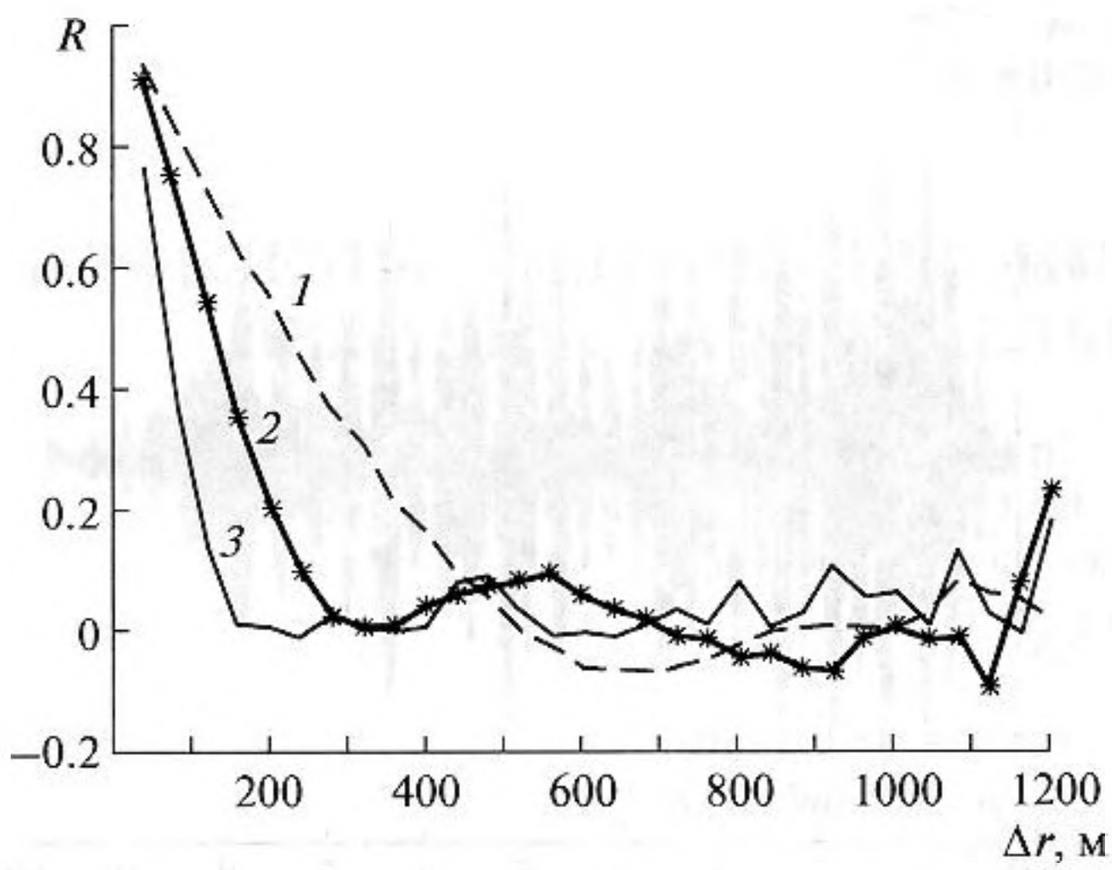

Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции сигналов R, принимаемых различными парами гидрофонов трех цепочек (цифры у кривых) от пространственного интервала Δr между гидрофонами пары.

анализирована возможность фазировки донных линейных цепочек гидрофонов при различных азимутальных углах наблюдения. Когда дистанция от источника до цепочки существенно больше ее длины, а пеленг на источник совпадет с нормалью к цепочке, то последняя параллельна фазовым фронтам сразу всех сигналов, приходящих по отдельным лучам. Несмотря на то, что каждый из них приходит под отличающимися углами в вертикальной плоскости. При этом фазировка не должна вызывать особых затруднений, если не считать возможной изменчивости рельефа дна в районе расположения линейной цепочки. В этом случае ее эффективность максимальная, поскольку структура приходящих многолучевых сигналов на каждом гидрофоне одинакова. В то же время, когда цепочка расположена под значительными углами к направлению на источник, ее фазировка может быть сопряжена с определенными трудностями, поскольку структура многолучевых сигналов, приходящих на разные участки цепочки, будет различной.

Если цепочка гидрофонов сфазирована на приходящие (многолучевые) сигналы, а помеха на апертуре цепочки предполагается δ – коррелированной, то ее эффективность будет максимальной. Под эффективностью Q понимается увеличение отношения сигнал/помеха при суммировании сигналов от всех гидрофонов по сравнению с этим отношением на одиночном гидрофоне, которая тесно связана с различием пространственных интервалов корреляции сигнала и помехи.

Пространственная когерентность звукового поля оценивалась по нормированной функции взаимной корреляции [5]

$$R(t,\tau)=\frac{1}{T}\frac{\int\limits_{t}^{t+T} s_i(\eta)s_j(\eta-\tau)d\eta}{\left[\frac{1}{T}\int\limits_{t}^{t+T} s_i^2(\eta)d\eta\cdot\frac{1}{T}\int\limits_{t}^{t+T} s_j^2(\xi)d\xi\right]^{1/2}},$$

где $s_i(t)=\sum_{n=1}^{N} a_n f_n(t-t_n)$ и $s_j(t)=\sum_{m=1}^{N} a_m f_m(t-t_m)$ – сигналы, принимаемые i-м и j-м гидрофонами цепочки; N – число приходящих многолучевых сигналов; a_n и a_m – амплитуды сигналов; t_n и t_m – время прихода сигнала $f(t)$ по соответствующим лучам; τ – временная задержка одного многолучевого сигнала относительно другого; T – время усреднения.

Как известно, при вычислении корреляции усреднение должно производиться либо по ансамблю реализаций процесса, а это в реальных морских условиях затруднительно, либо по времени T, причем на этом интервале сигнал должен быть стационарным и эргодическим. Учитывая, что время усреднения T конечно, среднеквадратичная ошибка ε, обусловленная "недоусредненностью" сигналов, дается выражением [6]

$$\varepsilon=\frac{1}{\sqrt{2\Delta fT}}\left(1+\frac{1}{R^2}\right)^{1/2}.$$

В рассматриваемом случае (полоса частот $\Delta f\approx 6$ Гц, время усреднения $T=8$ с) получаем: для коэффициента корреляции $R\cong 0.5$, среднеквадратичная ошибка $\varepsilon\cong 0.1$.

Будем считать, что каждая цепочка имеет L гидрофонов. Каждый из них принимает полезный сигнал $s(t)$ (сигнал пневмопушки) и помеху $n(t)$. Выигрыш в отношении интенсивностей сигнала и помехи Q на выходе цепочки, используемой как аддитивная антенна, возникает вследствие того, что полезные сигналы от каждого гидрофона в пределах интервала корреляции можно сложить синфазно, а помеха складывается не когерентно. Если интервал корреляции превышает апертуру цепочки (или равен ей), то выигрыш $Q\cong L$. Однако в общем случае интервал корреляции может составлять лишь часть апертуры, и для оценки выигрыша Q нужно вычислить по экспериментальным данным недиагональные элементы сигнальной корреляционной матрицы, образованные значениями коэффициента корреляции различных пар сигналов, принимаемых гидрофонами. (В силу симметрии функции корреляции можно ограничиться вычислением половины всех недиагональных элементов). Зависимости рис. 3 иллюстрируют для трех линей-

ных цепочек (1, 2 и 3) изменение усредненных значений коэффициента корреляции сигналов, принятых всевозможными парами гидрофонов, с увеличением пространственного интервала между этими гидрофонами. Данные рис. 3 использовались для оценок выигрыша при различной обработке принимаемых сигналов. Каждая точка на кривой является результатом усреднения по различному числу пар гидрофонов на цепочке и, следовательно, максимальное число пар образовано соседними гидрофонами. Пространственный интервал корреляции, естественно, зависит от значения R, когда сигналы еще целесообразно складывать когерентно. Если, например, $R = 0.5$, то на цепочке 1 интервал корреляции составляет ~240 м, а на цепочке 3 – ~80 м.

Рассмотрим более подробно выражения для Q' – отношения интенсивностей сигнала и помехи, после когерентного суммирования сигналов в пределах интервала корреляции, в который попадают только M гидрофонов, $M < L$. Имея в виду сделанные выше предположения о помехе и сигнале, будем считать их статистически независимыми, а их интенсивности s^2 и n^2 одинаковыми для всех гидрофонов цепочки. Тогда отношение Q' можно записать в виде

$$Q' = \frac{\left\langle \left\{ \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M-1} [s_i(t) + n_i(t)] + [s_j(t) + n_j(t)] \right\}^2 \right\rangle}{\left\langle \sum_{i=1}^{M} n^2 \right\rangle},$$

где скобки $\langle ... \rangle$ обозначают усреднение по времени. Легко убедиться, что Q' равно

$$Q' = \frac{s^2}{n^2}\left(1 + \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M-1} R_{i,j}\right) + 1. \quad (1)$$

Если при обработке информации использовать энергетическое суммирование результатов когерентного сложения в пределах интервала корреляции сигнала, перемещая его вдоль цепочки с шагом, равным расстоянию между соседними гидрофонами, то выходное отношение Q_1 для антенны можно оценить как:

$$Q_1 = \left[\frac{s^2}{n^2}\left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M-1} R_{i,j} + 1\right) + 1\right]\sqrt{L - M + 1}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 3, интервал корреляции на различных цепочках различен, т.е. изменяется с азимутальным углом и расстоянием до источника. Определить относительную роль каждого из этих факторов по имеющимся экспериментальным данным затруднительно. По-видимому, преобладает влияние изменения азимутального угла направления на источник. Очевидно, что минимальный интервал корреляции отвечает случаю, когда угол между направлением на источник и нормалью к цепочке равен 90 (цепочка работает как антенна бегущей волны). Когда источник расположен на траверзе цепочки, интервал может составлять всю апертуру. Согласно рис. 3, изменения азимутального угла, отсчитываемого от нормали к цепочке, от ~60 (расстояние $r \approx 30$ км, цепочка 1) до угла ~90° ($r \approx 55$ км, цепочка 3), приводит к изменениям интервала корреляции R, определяемого по уровню 0.5, от 240 м до 80 м.

Как ясно из представленных данных, чем протяженнее интервал корреляции, тем меньше выигрыш от процедуры обработки информации (Q_1) по сравнению с простым суммированием сигналов по всей апертуре (Q). Пользуясь зависимостями рис. 3, значениями указанных выше параметров, и соотношениями (1) и (2), получаем, что увеличение выигрыша ($s^2/n^2 = 0.1$) для цепочки 1 достигает примерно 3 дБ, а для цепочки 3 около 5 дБ. Заметим, что по мере увеличения s^2/n^2 выигрыш для Q_1 несколько уменьшается (до 1.5–2 дБ).

Представленные выше значения коэффициента корреляции были получены при времени усреднения $T = 8$ с, равном длительности принимаемого сигнала, образованного импульсами, распространяющимися по разным лучам. Однако малые значения R при больших расстояниях между гидрофонами не всегда означают плохую когерентность отдельных импульсов. Для ответа на вопрос, какие составляющие приходящего суммарного сигнала и в какой степени коррелированны, следует использовать временное или пространственное разрешение принимаемых импульсов. В описываемом случае имело место разрешение по времени вследствие импульсного излучения. Результаты расчета функции корреляции при времени усреднения $T = 1$ с для гидрофонов, разделенных интервалом ~240 м, представлены на рис. 4. Как видно, модуль коэффициента корреляции $|R|$ достигает максимальных значений ~0.9 и 0.7 в моменты $t \cong 0$ с и $t \cong 6$ с соответственно, однако, знаки его при этом различны. В результате усреднения по всей длительности приходящего сигнала коэффициент корреляции оказывается равным 0.1. Такое же значение коэффициент корреляции будет иметь и при непрерывном излучении. Ясно, что интервал пространственной корреляции сигнала, приходящего по отдельным лучам, может значительно превышать полученный выше.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– эффективность использования линейной цепочки гидрофонов для приема многолучевых сигналов в мелководных районах океана зависит, прежде всего, от изменчивости углового и временного спектров приходящих сигналов на длине цепочки, которая в свою очередь связана с азимутальным углом на источник звука и расстоянием до него;

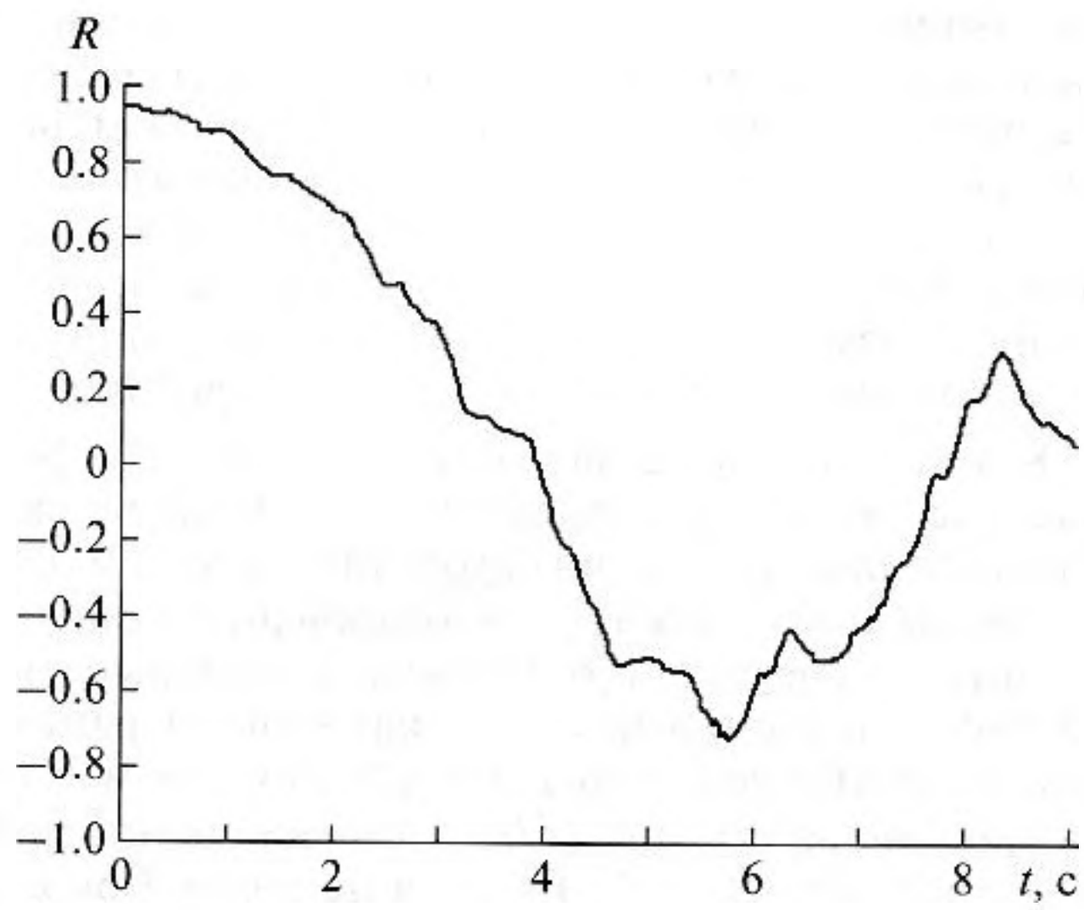

Рис. 4. Изменение со временем нормированной функции корреляции R при усреднении за 1 секунду ($T = 1$ с), составляющим лишь восьмую часть полной длительности приходящего сигнала ($T = 8$ с). Расстояние между гидрофонами ~240 м.

– наиболее просто фазировка цепочки на всей длине при приеме многолучевого сигнала достигается, когда направление на источник близко к направлению нормали к приемной базе;

– когда источник звука значительно удален от направления нормали к цепочке, то фазировка возможна лишь на ограниченных ее участках, размер которых определяется значением интервала пространственной корреляции звукового поля сигнала;

– в последнем случае следует использовать алгоритм обработки, заключающейся в когерентном суммировании сигнала на участках цепочки, равных интервалу пространственной корреляции, и энергетическом сложении результатов когерентной обработки, полученных при перемещении такого участка вдоль всей длины цепочки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана // Гидрометеоиздат. 1982. 264 с.
2. *Галкин О.П., Попов Р.Ю., Симакина Е.В.* Исследование пространственной корреляции звуковых полей от подводных взрывов в Баренцевом море // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 1. С. 37–43.
3. *Чернов Л.А.* Волны в слоисто-неоднородных средах // М. Наука, 1975. 171 с.
4. Акустика океана. М.: Наука, 1974. 695 с.
5. *Колмогоров А.Н.* Корреляция в математической статистике // БСЭ. 1953. Т. 23. С. 55.
6. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир. Пер. с англ., 1983. 312 с.