

УДК 551.463

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ШУМОВОГО СИГНАЛА ПРИ ВРЕМЕННОМ АКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ В АРКТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

© 2002 г. В. М. Кудряшов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 15.02.2001 г.

Рассматривается распространение шумового сигнала в волноводе Арктического типа с изменяющейся гидрологией. Используемые при расчете гидрологические данные различаются профилем солености воды. Исследуется форма огибающей взаимной временной корреляционной функции когерентного сигнала и опорного сигнала. В качестве опорного сигнала используется либо сигнал для формирования шумового портрета излученного сигнала, либо одна из распространяющихся в волноводе мод. Отличительной особенностью подхода является использование взаимной временной корреляции сигналов, прошедших одну и ту же трассу, но с различными гидрологиями. В этом случае по форме огибающей корреляционной функции сигналов можно судить об изменении гидрологии на трассе распространения звука.

Акустические методы применяются при проведении работ по климатическому мониторингу водных масс на протяженных трассах [1–5], для целей подводной навигации, при поиске полезных ископаемых на дне мелководных районов и в ряде других случаев. Акустический мониторинг позволяет оценить интегральное по длине трассы изменение скорости звука в воде, состояние ледового покрова, тогда как непосредственные аппаратные измерения с судов или вертолетов дают точечные и случайные разрезы водных масс, естественно, немногочисленные. Местоположение шумящего подводного объекта в ряде случаев тоже возможно определить только акустическим способом, если наблюдения с воздуха или со спутника затруднены.

В настоящее время в качестве источника звука широко применяются излучатели, генерирующие в воду шумовой сигнал. Широкое применение получили искусственные псевдошумовые сигналы [1–6], сформированные с помощью M – последовательностей (MLS) [1]. Эти сигналы могут быть воспроизведены с высокой точностью. Скоррелированные (по времени) с опорным сигналом, идентичным с излученным, они формируют импульсный отклик волновода, причем импульсы огибающей временной корреляционной функции имеют значительную амплитуду за счет звуковой энергии, накопленной в реализации шумового сигнала большой длительности.

При формировании шумового сигнала можно использовать естественную реализацию шумового стационарного и эргодического процесса.

Этим процессом модулируется звуковое колебание несущей частоты f_0 , в результате чего получаем акустический и опорный сигналы.

В любом случае необходимо иметь “шумовой портрет” источника звука. Полагаем, что среднее по времени значение шумового сигнала (первый статистический момент) равно нулю. Среднее по времени значение интенсивности сигнала не нулевое. На практике используем дисперсию звукового давления. В простейшем варианте напряжение, снятое с антенны, подается на квадратичный детектор и затем усредняется интегратором. Ранее в качестве последнего использовался фильтр низких частот. В современном варианте аналоговые устройства заменены обработкой на ЭВМ.

Звуковое давление узкополосного шумового сигнала запишем в виде

$$P_c(\mathbf{r}, z) = \sqrt{W\Delta f} \sum_{m=1}^M p_m(\mathbf{r})\Phi_m(z)F(t-t_m)\exp(-i\omega_0 t). \quad (1)$$

Каждый член суммы (1) представляет собой нормальную волну [1, 2, 7–9]. Приняты обозначения: \mathbf{r} – векторная горизонтальная координата с началом, совмещенным с акустическим центром источника звука, z – вертикальная координата, ось z направлена вниз, начало ($z=0$) совмещено с уровнем свободной воды. t – время, $\omega = 2\pi f$, f – частота звука, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 – центральная частота (несущая), m – номер волны, W – спектральная плотность энергетического спектра излученного сиг-

нала в полосе 1 Гц, Δf – полоса сигнала, определяемого как полосой излученного сигнала, так и приемным фильтром, $p_m(\mathbf{r})$ характеризует пространственную изменчивость амплитуды и фазы волны, привязанные к единичному уровню излучаемого сигнала, т.е. к уровню

$$P_c \Big|_{R \rightarrow 0} = \frac{\exp(ik_0 R - i\omega_0 t)}{R}, \quad (2)$$

где R – расстояние от акустического центра излучателя. Если параметры волновода не меняются с \mathbf{r} , то

$$p_m(\mathbf{r}) = i\pi\Phi_m(z_0)H_0^{(1)}(\zeta_m r), \quad k_0 = \omega_0/c(z_0), \quad (3)$$

где z_0 – глубина погружения излучателя. $\Phi_m(z)$ – собственная функция волновода [8, 9], соответствующая продольному волновому числу m -й моды ζ_m . Если параметры волновода меняются с \mathbf{r} , то ζ_m является функцией от \mathbf{r} , то же верно относительно $\Phi_m(z)$. Полагая, что изменение $\Phi_m(z)$ с \mathbf{r} происходит достаточно медленно, можно пренебречь обменом энергией между модами разных номеров (рассеянием мод), и звуковое поле описывается адиабатическим приближением [10], тогда выражение вида (3) останется справедливым, но $\zeta_m r$ заменится на $\int_0^r \zeta_m(\eta) d\eta$. $\Phi_m(z)$ при разных \mathbf{r} описывается выражением, известным как собственные функции волновода сравнения [8, 9], т.е. плоско-слоистого волновода, параметры которого совпадают с параметрами рассматриваемого волновода вдоль вертикальной оси, проходящей через точку наблюдения. $\Phi_m(z)$ образует ортонормированную систему [8]. Если условие ортонормированности мод нарушается для мод, рассчитанных для разных \mathbf{r} , то возможно рассеяние мод (обмен энергией между модами). Тогда используем обменное приближение, известное как метод связанных мод [9, 11–13], обычно основанное на принципе вертикальных мод и горизонтальных модовых лучей [10]. Метод достаточно хорошо известен и оформлен в виде программ для ЭВМ, поэтому в данной работе описывать его не будем, отсылая к другим работам [11–13].

Шумовой характер сигналу придает множитель $F(t)$ – случайная стационарная и эргодическая функция времени t .

$$\overline{F(t)} = 0. \quad \overline{F(t)F(t-\tau)} = B(\tau), \quad B(0) = 1.$$

$F(t)$ определяется параметрами источника звука приемного фильтра. Черта сверху означает операцию усреднения по времени [14]. t_m – время распространения моды номера m между корреспондирующими точками. В плоско-слоистом волноводе $t_m = r/v_m$, где v_m – групповая ско-

рость моды [9]. В адиабатическом приближении $t_m = \int_0^r d\eta / v_m(\eta)$.

Сигнал имеет нулевой первый статистический момент по времени, т.е. $\overline{P_c(\mathbf{r}, z)} = 0$. Не нулевой является дисперсия звукового давления и его временная корреляционная функция $K(\mathbf{r}, z, \tau)$, где τ – задержка между сигналами, поступающими на входы коррелятора. В простейшем варианте коррелятор состоит из перемножающего устройства напряжений, поступающих как минимум на два входа, снабженных линиями задержки. Снятый с коррелятора сигнал интегрируется (усредняется) интегратором. На выходе коррелятора получаем детерминированный процесс (корреляционную функцию) и флуктуационную составляющую, дисперсия которой тем меньше, чем больше величина $\Delta f T$, где T – длительность реализации поступающего на коррелятор сигнала. Корреляционная функция тем надежнее выделяется, чем эффективнее подавляется флуктуационная составляющая. Дисперсия последней определяет предел обнаружения полезного сигнала [15–16].

В задачах мониторинга обычно [1] используется метод, когда на один вход коррелятора поступает анализируемый сигнал, а на другой вход поступает сигнал $F(t-\tau)\exp[i\omega_0(t-\tau)]$. В результате детерминированная составляющая выходного сигнала коррелятора принимает вид [17]:

$$K_c(\mathbf{r}, z, \tau) = \sqrt{W\Delta f \text{Re}} \sum_{m=1}^M p_m(\mathbf{r})\Phi_m(z) \times \quad (4) \\ \times B(\tau - t_m) \exp(-i\omega_0\tau).$$

Выражение (4) имеет вид импульсного сигнала, в котором частотный спектр сигнала заменен на энергетический спектр шумового сигнала. Отличие от обычного импульсного отклика волновода состоит только в том, что текущее время t заменено на задержку τ .

На рис. 1а изображен график вертикального профиля скорости $c(z)$, использованный при расчете звукового поля. На рис. 1б приведены вариации $c(z)$, (цифры 1 и 2) этого профиля, соответствующие вариации солёности S приледого слоя воды (1в).

В качестве примера на рис. 2 и 3 построены графики огибающей сигнала (4), рассчитанные для шумового сигнала, имеющего центральную частоту $f_0 = 65$ Гц, полосу частот $\Delta f = 5$ Гц, глубину погружения излучателя и приемника, равных 60 м. Профили скорости звука от дистанции \mathbf{r} не зависят, причем рис. 2 и рис. 3 соответствуют вертикальным профилям скорости звука, помеченным на рис. 1б цифрами 1 и 2 соответственно. Ледовый покров считается двукомпонентным [17], причем доля ровного льда составляет 65%. Ров-

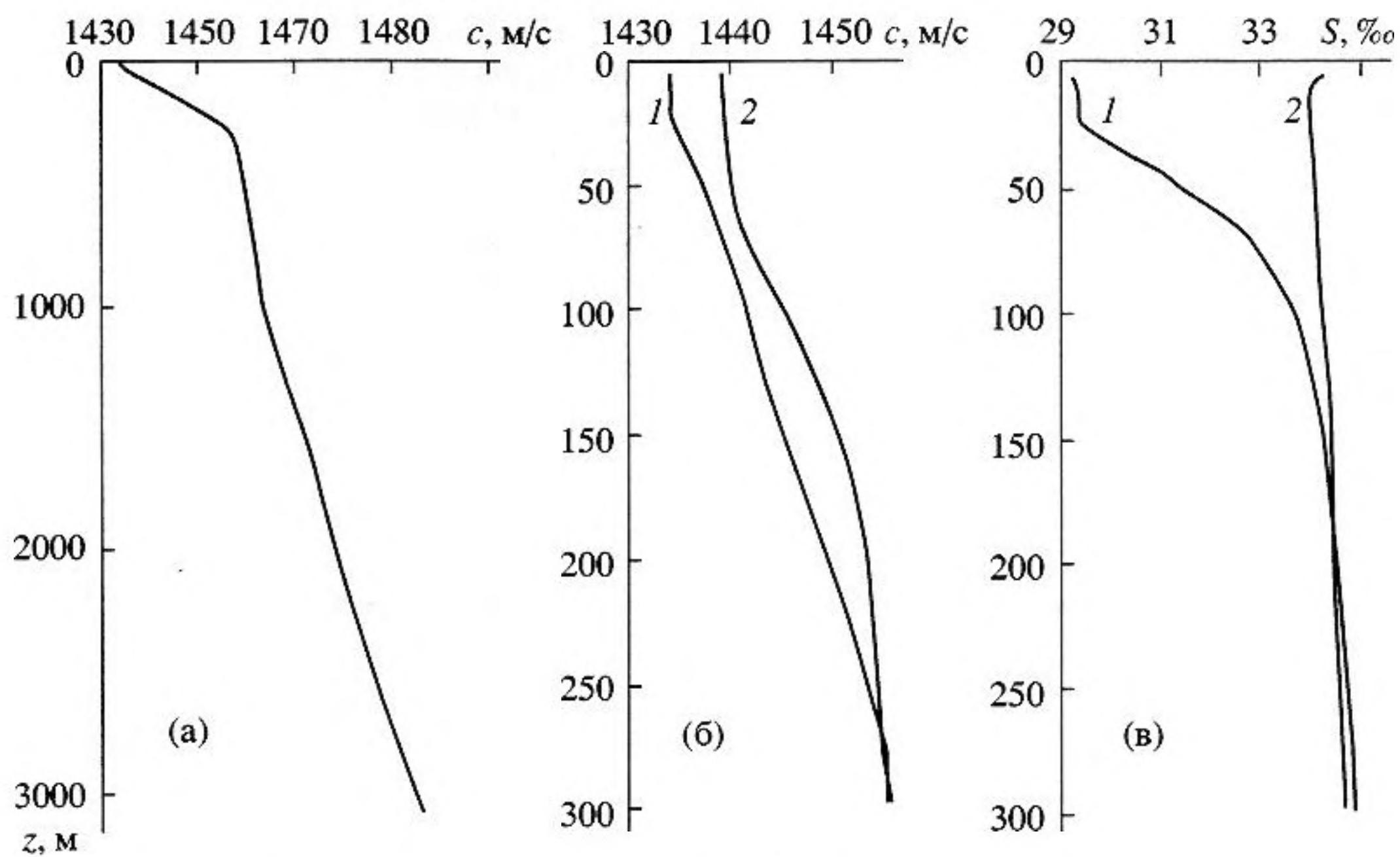


Рис. 1. Профили скорости звука (а), (б) и солёности (в) воды в Арктическом волноводе.

ный лёд имеет среднюю толщину $h_1 = 2.6$ м, корень от среднеквадратичной дисперсии нижней осадки льда σ_1 равен 2.8 м, аналогичная величина, верхней границы льда $\hat{\sigma}_1$ равна 0.4 м, т.е. $\hat{\sigma}_1 = \sigma_1/4.5$. Торосистый лёд имеет среднюю толщину $h_2 = 6.6$ м, $\sigma_2 = 3.3$ м. Масштабы корреляции ровного льда, согласно гистограмме, равны 120 м, а у

торосистого льда 44 м. Скорость продольных волн в материале льда равна $3500(1 - i0.04)$ м/с, скорость сдвиговых волн равна $1800(1 - i0.04)$ м/с, плотность льда относительно плотности воды равна 0.91.

На рис. 2 и 3 представлены графики огибающих временной корреляционной функции (4) для

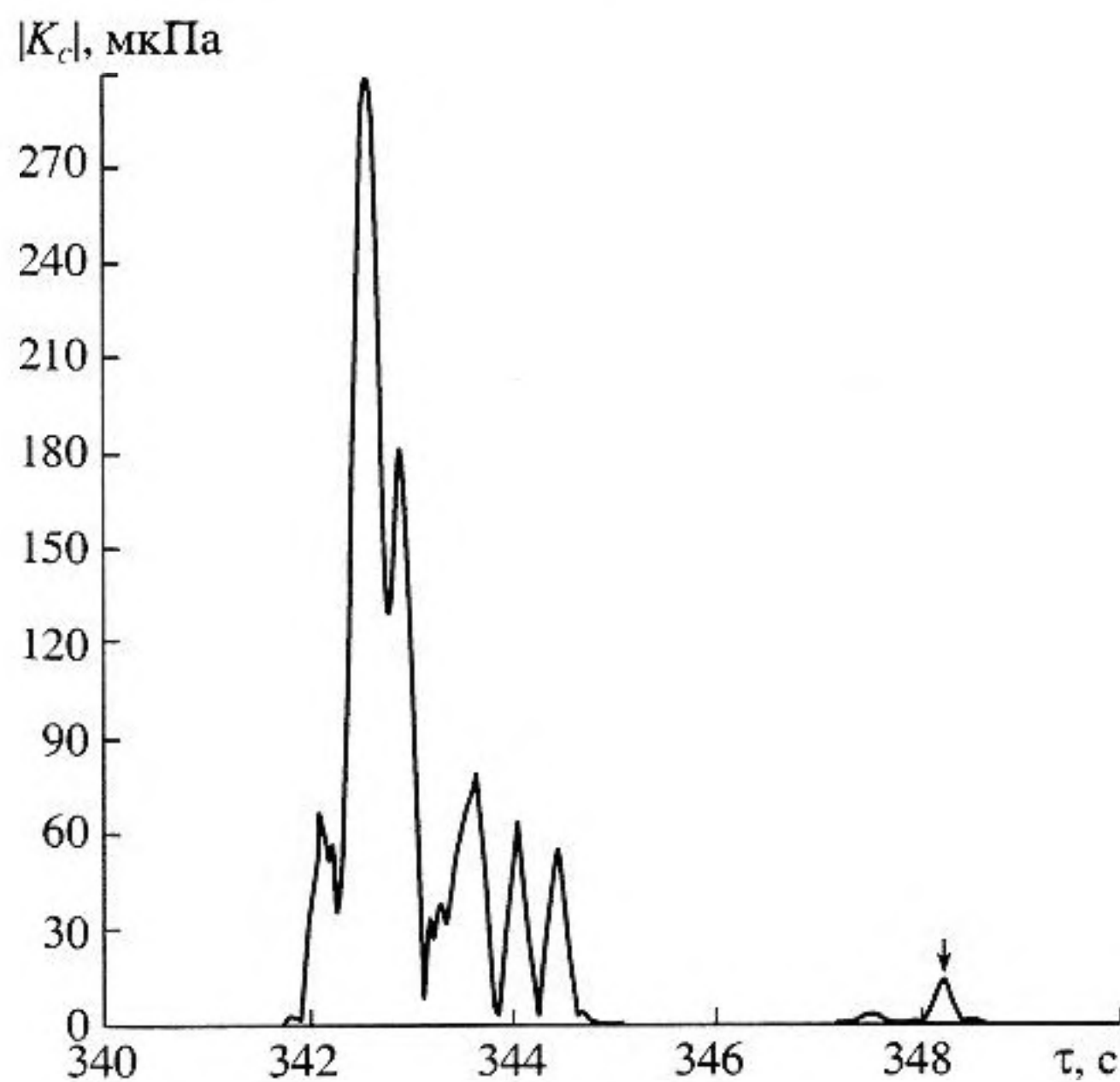


Рис. 2. Огибающая взаимной временной корреляционной функции принятого шумового и опорного сигналов для профиля скорости звука 1 рис. 1б и для фильтрованного сигнала, сформированного MLS.

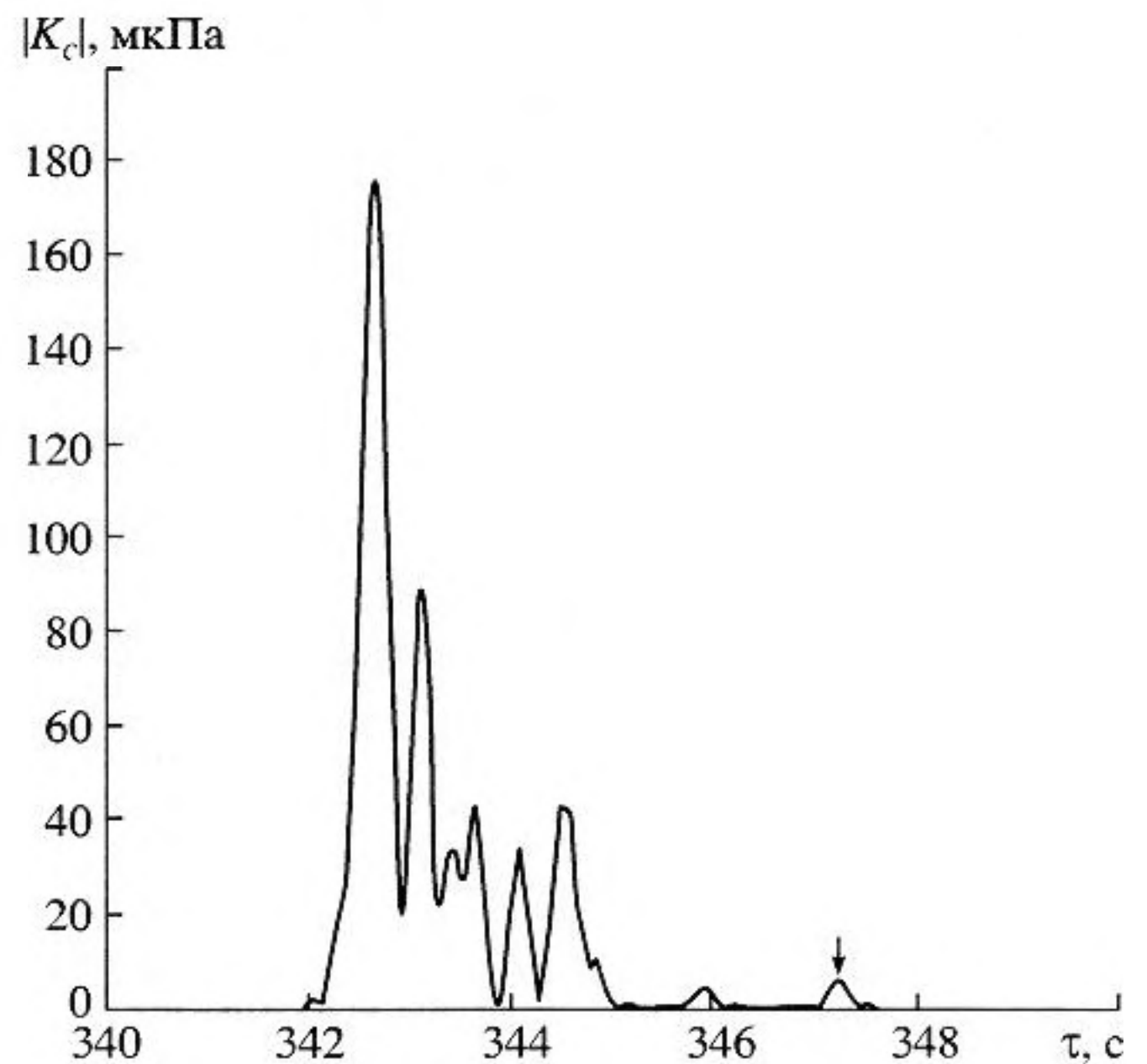


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для $c(z)$ рис. 1б цифра 2.

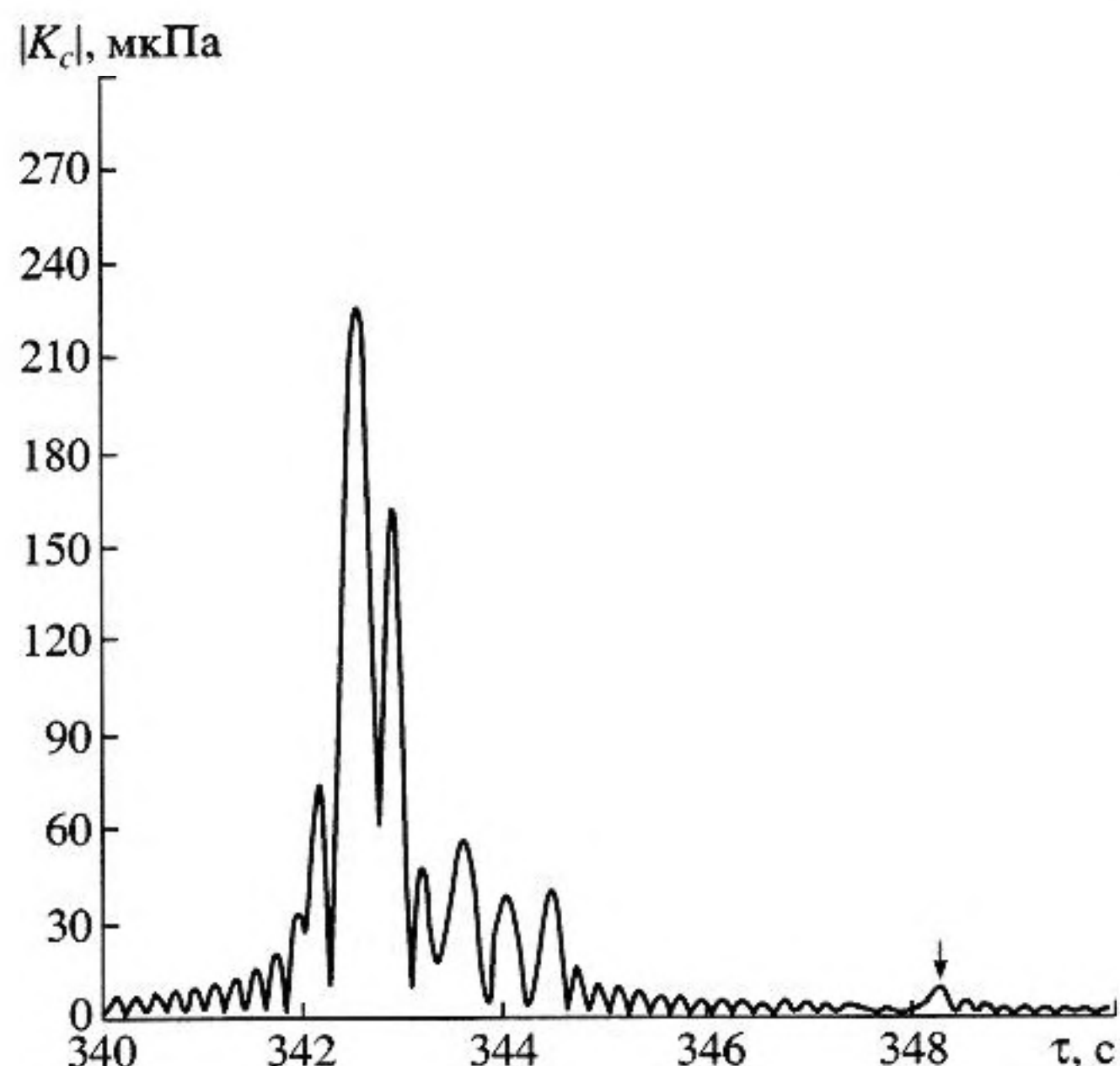


Рис. 4. То же, что рис. 3, но для фильтрованного в полосе Δf белого шума.

профилей $c(z)$, изображенных на рис. 1а, 1б. Расчет проводился для $F(t)$, сформированной M -последовательностью без фильтрации. На рис. 4 показан сигнал, аналогичный приведенному на рис. 3, но пропущенный через прямоугольный фильтр, причем частотная полоса излученного сигнала была шире полосы пропускания фильтра $\Delta f = 5$ Гц. Узкополосная фильтрация приводит к появлению боковых лепестков, но положение главных максимумов огибающей временной корреляционной функции не меняется. Эту схему расчета сохраним в дальнейшем, т.к. нас интересует наиболее неблагоприятный случай, причем полагаем, что в полосе фильтрации исходный спектр сигнала не отличается от спектра белого шума. Тогда на выходе фильтра

$$B(\tau) = \frac{\sin(\pi \Delta f \tau)}{\pi \Delta f \tau}.$$

Полную временную корреляционную функцию шумового сигнала предпочитаем здесь не рассматривать, т.е. заполнение вида $\cos(\omega_0 \tau)$ не приводим на этих графиках. Так же будем поступать и с последующими графиками. Вертикальными стрелками на графиках отмечено положение на шкале задержек первой водной моды.

Структура по задержке (времени) импульсного отклика волновода типична для глубоководного района арктической акватории. Связано это обстоятельство с вертикальной структурой профиля скорости звука $c(z)$. Сверху вплоть до ледяного покрова расположен слой опресненных вод, что видно из рис. 1. Связано это как с таянием льда, более пресного чем вода, так и с поступле-

нием пресных вод из великих Сибирских рек. Профиль скорости звука в приледном слое определяется профилем солености воды. Скорость звука в этом слое увеличивается значительно при увеличении глубины, образуя канал, способный удержать часть водных мод первых номеров. Например, на частоте 65 Гц первая водная мода полностью сконцентрирована в приледном водном слое и влияние на характеристики этой моды более загубленного слоя атлантических вод незначительно. Ниже почти изоскоростного слоя атлантических вод расположен слой арктических вод, имеющих положительный градиент скорости звука, близкий к гидростатическому. Температура и соленость воды в этом слое стабильна по всей акватории.

Учитывая эти факторы, взглянем на форму и времена прихода импульсов, изображенных на рис. 2–4, рассчитанных для трассы длиной 500 км. Первыми приходят волны высших номеров, т.к. большая их часть сконцентрирована в глубоководной части волновода, где скорость звука наибольшая. Форма этих импульсов является результатом интерференции мод, обладающим близкими по величине групповыми скоростями и налагающимися друг на друга. Это обстоятельство приводит к некоторым несущественным различиям в форме результирующего импульса, но временная структура практически одинакова.

Последними приходят волны первых номеров, захваченные приледным каналом. Среди них превалирует по амплитуде первая водная мода. Разница во времени прихода этой моды для рассматриваемых гидрологий достигает 1 с (немного меньше). Это обстоятельство обусловлено различием в солености приледного слоя, и может быть использовано для контроля соленостной изменчивости воды. Причем, различие во времени прихода мод достаточно велико, чтобы быть зафиксированным и превышает возможную ошибку измерения времени прихода моды.

В практическом плане сложность оценки времени прихода первой водной моды состоит, в частности, в том, что коэффициент ослабления этой моды наибольший. Поэтому наблюдаемая амплитуда моды может быть смазана наложением вкладов от хвостов мод высших номеров. Уточним, что рис. 2–4 описывают когерентный сигнал в чистом виде. На практике, импульс моды маскируется помехой, создаваемой средой. Эту помеху можно ослабить, применив направленную антенну. На второй вход коррелятора поступает сигнал, не содержащий помеху среды [1–6]. Поэтому помеха, создаваемая статистически независимыми сигналами, не влияет на детерминированную корреляционную функцию (усредненную по времени величину), если время усреднения достаточно велико. Следовательно, предпочтитель-

но использовать реализации максимальной длины T , при которых и сигнал, и помеха сохраняет статистическую стационарность, эргодичность и независимость.

В арктическом волноводе возбуждаемый источником сигнал содержит, помимо когерентной составляющей, стохастически рассеянную на ледяном покрове составляющую. Последняя по уровню интенсивности может оказаться сильнее когерентной.

Стохастически рассеянная компонента несет информацию о рассеивателях и как бы забывает об источнике звука. Поэтому при корреляционной обработке она хотя и коррелирует с опорным сигналом, но создает размазанный по задержке фон, который также может замаскировать слабый импульс от первой водной моды. От этого фона на корреляционной функции можно избавиться в водных цепях, используя, например, горизонтальную антенну [17].

В задачах мониторинга эксперимент по определению временной изменчивости водных масс обычно длится годами. И нам важно знать, как изменится сигнал, прошедший одну и ту же трассу через достаточно большой интервал времени. Можно поступить прямо: записывать сигнал в каждом из опытов, затем сравнить результаты, полученные в разное время. В качестве альтернативы предлагаем другой подход. Объявляем образцом запись звукового давления сигнала, сделанного во время одного из опытов. Желательно, чтобы в образцовом опыте интересующая нас мода имела бы максимальную интенсивность и минимальную зашумленность. Имея набор реализаций сигнала, различающихся временем приема, строим взаимную корреляционную функцию образцового сигнала и других реализаций сигнала. Достоинство такого подхода заключается в возможности повышения отношения сигнал/помеха на выходе тракта обработки. Сущность идеи состоит в том, что полезный когерентный (в смысле стохастического рассеяния) сигнал описывается во всех опытах практически одинаковой функции $F(t)$ и разные реализации его хорошо коррелируют. Помехи создаваемые средой, для больших временных промежутков практически статистически (по времени) независимы и не влияют на форму корреляционной функции. Это же утверждение справедливо и применительно к стохастически рассеянной компоненте в силу кардинальной смены реализации ледяного покрова от опыта к опыту. Этот тип помехи при предыдущем подходе не устраним, что очень важно на частотах звука в десятки Гц, когда интенсивность рассеянной компоненты велика по сравнению с когерентной.

Поскольку первая водная мода имеет простую вертикальную структуру, характеризуемую един-

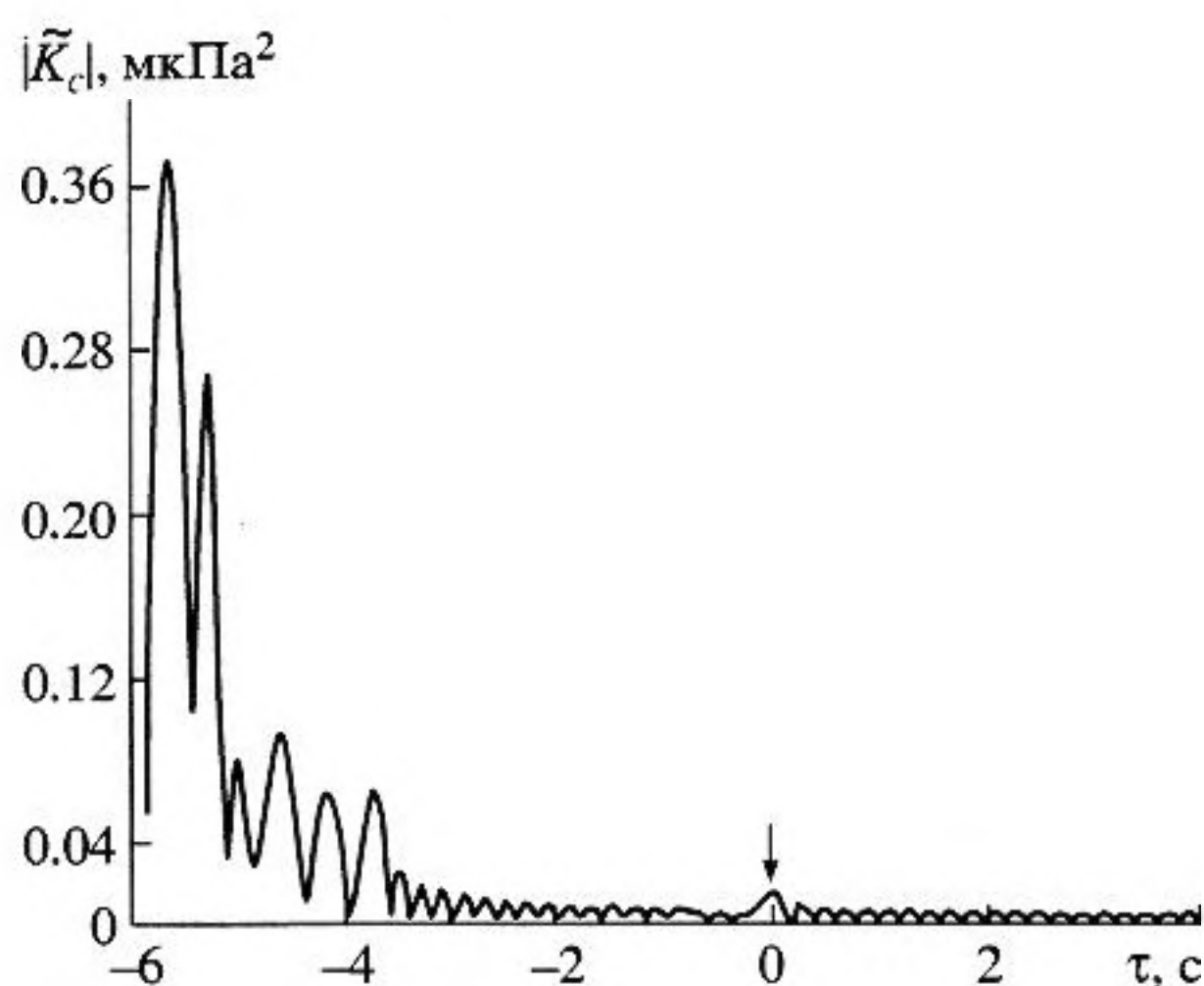


Рис. 5. Взаимная корреляционная функция сигнала и его первой водной моды для $c(z)$ рис. 1б, цифра 2.

ственным максимумом, и сконцентрирована в приледном слое, выделение ее в узкополосном сигнале не представляет сложности с помощью вертикальной антенны. Эксперименты такого рода в арктическом волноводе неоднократно проводились с успешным результатом, используя условие ортогональности мод.

Выделенная в образцовом сигнале мода в дальнейшем используется как опорный сигнал в канале корреляционной обработки. На один из входов коррелятора подается электрическое напряжение, соответствующее звуковому давлению, описываемому выражением (1) плюс аддитивная помеха. На другой канал, как и в выражении (4), подается опорный сигнал, в результате чего электрический аналог взаимной корреляционной функции примет вид

$$\tilde{K}_c(\mathbf{r}, z, t) = W\Delta f \operatorname{Re} \left\{ \tilde{p}_N^*(\mathbf{r}) \exp(-i\omega_0\tau) \times \sum_{m=1}^M p_m(\mathbf{r}) \Phi_m(z) B(\tau + \tilde{t}_N - t_m) \right\}. \quad (5)$$

В этом выражении появляется множитель $\tilde{p}_N^*(\mathbf{r})$, соответствующий выделенной моде номера N , и время ее распространения \tilde{t}_N .

Выделяется не обязательно первая водная мода. При исследовании других водных слоев подбирается мода, наиболее чувствительная к изменению скорости звука в этом слое.

В выражении (5) отсутствует собственная функция N -й моды, так как при выделении моды она выпадает в силу нормировки мод.

На рис. 5 построен график огибающей функции $\tilde{K}_c(\mathbf{r}, z, \tau)$ для тех же условий, что и на рис. 4,

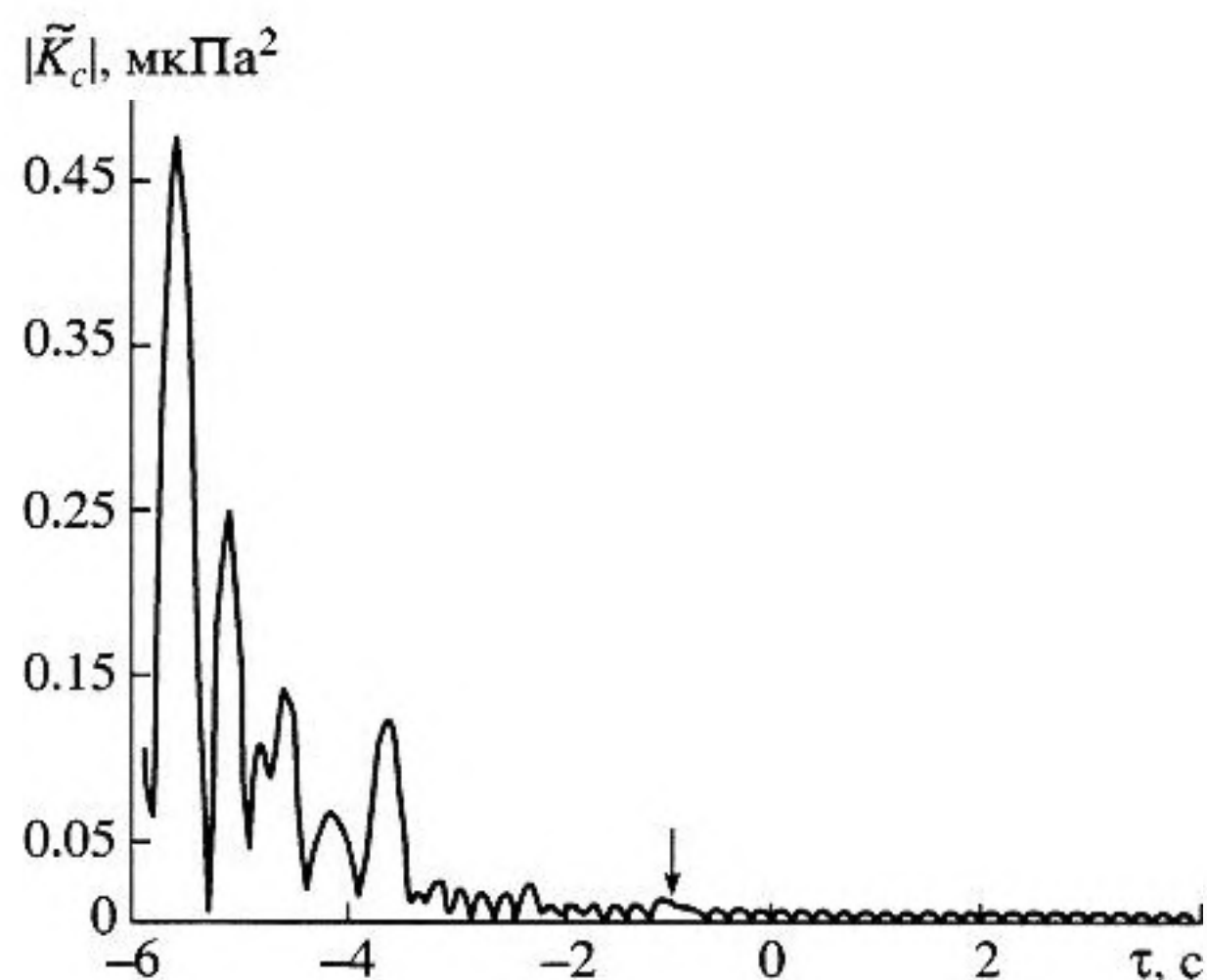


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но первая водная мода соответствует $c(z)$ рис. 1 цифра 1.

где в качестве опорного использован сам сигнал, точнее первая водная мода этого сигнала. Сравнивая рис. 4 и 5, видим, что формы огибающих у них фактически одинаковы, но смещены по шкале задержек. Максимум, соответствующий выделенной моде, распложен при $\tau = 0$. Смещение других максимумов по τ то же самое относительно максимума опорной моды.

На рис. 6 построен аналогичный график, в котором опорная мода соответствует гидрологии 1 (рис. 1), а сигнал соответствует гидрологии 2, (рис. 1б). Из рис. 6 видно, что максимум, соответствующий первой водной моде, смещен по шкале задержек τ примерно на 1 с. Эта разность прихода первой водной моды прослеживается и на рис. 2 и 3. Но при данном подходе исключаем ошибку в измерении разности времен распространения интересующей нас моды в большей степени, чем в предыдущих опытах. Возможно, это обстоятельство связано с тем, что приледный слой слабо влияет на времена распространения мод высших номеров. Это утверждение видно и из расчетов времен распространения мод, и из формы огибающей взаимной временной корреляционной функции сигналов вида (1), соответствующих гидрологиям 1 и 2 (рис. 1).

Из результатов проведенных расчетов следует, что рассмотренные в работе способы можно использовать при постановке эксперимента по мониторингу временной изменчивости профиля скорости звука. Полученные в ходе эксперимента результаты можно использовать для определения количественного соответствия между изменениями параметров среды и временными соотношениями в корреляционной функции. Изменения в корреляционной функции явно превышают возможную погрешность опыта, но оценка точ-

ности решения обратной задачи (связать изменения в сигнале с изменениями параметров среды) требует отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer.* The Transarctic Acoustic Propagation Experiment and Climate Monitoring in the Arctic // *IEEE Journ. of Ocean. Eng.* 1999. V. 24. № 2. P. 183–201.
2. *Gavrilov A.N., Mikhalevsky P.N.* Phase Acoustik Tomography with Broadband signals in the Arctic / *Proc. of the 3 European conf. on underwater acoustics, Heraklion.* 1966. P. 851–856.
3. *Гаврилов А.Н., Славинский М.М., Шмелев А.Ю.* Теоретические и экспериментальные исследования возможности акустической термометрии климатической изменчивости Северного Ледовитого океана // *УФН* 1995. Т. 165. № 7. С. 836–840.
4. *Кудряшов В.М.* Численный эксперимент по акустической галинометрии на трассе в Арктическом бассейне // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 6. С. 798–802.
5. *Козубская Г.Н., Кудряшов В.М., Сабинин К.Д.* О возможности галинометрии Арктического бассейна // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 2. С. 250–257.
6. *Морозов А.К.* Применение методов квазикогерентного накопления импульсной реакции гидроакустического канала при обработке шумоподобных сигналов в эксперименте THETIS-II // *Акуст. журн.* 1996. Т. 42. № 6. С. 829–834.
7. *Кудряшов В.М.* Расчет звукового поля в арктическом волноводе // *Акуст. журн.* 1996. Т. 42. № 3. С. 438–442.
8. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 502.
9. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
10. *Барридж Р., Вейнберг Г.* Горизонтальные лучи и вертикальные моды / В кн.: "Распространение волн и подводная акустика". М.: Мир, С. 76–125.
11. *Кудряшов В.М.* Звуковое поле в волноводе с наклонным дном // *Акуст. журн.* 1987. Т. 33. № 1. С. 55–59.
12. *Кудряшов В.М.* Временная функция корреляции узкополосного шумового сигнала в нерегулярном волноводе // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 1. С. 117–122.
13. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 180 с.
14. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. Гос. изд-во техн.-теор. литературы. М., 1957. 236 с.
15. *Тюрин А.М.* Введение в теорию статистических методов в гидроакустике. Л.: Изд-во В.М.А., 1963. 252 с.
16. *Справочник по гидроакустике.* Под ред. А.П. Евтюхова и др. / Л.: Судостроение, 1988. 549 с.
17. *Кряжев Ф.И., Кудряшов В.М.* Антенна в волноводе со статистически шероховатой границей // *Акуст. журн.* 1984. Т. 33. № 1. С. 790–796.

Correlation Processing of a Noise Signal in the Arrival-Time Acoustic Monitoring of the Water Medium in the Arctic Waveguide

V. M. Kudryashov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—The propagation of a noise signal is considered for an arctic-type waveguide with a varying sound speed profile. The profiles used in the calculations differ from each other due to different depth dependences of salinity. The shape of the envelope of the time correlation function is studied for the coherent and reference signals. For the latter, either the replica of the transmitted noise signal or one of the modes propagating in the waveguide is used. A characteristic feature of the proposed technique is the use of the time cross-correlation between the signals that traveled through the same path in the presence of different sound speed profiles. In this case, from the shape of the envelope of the signal correlation function, one can estimate the changes that occur in the sound speed profile on the path of signal propagation.