

МЕЛКОВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД АРКТИЧЕСКОГО ТИПА КАК КАНАЛ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ

© 2018 г. М. В. Волков^{а, е}, В. А. Григорьев^б, И. В. Жилин^с, А. А. Луньков^{а, е},
В. Г. Петников^{а, *}, А. В. Шатравин^д

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38

^бВоронежский государственный университет
Россия, 394018 Воронеж, Университетская пл. 1

^сИнститут проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
Россия, 127051 Москва, Большой Каретный пер. 19, стр. 16

^дИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997 Москва, Нахимовский просп. 36

^еМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская 5

*e-mail: petniko@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 18.04.2018 г.

В рамках модельных экспериментов получены передаточные функции мелководного акустического волновода арктического типа в весенне-летний период, в том числе в присутствии поверхностного волнения. Расчеты проведены для частот от 150 до 1000 Гц с использованием теории взаимодействующих мод. По результатам численного моделирования обоснован возможный частотный диапазон для осуществления устойчивой звукоподводной связи, который подходит для волноводов как с акустически мягким, так и акустически жестким дном. Показано, что для некоторых расстояний между источником и приемником звука и глубин их расположения безошибочная передача информации может быть достигнута даже без использования специальных методов обработки. Компенсация канала с помощью временного обращения волн приводит к повышению надежности передачи преимущественно в волноводе с акустически жестким дном.

Ключевые слова: акустика мелкого моря, акустика арктического шельфа

DOI: 10.1134/S0320791918060138

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное освоение арктического шельфа России требует внедрения особых технологий, ориентированных на работу в таких акваториях. Одной из таких технологий является звукоподводная связь (ЗПС), с помощью которой оказывается возможным обмен информацией с автономными донными станциями и подводными аппаратами, используемыми для регистрации различных гидрофизических характеристик среды. К этим характеристикам, в частности, относятся вертикальные профили температуры и солёности, измеряемые подводными роботами, и параметры антропогенных акустических шумов, способных нанести вред морским млекопитающим. Помимо характеристик среды научный интерес представляет регистрация акустических сигналов, излучаемые морскими животными, а также пассивная акустиче-

ская пеленгация этих животных, позволяющая оценить их количество и возможные пути их миграции. С учетом ледового покрова, существующего в зимнее время на арктическом шельфе, ЗПС является, пожалуй, единственным круглогодичным каналом передачи информации на базовые станции, расположенные, например, на нефтедобывающих платформах или судах ледового класса. Несмотря на то, что техника ЗПС хорошо известна, ее возможности в указанной акватории требуют специального анализа, что обусловлено спецификой передаточной функции гидроакустического волновода $K(f, z_0, z, r)$ в северных морях, где f — частота, z_0 и z — глубины места расположения источника и приемника звука соответственно, r — расстояние до источника звука. Заметим, что здесь и далее функция $K(f, z_0, z, r)$ зависит от z_0, z и r как от параметров. Для этого вол-

новода характерны следующие особенности: во-первых, эта небольшая глубина (75% арктического шельфа имеет глубину менее 50 м); во-вторых, это случайно-неоднородное дно со скоростью звука, которая может быть и меньше, чем скорость звука в воде (см. [1] и цитированные здесь работы); в-третьих, это случайные вариации верхней границы, связанные с поверхностным волнением (ПВ) и шероховатостями ледового покрова. С учетом третьей особенности возможности ЗПС на арктическом шельфе необходимо анализировать по отдельности: для волновода в отсутствие ледового покрова со взволнованной верхней границей (летний волновод) и для волновода с ледовым покровом (зимний волновод). В настоящей работе приведены результаты расчетов $K(f, r, z_0, z)$ для типичных параметров волновода в летнее время и на расстояниях $r = 100\text{--}5000$ м. Расчет проводился в частотном диапазоне 150–1000 Гц. Показаны отличительные черты этой частотной зависимости, а также проанализированы возможности ЗПС в таком волноводе.

МЕТОДИКА И ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты проводились в рамках модового описания звукового поля. Учитывались как распространяющиеся, так и вытекающие волноводные моды. Предполагалось, что дно – жидкая однородная среда (полупространство), и скорость продольных акустических волн в дне принимает значения $c_1 = 1600$ и 1400 м/с.

Отметим, что в последнем случае скорость звука меньше, чем скорость звука c в воде, что обычно имеет место в случае газонасыщенного дна. В наших расчетах c выбиралась равным $c = 1460$ м/с. Плотность в дне $\rho_1 = 1.85$ г/см³. Коэффициент затухания в дне β_1 полагался зависящим от частоты, и равным $\beta_1 = 1.07 \times 10^{-4} f^{2.6}$ дБ/км [2]. Здесь коэффициент 1.07×10^{-4} выбирался таким образом, чтобы величина β_1 на частоте 150 Гц была равна типичному значению 49 дБ/км для восточной мелководной части Баренцева моря. Глубина волновода $H = 30$ м.

Для расчета передаточной функции мы использовали следующее соотношение [3]:

$$K(f, r, z_0, z) = \sum_1^M C_m(r, z_0, z, f) \times \frac{\Psi_m(r, z, f)}{\sqrt{q_m(r, f) r}} \exp\left(i \int_0^r q_m(r', f) dr'\right). \quad (1)$$

Здесь $\Psi_m(r, z_0, z, f)$ и $\xi_m(r, f) = q_m(r, f) + i\gamma_m(r, f)/2$ собственные функции (волноводные моды) и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля

для рассматриваемого волновода. Для определения модовых коэффициентов $C_m(r, z_0, f)$ решалась система дифференциальных уравнений для каждой из частот f из указанного выше частотного диапазона с шагом 1 Гц:

$$\frac{dC_m(r')}{dr'} = -\frac{\gamma_m(r')}{2} C_m(r') + \sum_{n=1}^M b_{mn}(r') \times \sqrt{\frac{q_m(r')}{q_n(r')}} \exp\left(i \int_0^r [q_n(r') - q_m(r')] dr'\right) C_n(r'). \quad (2)$$

Граничные условия: $C_m(0, z_0, f) = \Psi_m(0, z_0, f)$. Здесь b_{nm} – коэффициенты взаимодействия между модами, которые при наличии шероховатой свободной поверхности выражаются как [3]:

$$b_{mn}(r') = \frac{q_n(r')}{2q_m(r')} B_{nm}(r') - \frac{1}{2} B_{mn}(r') \quad \text{при } m \neq n, \quad (3)$$

$$B_{mn}(r') = \int_0^\infty \frac{\rho_1}{\rho(z)} \Psi_m(r', z) \frac{\partial \Psi_n(r', z)}{\partial r'} dz = \frac{1}{q_m^2(r') - q_n^2(r')} \frac{\partial s(r', \varphi)}{\partial r'} \times \left(\frac{\partial \Psi_m(r', z)}{\partial z} \frac{\partial \Psi_n(r', z)}{\partial z} \right) \Bigg|_{z=s} = -B_{nm}(r'). \quad (4)$$

Здесь $s(r', \varphi)$ – случайные отклонения морской поверхности от положения равновесия в точке (r', φ) , которые обусловлены ПВ, r' – горизонтальное расстояние, φ – азимутальный угол. Максимальный номер моды M выбирался равным $M = 2H/\lambda$, где λ – длина звуковой волны. При таком значении M в формуле (1) учитываются как распространяющиеся, так и вытекающие моды, включая квазимоды, для которых справедливо неравенство $(\gamma_m/2) > \text{Re } k_1 \text{Im } k_1/q_m$, где k_1 – волновое число в дне. Это приближенное выражение для величины $K(f, r, z_0, z)$, где не учитывается так называемый непрерывный спектр. Оно с точностью до нескольких процентов совпадает с точным значением амплитуды поля на расстоянии $r \geq H$ [4].

Случайные реализации ПВ $s(r', \varphi)$ вдоль трассы распространения звука моделировались с помощью спектра Пирсона–Неймана. Методика моделирования случайных возмущений в волноводе (здесь это отклонения морской поверхности от равновесного положения) при известном спектре их мощности описана в работе [5]. В расчетах предполагалось, что скорость ветра равна $v = 10$ м/с и ветер направлен вдоль акустической трассы ($\varphi = 0$). Заметим, что величина v выбиралась максимально возможной для используемой методики расчета звуковых полей в волноводе со взволнованной поверхностью при частоте акустических сигналов

≤ 1 кГц. При такой скорости среднеквадратичное отклонение морской поверхности от положения равновесия составляет $\sigma_s = 0.56$ м и длина поверхностной волны Λ , отвечающей максимуму в пространственном спектре ПВ, равна $\Lambda = 192$ м.

Условия применимости формул (1)–(4) могут быть записаны в следующем виде:

$$\left| \frac{dC_m/dr}{C_m} \right| \ll q_m, \quad \left| \frac{d^2 C_m/dr^2}{dC_m/dr} \right| \ll q_m. \quad (5)$$

Заметим также, что при выполнении условий (5) мы можем пренебречь обратным рассеянием звука в волноводе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Передаточные функции волновода

Результаты расчетов модуля передаточной функции $|K(f)|$ на разных частотах при скоростях звука в дне 1400 и 1600 м/с показаны на рис. 1. Здесь и далее для краткости записи зависимость передаточной функции от параметров (r , z_0 , z) опускается. Шаг по частоте при расчетах был равен 1 Гц. Предполагалось, что источник звука находится на глубине $z_0 = 25$ м. Рис. 1а соответствует глубине приема $z = 25$ м на расстоянии $r = 5$ км. На рис. 1б показано среднее значение величины $|K(f)|$ для того же расстояния, но при усреднении по глубине приема от 1 до 29 м с шагом 1 м. Как видно на рисунке, характер зависимости передаточной функции от частоты существенным образом меняется при изменении скорости звука в дне. При $c_1 = 1400$ м/с модуль передаточной функции увеличивается с частотой, тогда как затухание в дне растет при увеличении f . При этом в зависимости от f на частотах менее 600 Гц нет характерных интерференционных биений. Последнее означает, что на низких частотах в звуковом поле доминирует лишь одна первая мода. Все остальные моды при выбранных параметрах задачи на расстоянии 5 км значительно уступают первой моде по амплитуде¹. Это может быть удобно для ЗПС, поскольку в этом случае межсимвольная интерференция минимальна. Однако реализовать это преимущество возможно лишь при использовании мощных источников звука, поскольку величина $|K(f)|$ на указанных частотах мала при $c_1 = 1400$ м/с, и главным препятствием для ЗПС становится фоновый шум.

При $c_1 = 1600$ м/с зависимость $|K(f)|$ ведет себя ожидаемым образом. На рис. 1а хорошо видны

¹ Заметим, что при скорости звука в дне, близкой, но меньшей, чем скорость звука в воде, все волноводные моды являются “вытекающими”, и коэффициент затухания моды γ_m резко увеличивается с номером моды m .

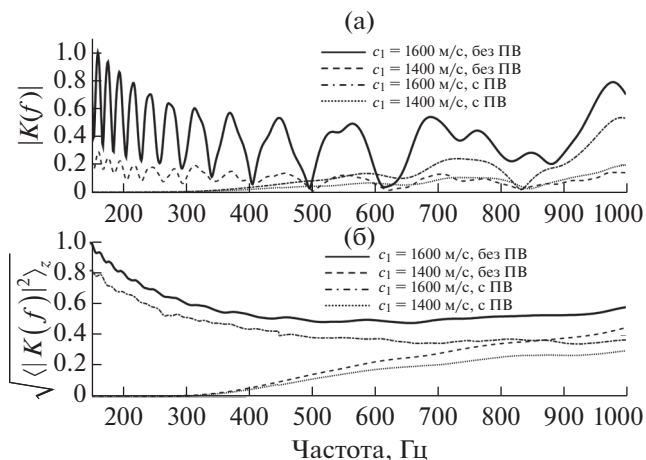


Рис. 1. (а) Модуль передаточной функции канала $|K(f)|$ для расстояния 5 км при глубине приема $z_0 = 25$ м и (б) усредненная для глубин приема от 1 до 29 м с шагом 1 м зависимость $\sqrt{|K(f)|^2}_z$. Сплошная линия – $c_1 = 1600$ м/с без ПВ; штриховая линия – $c_1 = 1400$ м/с без ПВ, штрих-пунктирная линия – $c_1 = 1600$ м/с в присутствии ПВ; пунктирная линия – $c_1 = 1400$ м/с в присутствии ПВ.

межмодовые интерференционные биения, их величина в среднем уменьшается с частотой. Отметим также, что с ростом частоты уменьшение $|K(f)|$ замедляется. Здесь работают два конкурирующих эффекта. С одной стороны, с ростом частоты увеличивается коэффициент затухания звука в дне и соответственно должны увеличиваться коэффициенты затухания волноводных мод γ_m . С другой, известно [6], что при $c < c_1$ коэффициенты γ_m при неизменных параметрах дна уменьшаются с ростом частоты.

Величина $|K(f)|$ зависит от ПВ. Эта зависимость проявляется не только при сравнении для разных реализаций ПВ, но и при анализе усредненных по глубине функций $\sqrt{|K(f)|^2}_z$ (см. рис. 1б). При $c < c_1$ и $c > c_1$ ПВ в среднем приводит к увеличению затухания звука до 1.5 раз и, соответственно, к уменьшению $|K(f)|$. Этот эффект, обусловленный межмодовым взаимодействием, нарастает с ростом частоты при любой важной на практике глубине источника звука. В целом, влияние ПВ на среднее значение $\sqrt{|K(f)|^2}_z$ на расстоянии 5 км невелико при скорости ветра, не превышающей 10 м/с.

Рис. 1 показывает, что разница в $|K(f)|$ при разных значениях c_1 становится меньше на высоких частотах. Это означает, что для ЗПС на арктическом шельфе на расстояниях в несколько километров, когда величина c_1 неизвестна, диапазон

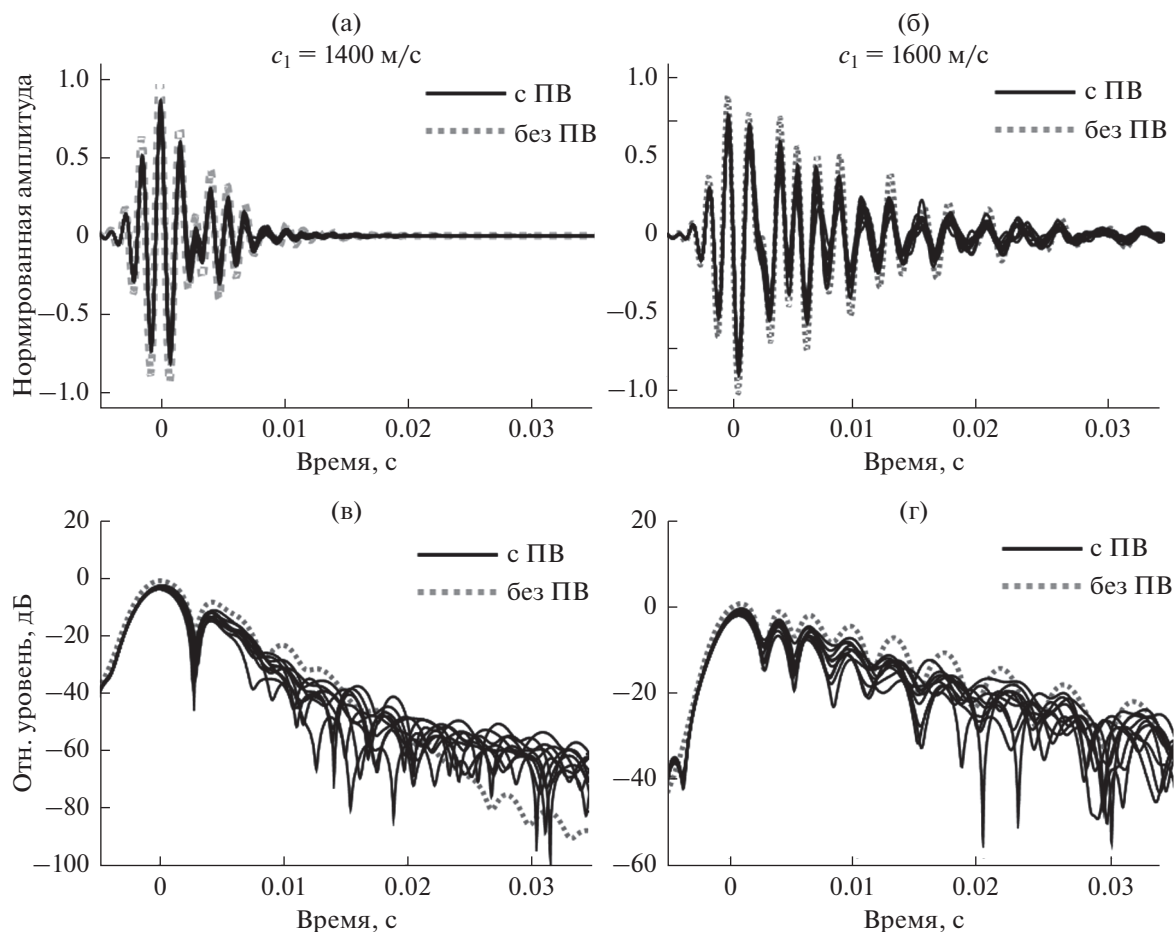


Рис. 2. Импульсные отклики (а и б) и их огибающие (в и г), отвечающие передаточным характеристикам канала, приведенным на рис. 1. (а) и (б) соответствуют мягкому дну ($c_1 = 1400$ м/с), (в) и (г) – жесткому ($c_1 = 1600$ м/с). Серые пунктирные линии отвечают волноводу в отсутствие возмущений, черные сплошные – при наличии ПВ (10 независимых реализаций).

частот $\Delta f = 600\text{--}1000$ Гц обеспечит наиболее надежное функционирование ЗПС. (Переход на более высокие частоты нецелесообразен из-за увеличения затухания звука на больших частотах и увеличения фоновых шумов при сильном ПВ.)

Для решения задачи ЗПС важно знать импульсный отклик подводного канала и как он изменяется под действием возмущений. На рис. 2 показаны импульсные отклики и их огибающие для возмущенных и невозмущенных волноводов с разными типами дна. Эти временные зависимости были получены путем обратного преобразования Фурье от комплексной передаточной функции $K(f)$ с предварительным наложением окна Ханна в полосе частот $150\text{--}1000$ Гц. Анализ приведенных зависимостей выявил следующие закономерности:

1) время затягивания сигнала в два и более раз больше длительности исходного импульса, что обусловлено главным образом межмодовой дисперсией; при этом меняется не только форма огибающей, но и фаза несущей внутри импульса;

2) наибольшее время затягивания наблюдается для жесткого дна ($c_1 = 1600$ м/с);

3) ПВ приводит к уменьшению амплитуды импульсного отклика по сравнению с невозмущенным случаем, однако фазовая структура остается достаточно стабильной; наименее подверженной влиянию ПВ оказывает головная часть импульсного отклика, отвечающего приходу низших волноводных мод.

Указанные особенности должны быть учтены при проектировании системы ЗПС. Например, при демодуляции необходима адаптивная подстройка фазы сигнала, заполняющего принимаемый символ.

Звуконеподводная связь

Высказанные выше соображения по выбору диапазона частот Δf , а также форме модуляции/демодуляции не снимают необходимость применения известных методов адаптивной эквализации. Под этим термином фактически по-

нимается амплитудно-частотная коррекция передаточной функции канала при приеме. Она приводит к подавлению межсимвольной интерференции, физически обусловленной многомодовой структурой звукового поля в мелководных акустических волноводах (см. [7–10] и цитируемые там работы). Для иллюстрации этого утверждения на рис. 3 приведены зависимости коэффициента битовых ошибок² (BER) от расстояния до источника звука при передаче тестового сигнала через рассмотренный выше волновод в отсутствие ПВ и отсутствии аддитивного (фонового) шума. (Учет ПВ качественно не меняет картину, что обусловлено схожестью импульсных откликов на рис. 2.) Расчеты проводились с шагом по расстоянию 10 м. Источник и приемник звука точечные, $z_0 = z = 25$ м. Моделировалась передача сигнала из 2254 символов. Применялась двоичная фазовая модуляция. Каждый символ (бит) передавался в течение двух периодов несущей частоты 750 Гц, что соответствует максимальной скорости передачи 375 бит/с. Передаваемый сигнал включал в себя преамбулу из двух M-последовательностей из 127 символов и случайную последовательность из 2000 символов. Принимаемый сигнал $\hat{s}(t)$ вычислялся с помощью известного соотношения:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)K(\omega)e^{-i\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где $S(\omega)$ – спектр излученного сигнала, $\omega = 2\pi f$.

При декодировании принятый сигнал пропускать через полосовой фильтр. При моделировании сравнивались результаты, полученные с помощью двух разных фильтров: фильтра Баттерворта 4-го порядка с полосой фильтрации 550–950 Гц и фильтра с характеристикой типа “приподнятый косинус” [8] с полосой 562.5–937.5 Гц. Преамбула использовалась для определения момента времени прихода сигнала в точку приема и подбора оптимальной фазы несущей. Момент времени прихода определялся по максимуму (с учетом знака) взаимной корреляционной функции преамбул излучаемого и принятого сигналов. Фоновый шум не учитывался. В данной работе это было сделано умышленно с целью наиболее наглядно продемонстрировать при моделировании влияние физических характеристик арктического канала распространения звука на возможности звукоподводной связи. Кроме того, оценки показывают, что уже при мощности источника звука 1 Вт, рабочей полосе частот 400 Гц и уровне фоновых шумов 70 дБ отн. 1 мкПа³ отношение сигнал/шум в точке приема на расстоянии 5 км составляет не

² BER равен отношению числа ошибочно принятых бит (символов) к общему числу бит измеряемого сигнала в заданном временном интервале.

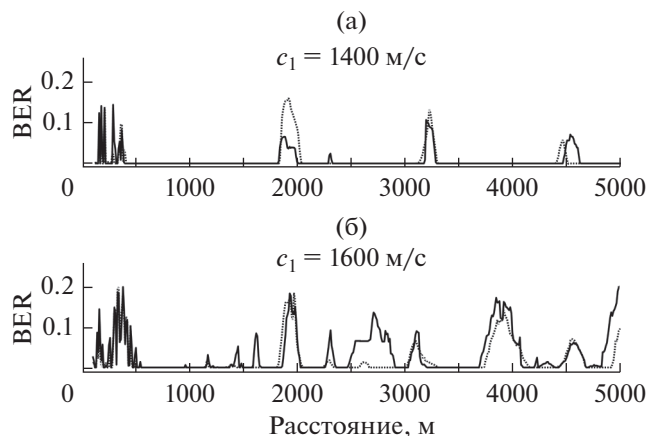


Рис. 3. Зависимость BER от расстояния до источника звука. (а) $c_1 = 1400$ м/с, (б) $c_1 = 1600$ м/с. Сплошная линия – фильтр Баттерворта, пунктирная – фильтр “приподнятый косинус”.

менее 30 дБ при выбранных значениях скоростей звука в дне 1400 и 1600 м/с. Это позволяет не учитывать фоновые шумы при анализе влияния физических характеристик среды на передаточную функцию рассматриваемого звукового канала на расстояниях до 5 км.

Как следует из рис. 3, рассматриваемый звуковой канал уже на расстоянии ~ 100 м приводит к ненулевым значениям BER, что делает невозможным передачу цифровой информации со скоростью 375 бит/с без дополнительной эквализации. Это имеет место даже в отсутствие шумов. В то же время для ряда расстояний возможна безошибочная передача, особенно при скорости звука в дне 1400 м/с. Здесь следует отметить, что величина BER во многом определяется глубиной расположения источника и приемника звука. Минимальные значения BER имеют место при $z_0 = z = H/2$, т.е. когда источник и приемник находятся на глубине, отвечающей максимуму первой наименее затухающей волноводной моды звукового поля. Однако детальные расчеты показывают, что даже в этом случае величина BER на некоторых расстояниях может достигать величин, равных 0.15, что требует применения эквализации. Заметим, что выбор метода эквализации и обработки принятого сигнала для передачи информации в рассматриваемом канале представляет собой отдельную и довольно сложную задачу. Применение ряда известных и апробированных методов не приводит здесь к успеху. Например, на рис. 4 приведена зависимость BER от расстояния при тех же параметрах задачи, что и на рис. 3,

³ Такой уровень шума типичен на арктическом шельфе для полосы частот 550–950 Гц и связан с развитым поверхностным волнением.

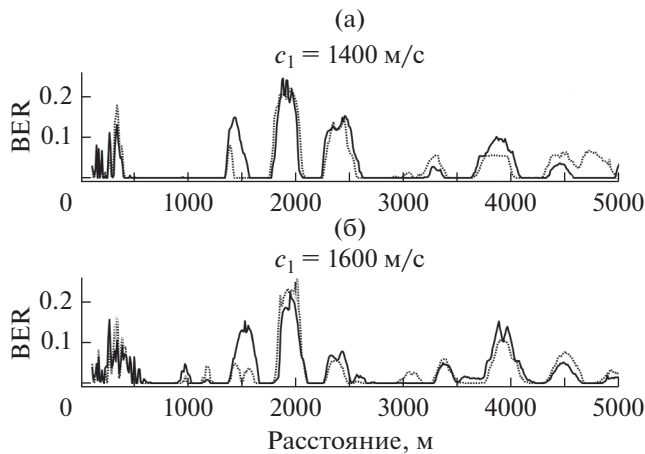


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но с адаптацией к каналу распространения. Методика адаптации основана на “обращении времени”.

но при использовании эквализации, основанной на “обращении времени” [9]. Здесь в отличие от [9] используется обращение времени для одиночного приемника. ПВ отсутствует. Передаточная функция канала предполагается известной, т.е. точно измеренной с помощью специального тестового сигнала. При таком способе эквализации принимаемый сигнал должен быть пропущен через фильтр с частотной характеристикой $K^*(\omega)$, что на выходе дает сигнал

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) |K(\omega)|^2 e^{-i\omega t} d\omega. \quad (7)$$

Как видно на рис. 4, эквализация, основанная на “обращении времени” и одиночном приемнике, при $c_1 = 1400$ м/с приводит к уменьшению величины BER только в очень малом количестве случаев (расстояния 100–300 и 3100–3300 м), а для большинства расстояний приводит к обратному эффекту, существенно увеличивая количество ошибок (особенно на расстояниях 1300–2600 м). При $c_1 = 1600$ м/с существенное уменьшение BER достигается для расстояний 4800–5000 и 2500–3200 м (особенно при использовании фильтра Баттерворта), в то же время на расстояниях 1300–2500 м наблюдается существенное увеличение BER, как и при $c_1 = 1400$ м/с. Таким образом, даже при известной передаточной функции и в отсутствие шумов такой способ обработки сигнала в рассматриваемом канале при скорости передачи информации 375 бит/с и несущей частоте 750 Гц не позволяет получить BER менее 0.05 во всем интервале дистанций $r = 100$ –5000 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение подчеркнем, что дальняя ($r \gg H$) звукоподводная связь в мелководном акустическом волноводе, характерном для арктического шельфа России, диктует выбор частотного диапазона и необходимость разработки методики оптимальной адаптивной эквализации.

Работа выполнена при частичной поддержке:

- 1) РФФИ, проекты № 16-29-02036 и № 16-32-60194.
- 2) Программы Президиума РАН № 1.7.
- 3) Государственного задания ФАНО России № 0024-2018-0031, № 0149-2018-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. Затухание звука в мелководных акваториях с газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 90–100.
2. Ji-Xun Zhou, Xue-zhen Zhang. Geoacoustic parameters in a stratified sea bottom from shallow-water acoustic propagation // J. Acoust. Soc. Am. 1987. V. 82(6). P. 2068–2074.
3. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика неоднородных сред. Т. 2: Звуковые поля в слоистых и трехмерно-неоднородных средах. М.: Наука. 2009. 426 с.
4. Григорьев В.А., Петников В.Г. О возможности представления акустического поля в мелком море в виде суммы нормальных мод и квазимод // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 681–698.
5. Кузькин В.М., Лаврова О.Ю., Пересёлков С.А., Петников В.Г., Сабинин К.Д. Анизотропное поле фоновых внутренних волн на морском шельфе и его влияние на распространение низкочастотного звука // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 1. С. 74–86.
6. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics // Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2012. 540 p.
7. Pancaldi F., Vitetta G.M., Kalbasi R., Al-Dhahir N., Uysal M., Mheidat H. Single-carrier frequency domain equalization // IEEE Signal Processing Magazine, September 2008. V. 25(5). P. 37–56.
8. Proakis J. Digital Communications, NY USA: McGraw-Hill, 2001.
9. Rouseff D., Jackson D.R., Fox W.L.J., Jones C.D., Ritcey J.A., Dowling D.R. Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results // IEEE Journal of oceanic engineering. 2001. V. 26(4). P. 821–831.
10. Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 245–255.