

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН ДЛЯ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2019 г. М. В. Волков^{а, с}, В. А. Григорьев^б, А. А. Луньков^{а, с}, В. Г. Петников^а

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

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

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

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

Поступила в редакцию 27.12.2018 г.

После доработки 27.12.2018 г.

Принята к публикации 29.12.2018 г.

В рамках численного моделирования проанализированы возможности использования вертикальных приемных антенн, перегораживающих весь волновод, для звукоподводной связи на мелководном арктическом шельфе. Для передачи данных выбрана двоичная фазовая манипуляция с несущей частотой 750 Гц. Показано, что применение алгоритма селекции акустических сигналов, отвечающих первой волноводной моде, или алгоритма, основанного на обращении волнового фронта, позволяет избавиться от межсимвольной интерференции. При пространственной обработке сигнала и глубине волновода 30 м безошибочная передача информации оказывается возможной при отношении сигнал/шум на ≈ 15 дБ меньше, чем в случае использования одиночного приемника. Продемонстрировано, что указанные преимущества применения вертикальных антенн имеют место в разных ситуациях на арктическом шельфе: при акустически мягком или акустически жестком дне, в присутствии поверхностного волнения или при наличии ледового покрова.

Ключевые слова: звукоподводная связь, вертикальная антенна, межсимвольная интерференция, арктический шельф

DOI: 10.1134/S0320791919030109

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время звукоподводная связь (ЗПС) является одной из основных технологий, активно применяемых в технике натуральных физических экспериментов на океанском шельфе. При этом активно развиваются два подхода, обеспечивающих устойчивую связь в этих мелководных акваториях. Первый подход основан на применении тех либо иных методов адаптивной эквализации, суть которых сводится к предварительной или “параллельной” (вместе с информационным сигналом) передачей обучающего сигнала, позволяющего реализовать согласованную со средой обработку сигналов (см., например, [1–5] и цитированные там работы). Подчеркнем здесь, что в целом это достаточно сложный подход, требующий определенного времени для адаптации к условиям распространения звука и подразумевающий большой объем вычислений для безошибочного приема информации¹. В то же время методы, основанные на этом подходе, работают как в глубоком океане, так и в мелком море и не накладывают жестких условий на число приемных элементов и на их распределение в пространстве.

Другой подход, предложенный в работах [6–8], ориентирован на применение вертикальных приемных антенн, перегораживающих мелководный звуковой канал на океанском шельфе. Структура звукового поля в канале предварительно оценивается с помощью такой антенны и учитывается в дальнейшем при обработке информационного сигнала [7]. Заметим, что выделение двух подхо-

¹ Последнее важно при создании автономных систем звукоподводной связи, когда необходимо учитывать и потребление энергии, необходимое для численной реализации сложных алгоритмов обработки сигналов, работающих в режиме реального времени.

дов достаточно условно, известны работы, сочетающие оба подхода [6, 9].

При втором подходе обработка принимаемого антенной сигнала несравненно проще, чем в первом случае. Она основана на использовании обращения волнового фронта (ОВФ) [6] или на других хорошо известных и относительно простых методах [7, 8, 10] выделения сигналов, отвечающих волноводным модам или лучам. В последнем случае помимо гидрофонов приемная антенна должна иметь вдоль своей апертуры датчики температуры, глубины и солености (проводимости), а также устройства для позиционирования антенны в пространстве. Они нужны для оценки вертикального профиля скорости звука и последующих вычислений энергонесущих волноводных мод. Как показано в работе [7], информационные сигналы, отвечающие таким модам и обладающие не очень большой полосой частот Δf ($\Delta f/f \leq 0.3$, f – несущая частота), практически не увеличивают свою длительность при дальнем распространении в мелководном волноводе и не испытывают пространственно-временных флуктуаций. Это важные преимущества для ЗПС, позволяющие избежать ошибок при передаче информации, связанных с межсимвольной интерференцией. Таким образом, во втором подходе при ЗПС применяются более сложные в техническом отношении устройства для приема акустических сигналов, но более простая и эффективная их обработка, осуществляемая в реальном масштабе времени.

Второй подход в наибольшей степени адаптирован для ЗПС на арктическом шельфе России, 75% которого имеет глубину менее 50 м. Очевидно, что для таких глубин изготовить вертикальную приемную антенну для ЗПС, работающую с сигналами на несущей частоте менее 1 кГц и с приемными гидрофонами, расположенными на расстоянии $\cong \lambda/2$ (λ – длина акустической волны, соответствующая несущей частоте), не представляет больших технических сложностей. Прототипы таких антенн, где помимо гидрофонов имеются датчики температуры, глубины и солености, а также устройства для позиционирования, известны [7, 11]. Подобные антенны можно изготовить и в модульном варианте при длине модуля $\lambda/2$. Это позволит собрать и применить антенну нужной длины, а именно, перекрывающую весь волновод в заданном районе арктического шельфа. В настоящей статье в рамках численного моделирования исследована возможность использования такой антенны для ЗПС на арктическом шельфе и даны количественные оценки ее эффективности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЕЕ РЕШЕНИЯ В РАМКАХ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе [7, 8] на основе обработки экспериментальных данных продемонстрировано, что на Атлантическом шельфе США (шельф у побережья штата Нью Джерси) оказывается возможной практически безошибочная передача информации с помощью ЗПС на расстоянии в 19.2 км. В эксперименте (речь идет об эксперименте SW'06) использовалась вертикальная приемная антенна. При обработке зарегистрированных сигналов применялся алгоритм модовой селекции (МС).

Однако по этим результатам нельзя с большой долей достоверности прогнозировать возможности ЗПС на арктическом шельфе при использовании автономных устройств с излучателями звука и вертикальными приемными антеннами. Тому есть несколько причин. Во-первых, это существенные отличия в характеристиках акустических волноводов на атлантическом шельфе США и арктическом шельфе России. Для мелководного арктического шельфа характерно очень сильное затухание звука, связанное с поглощением акустических волн в морском дне. Последнее обусловлено тем, что здесь скорость звука в дне может принимать значения и меньшие, чем скорость звука в морской воде [12]. Отметим, что при таких скоростях изменяется и зависимость передаточной функции волновода от частоты. Как следствие этого, при априори неизвестной скорости звука в дне оптимальным для передачи информации по ЗПС на арктическом шельфе является диапазон частот $\Delta f = 600\text{--}900$ Гц [13]. (В работе [13] исследовались особенности ЗПС в случае применения одиночного приемника звука.) Существенные отличия имеют место и в вертикальном профиле скорости звука в воде для сравниваемых акваторий. На атлантическом шельфе в летнее время для профиля характерен резкий отрицательный градиент, а на мелководном арктическом шельфе (в частности, при глубине ≤ 30 м), перемешиваемом поверхностным волнением, скорость звука в водном слое практически не зависит от глубины. В итоге на атлантическом шельфе имеют место интенсивные внутренние волны, вызывающие флуктуации показателя преломления в волноводе и влияющие на распространение энергонесущих мод звукового поля. При этом указанные моды не взаимодействуют с поверхностью, распространяясь в придонном волноводе. Соответственно, поверхностные волны не влияют на распространение этих мод. Для арктического шельфа внутренние волны не характерны, однако поверхностные волны существенным образом влияют на распространение звука в летнее время года. В зимнее время волно-

вод арктического шельфа покрыт льдом, что также необходимо учитывать при анализе возможностей ЗПС в Арктике.

Вторая причина, затрудняющая оценку возможностей ЗПС по экспериментальным результатам, представленным в работе [7, 8], состоит в том, что эти результаты относятся к большим расстояниям между источником и приемником звука. В то же время уже на малых (сотни метров) расстояниях между приемником и источником звука на арктическом шельфе имеет место сложная зависимость передаточной функции от частоты [13], приводящая к увеличению длительности передаваемых сигналов и, соответственно, к межсимвольной интерференции. Как следствие, необходима проверка работоспособности алгоритмов МС для ЗПС и в этой ситуации.

Третья причина связана с характеристиками подводных акустических шумов. В случае применения МС в первую очередь оказывается важной пространственная анизотропия шумов в вертикальной плоскости, которая заметным образом зависит от исследуемого района.

Возможности применения ОВФ для ЗПС в случае использования вертикальной антенны на арктическом шельфе также не до конца ясны. Насколько нам известно, апробация алгоритмов ОВФ для ЗПС в этом регионе не проводилась. Применение ОВФ в пассивном режиме (вертикальная приемная антенна) для ЗПС исследовалось в морском заливе Puget Sound (тихоокеанское побережье США) [6]. В активном режиме с использованием вертикальных излучающих антенн характеристики ЗПС измерялись в Средиземном море [14]. Сравнение возможностей ЗПС при ОВФ и модовой селекции для Арктического шельфа является одной из задач настоящей статьи.

При моделировании ЗПС на арктическом шельфе с использованием вертикальной приемной антенны выбирались те же параметры волновода, что и в работе [13]. Предполагалось, что глубина волновода составляет $H = 30$ м. Скорость звука в воде $c = 1460$ м/с, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³. Дно – жидкая однородная среда (полупространство), и скорость продольных акустических волн в дне принимает значения $c_1 = 1600$ и 1400 м/с. В последнем случае скорость звука меньше, чем скорость звука c в воде, что обычно имеет место в случае газонасыщенного дна. Плотность в дне $\rho_1 = 1850$ кг/м³. Коэффициент затухания звука в дне β_1 полагался зависящим от частоты f и равным $\beta_1 = 1.07 \times 10^{-4} f^{2.6}$ дБ/км, где f в герцах. (При таком значении коэффициента β_1 затухание звука в водном слое по оценкам авторов соответствует

экспериментально наблюдаемым в Баренцевом море [10].)

Для расчета передаточной функции $K(\omega, r, z_0, z_j)$ между точечным источником и гидрофоном с номером j на приемной антенне мы использовали следующее известное соотношение, базирующееся на модовом описании звукового поля в неоднородном волноводе [9]²:

$$K(\omega, r, z_0, z_j) = NG(\omega, r, z_0, z_j),$$

$$G(\omega, r, z_0, z_j) = \sum_{m=1}^M C_m(r, z_0, \omega) \times \quad (1)$$

$$\times \frac{\Psi_m(r, z_j, \omega)}{\sqrt{q_m(r, \omega)} r} \exp\left(i \int_0^r q_m(r', \omega) dr'\right).$$

Здесь N – нормировочный коэффициент, имеющий размерность длины и выбираемый таким образом, чтобы на расстоянии 1 м был заданный уровень излучения акустического сигнала, $G(\omega, r, z_0, z_j)$ – функция Грина для уравнения Гельмгольца с функцией точечного источника (дельта-функцией) в правой части, $\Psi_m(r, z, \omega)$ и $\xi_m(r, \omega) = q_m(r, \omega) + i\gamma_m(r, \omega)/2$ – собственные функции (волноводные моды) и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля для рассматриваемого волновода, $\omega = 2\pi f$, r – расстояние между источником и приемником звука, z_0 и z_j – глубины источника и приемного гидрофона, отсчитываемые от верхней равновесной поверхности водного слоя. Здесь и далее предполагалось, что для приема сигналов используется вертикальная приемная антенна с эквидистантно расположенными гидрофонами, перекрывающая весь водный слой. Гидрофоны располагаются на расстоянии 1 м друг от друга, и общее число гидрофонов равно J . Для определения модовых коэффициентов $C_m(r, z_0, \omega)$, так же, как это сделано в работе [13], решалась система дифференциальных уравнений для каждой из частот f из исследуемого частотного диапазона с шагом 1 Гц:

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

² При выбранном далее определении величина $K(\omega, r, z_0, z_j)$ является безразмерной величиной и определяет связь спектров излученного $S_0(\omega)$ и принятого $S_r(\omega, r, z_0, z_j)$ сигналов: $S_r(\omega, r, z_0, z_j) = K(\omega, r, z_0, z_j) S_0(\omega)$.

Граничные условия: $C_m(0, z_0, \omega) = \frac{\exp(i\pi/4)}{\sqrt{8\pi}} \Psi_m(0, z_0, \omega)$. Здесь b_{mn} — коэффициенты взаимодействия между модами, которые при наличии шероховатой свободной поверхности выражаются как [15]:

$$b_{mm}(r) = 0, \quad b_{mn}(r) = \frac{q_n(r)}{2q_m(r)} B_{nm}(r) - \frac{1}{2} B_{mn}(r), \quad \text{при } m \neq n, \quad (3)$$

$$B_{mn}(r) = \frac{1}{q_m^2(r) - q_n^2(r)} \frac{\partial \zeta(r, \varphi)}{\partial r} \times \left. \left(\frac{\partial \Psi_m(r, z)}{\partial z} \frac{\partial \Psi_n(r, z)}{\partial z} \right) \right|_{z=\zeta} = -B_{nm}(r). \quad (4)$$

Здесь $\zeta(r, \varphi)$ — случайные отклонения морской поверхности от положения равновесия в точке (r, φ) в результате поверхностного волнения (ПВ), φ — азимутальный угол. Максимальный номер моды M выбирался равным $M = 2H/\lambda$. При вычислении мод использовался разрез Пекериса. Приближения и ограничения приведенной выше методики расчета передаточной функции изложены в работе [12].

Случайные реализации ПВ $\zeta(r, \varphi)$ 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 [16]. 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 $\sigma_\zeta = 0.56$ м, и длина поверхностной волны Λ , отвечающей максимуму в пространственном спектре ПВ, равна $\Lambda = 192$ м. Таким образом, параметр Рэлея для бриллюэновских лучей, отвечающих энергонесущим волноводным модам, был много меньше единицы.

Расчеты передаточной функции для зимних условий проводились в широкой полосе частот для фиксированной толщины ледового покрова h .

Соответственно, для вычислений использовалась формула (2) в приближении $\zeta(r, \varphi) = 0$ и в отсутствие шероховатостей нижней границы ледового покрова. В отличие от условий на свободной поверхности, где собственные функции принимают нулевое значение $\Psi_m(0) = 0$, при решении задачи Штурма–Лиувилля на границе вода–лед вводилось условие третьего рода:

$$\left[\Psi_m(z) - \frac{i\omega\rho}{Z_{\text{ice}}(\xi_m)} \frac{d\Psi_m}{dz} \right]_{z=h} = 0.$$

Входной импеданс $Z_{\text{ice},m}$ вычислялся согласно [17]. Параметры льда выбирались следующими: плотность 917 кг/м³, скорость продольных волн 3500 м/с, скорость поперечных волн 1800 м/с, коэффициент затухания продольных волн 0.3 дБ/λ, коэффициент затухания поперечных волн 1.0 дБ/λ.

В случае использования всей описанной выше антенны, настроенной на выделение сигнала, отвечающего первой моде (“модовая” антенна), передаточная функция $K_a(\omega, r, z_0)$ рассчитывалась с помощью следующего соотношения:

$$K_a(\omega, r, z_0) = N_a \sum_{j=1}^J K(\omega, r, z_0, z_j) \Psi_1^0(\omega_c, z_j), \quad (5)$$

где $\Psi_1^0(\omega_c, z_j)$ — собственная функция первой моды в точке приема в отсутствие ПВ с ледовым покровом или без него, ω_c — несущая частота при ЗПС, N_a — нормировочный коэффициент:

$$N_a = 1 / \sum_{j=1}^J |\Psi_1^0(\omega_c, z_j)|.$$

Учитывая ортогональность собственных функций, соотношение (5) позволяет в первом приближении выделить сигнал, отвечающий первой энергонесущей моде. Такой способ МС более прост в реализации по отношению к методам, развитым в работе [7, 18]. При этом он оказывается наиболее эффективным в отношении сигнала первой моды на арктическом шельфе по следующим причинам. Собственная функция первой моды слабо зависит от частоты, скорости звука в дне и от возмущений верхней границы волновода. Для иллюстрации этого факта на рис. 1 показаны модули первой моды в диапазоне частот 600–900 Гц, скорости звука в дне 1600 м/с и для глубин волновода от 26 до 34 метров в случае верхней взволнованной границы волновода, сво-

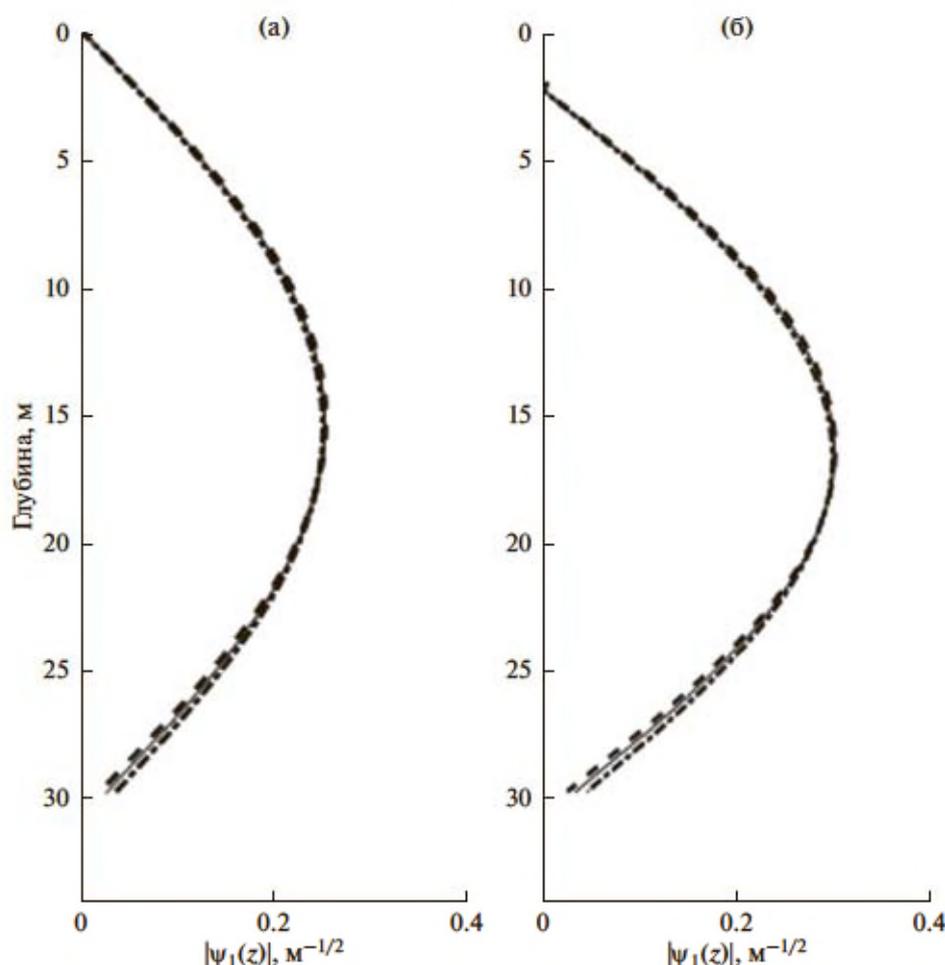


Рис. 1. Первая волноводная мода (а) для свободной поверхности и (б) при наличии ледового покрова толщиной 2 м. Штрихпунктирная линия соответствует частоте $\omega_1/2\pi = 600$ Гц, сплошная линия $\omega_c/2\pi = 750$ Гц, штриховая линия $\omega_2/2\pi = 900$ Гц.

бодной от ледового покрова, а также при наличии ледового покрова толщиной 2 м. Как видно на этом рисунке, при изменениях частоты и глубины волновода, а также при наличии ледового покрова слабо меняется не только форма собственной функции, но и глубина, на которой имеет место ее максимум. Очевидно, что на эту глубину должен быть помещен излучатель звука для наиболее эффективного возбуждения именно первой моды. Так и было сделано при численном моделировании ЗПС в случае применения модовой антенны.

В случае моделирования возможностей ЗПС при использовании пассивного ОВФ передаточная функция канала $K_a^{ph}(\omega, r, z_0)$ вычислялась следующим образом:

$$K_a^{ph}(\omega, r, z_0) = \sum_{j=1}^J [K(\omega, r, z_0, z_j)(K^*(\omega, r, z_0, z_j))^*], \quad (6)$$

где $K^*(\omega, r, z_0, z_j)$ – передаточная функция канала в присутствии ПВ, полученная с помощью известного пробного сигнала (преамбулы). Символ “звездочка” означает комплексное сопряжение. $K^*(\omega, r, z_0, z_j)$ может отличаться от $K(\omega, r, z_0, z_j)$ при длительности передаваемого сигнала большей, чем характерное время изменения ПВ.

Заметим далее, что принимаемый при ЗПС сигнал $s(t)$, зависящий от времени t , может быть записан через обратное преобразование Фурье F^{-1} в следующем виде: $s(t) = F^{-1}[S(\omega)] \equiv \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[\int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \right]$,

$$S(\omega) = \begin{cases} S_0(\omega)K(\omega, r, z_0, z_j) + P_N(\omega, z_j) & \text{при одиночном приемнике,} \\ S_0(\omega)K_a(\omega, r, z_0) + N_a \sum_{j=1}^J P_N(\omega, z_j) \Psi_1^0(\omega_c, z_j) & \text{при МС,} \\ S_0(\omega)K_a^{ph}(\omega, r, z_0) + \sum_{j=1}^J P_N(\omega, z_j) (K(\omega, r, z_0, z_j))^* & \text{при ОВФ,} \end{cases} \quad (7)$$

где $S(\omega)$ – спектр принимаемого сигнала в присутствии шума, $\omega_1 - \omega_2$ – рабочий диапазон частот. Здесь под $P_N(\omega, z_j)$ понимается случайная реализация спектра шумового сигнала за время T , равное длительности информационного сигнала.

В диапазоне частот $\Delta f = (\omega_1 - \omega_2)/2\pi = 600 - 900$ Гц, наиболее удобном для ЗПС на арктическом шельфе [13], акустические шумы, как правило, обусловлены поверхностным волнением. В этом случае случайная реализация спектра звукового давления такого шума на одном из приемных гидрофонов антенны может быть вычислена на основе подхода Крона и Шермана [19] с помощью следующего соотношения:

$$P_N(\omega, z_j) = \sum_{m=1}^M \Psi_m(\omega, z_0) \Psi_m(\omega, z_j) \times \int_{r_1}^{r_2} \hat{S}(\omega, r) H_0^1(\xi_m(\omega)r) \sqrt{2\pi r} dr, \quad (8)$$

где $H_0^1(\xi_m(\omega)r)$ – функция Ханкеля, $\hat{S}(\omega, r)$ – комплексная спектральная амплитуда поля давления от “шумового кольца”, расположенного на расстоянии r , множитель $\sqrt{2\pi r}$ позволяет учесть, что шум приходит со всех направлений в горизонтальной плоскости. Значения r_1 и r_2 определяют эффективную ширину “шумового кольца”. Величина z_0 выбиралась равной $z_0 = 0.1$ м ($z_0 \ll \sigma_c$). При моделировании предполагалось, что $r_1 = 1$ м,

$r_2 = 10^4$ м (выбор больших значений r_2 практически не влиял на результат моделирования.) Заметим также, что формула (8) при суммировании $M = 2H/\lambda$ мод хорошо работает для расстояний $r \geq H$. При $r < H$, вообще говоря, требуется дополнительный учет непрерывного спектра при модовом описании поля. Однако именно шумы, приходящие с расстояния $r \geq H$, в первую очередь важны при анализе работоспособности вертикальных приемных антенн.

Комплексная амплитуда $\hat{S}(\omega, r)$ моделируется в виде суммы действительной и мнимой частей, каждая из которой является белым шумом с одинаковыми кумулянтами.

$$\hat{S}(\omega, r) = N_n (\hat{S}_{\text{Re}}(\omega, r) + i \hat{S}_{\text{Im}}(\omega, r)), \quad (9)$$

где N_n – нормировочный коэффициент, определяемый из условия

$$\frac{2}{TJ} \sum_{j=1}^J \langle |P_N(\omega, z_j)|^2 \rangle = \hat{G}(\omega),$$

где $\hat{G}(\omega)$ – спектральная плотность шума поверхностного волнения, T – время ($T = 2\pi/\Delta\omega$, $\Delta\omega$ – спектральное разрешение), угловые скобки означают усреднение по отдельным реализациям шумового сигнала. В мелком море при скорости ветра 10 м/с типичное значение $\hat{G}(\omega) = 10^{-6}$ Па²/Гц [20].

Запишем далее формулу (7) в виде, удобном для численного моделирования:

$$s(t) \approx \begin{cases} \int_0^T s_0(\tau) h_j(t - \tau) d\tau + n_j(t) & \text{при одиночном приемнике,} \\ \int_0^T s_0(\tau) h_a(t - \tau) d\tau + N_a \sum_{j=1}^J n_j(t) \text{Re}(\Psi_1^0(\omega_c, z_j)) & \text{при МС,} \\ \int_0^T s_0(\tau) h_a^{ph}(t - \tau) d\tau + \int_0^T \sum_{j=1}^J h_j'(\tau - t) n_j(\tau) d\tau & \text{при ОВФ.} \end{cases} \quad (10)$$

Здесь функции $h_j(t)$ и $h'_j(t)$ имеют смысл импульсных характеристик волновода в рабочей полосе частот при приеме на одиночный гидрофон в присутствии и отсутствии ПВ соответственно:

$$h_j(t) = \mathbf{F}^{-1} [K(\omega, r, z_0, z_j)],$$

$h'_j(t) = \mathbf{F}^{-1} [(K(\omega, r, z_0, z_j))^*]$. Аналогично

$h_a(t) = \mathbf{F}^{-1} [K_a(\omega, r, z_0)]$ – импульсная характеристика волновода для модовой антенны,

$h_a^{ph}(t) = \mathbf{F}^{-1} [K_a^{ph}(\omega, r, z_0)]$ – импульсная характеристика волновода для сигнала, распространяющегося в прямом (в присутствии ПВ) и обратном (без ПВ) направлении. $s_0(t) = \mathbf{F}^{-1} [S_0(\omega)]$ – излучаемый сигнал, зависящий от времени,

$n_j(t) = \mathbf{F}^{-1} [P_N(\omega, z_j)]$ – временная реализация шумов ПВ на j -м приемнике в полосе частот Δf .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 показаны результаты расчетов передаточных функций волновода при приеме на “модовую” антенну для свободной невозмущенной верхней границы, в присутствии поверхностного волнения и в присутствии ледового покрова для скоростей звука в дне $c_1 = 1400$ и 1600 м/с, $r = 5000$ м. Глубина излучателя звука $z_0 = 15.5$ м. Как видно на рисунке, при априори неизвестной скорости звука в дне наиболее удобный диапазон частот для звукоподводной связи составляет 600–900 Гц. В этом диапазоне ЗПС будет одинаково хорошо работать вне зависимости от величины c_1 . Этот результат соответствует отмеченным выше выводам о передаточной функции при одиночном источнике и приемнике звука [13]. Заметим также, что присутствие льда или взволнованной поверхности приводит к незначительному уменьшению передаточной функции с ростом частоты.

Для оценки качества ЗПС вычислялись зависимости коэффициента битовых ошибок³ (BER) от расстояния до источника звука при передаче тестового сигнала через рассмотренный выше волновод, $z_0 = 15.5$ м. Расчеты проводились для расстояний r от 100 до 5000 м с шагом по расстоянию 10 м. Моделировалась передача сигнала из 2254 символов. Применялась двоичная фазовая модуляция. Скорость передачи информации выбиралась равной 300 бит/с. Несущая частота

³ BER равен отношению числа ошибочно принятых бит (символов) к общему числу бит измеряемого сигнала в заданном временном интервале.

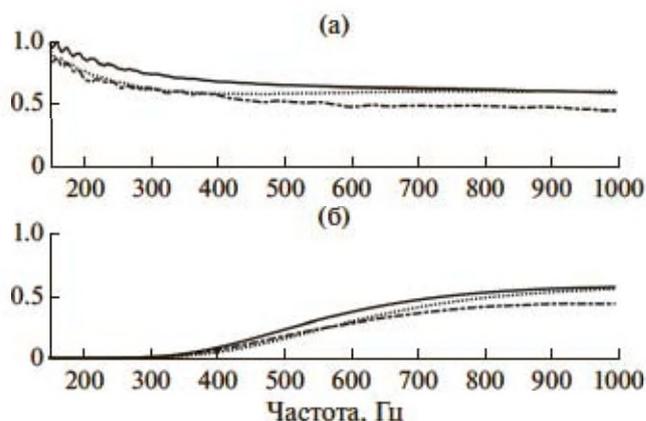


Рис. 2. Передаточная функция волновода при использовании “модовой” антенны. (а) $c_1 = 1600$ м/с, (б) $c_1 = 1400$ м/с, сплошная линия – в отсутствие ледового покрова и поверхностного волнения, пунктирная линия – с ледовым покровом, штрихпунктирная – при наличии поверхностного волнения.

$f_c = 750$ Гц. Частота оцифровки предполагалась равной 3 кГц. Передаваемый сигнал включал в себя преамбулу из двух М-последовательностей из 127 символов и случайную информационную последовательность из 2000 символов. Преамбула использовалась для определения момента времени прихода сигнала в точку приема и подбора оптимальной фазы несущей. (На практике преамбула обычно используется для оценки передаточной функции канала $K(\omega, r, z_0, z_j)$.)

На рис. 3 показана зависимость BER от расстояния для одиночного источника и приемника $z_j = 15$ м для $c_1 = 1400$ и 1600 м/с в отсутствие шумов и при отношении сигнал/шум (SNR), равным 0 дБ. (Здесь и далее SNR определяется как отношение среднеквадратичных значений сигнала и шума при приеме на одиночный гидрофон на расстоянии 5 км.)⁴ Как видно на рисунке, даже в отсутствие шума (см. рис. 3а, 3б) величина BER может достигать достаточно больших значений (более 10%), что связано с межсимвольной интерференцией и соответствует полученным ранее результатам [13]. Здесь интересно отметить, что с увеличением расстояния между источником и приемником величина BER заметно уменьшается, что связано с вымиранием мод высших номеров и, соответственно, с доминированием первой

⁴ Расчеты показали, что для SNR = 0 дБ при уровне шума 60 дБ/√Гц относительно 1 мкПа/√Гц при выбранных параметрах модели достаточно иметь источник звука с уровнем излучения ≈ 14 Па на расстоянии 1 м в полосе 300 Гц. (Акустическая мощность излучения ≈ 2 мВт.)

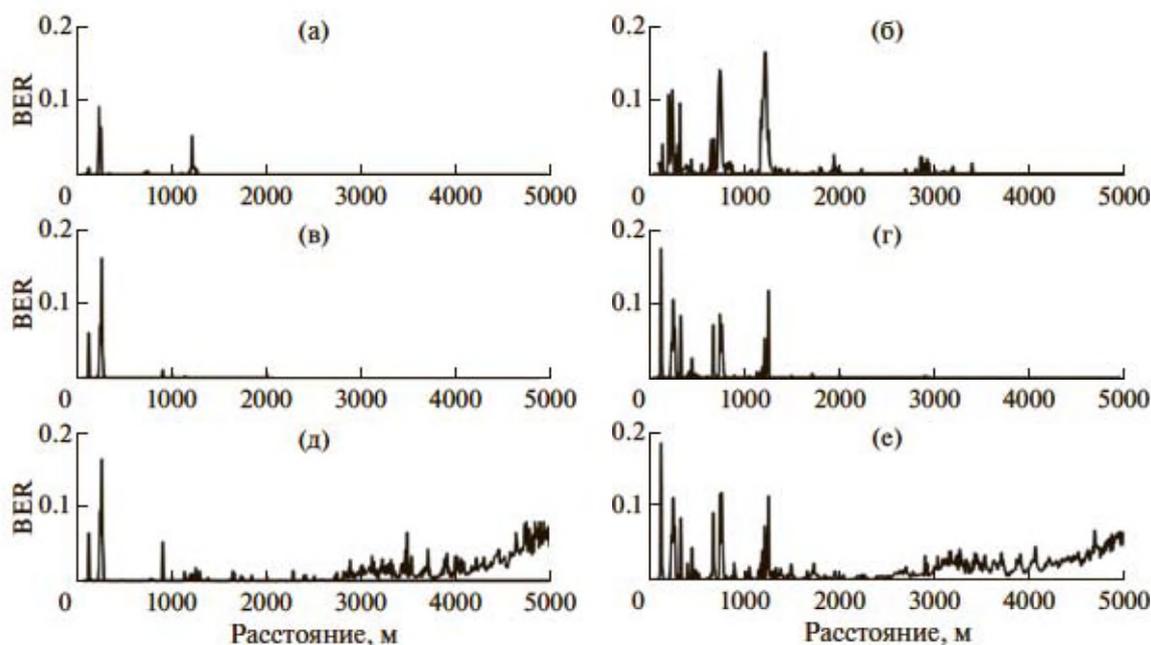


Рис. 3. Зависимость величины BER при приеме на одиночный гидрофон на глубине 15 м. Левая колонка рисунков $c_1 = 1400$ м/с, правая $c_1 = 1600$ м/с. (а) и (б) Величина BER в отсутствие ПВ и при отношении сигнал/шум более 20 дБ, (в) и (г) то же в присутствии ПВ, (д) и (е) то же в присутствии ПВ и при отношении сигнал/шум 0 дБ.

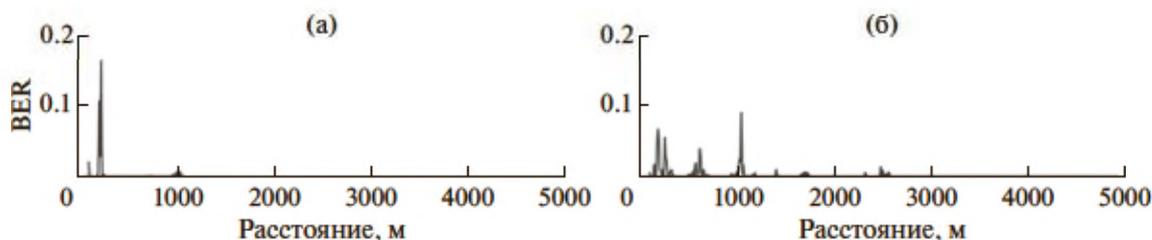


Рис. 4. Зависимость величины BER от расстояния r при приеме на одиночный гидрофон на глубине 15 м при наличии ледового покрова в отсутствие шума: (а) $c_1 = 1400$ м/с, (б) $c_1 = 1600$ м/с.

моды для нашего случая, когда источник и приемник находятся на глубине, отвечающей максимуму первой моды. При наличии шума зависимость BER от расстояния до источника r становится более сложной, поскольку отношение сигнал/шум уменьшается с ростом r . Отмеченные выше закономерности в поведении BER имеют место и при наличии ледового покрова – см. рис. 4. (Толщина льда 2 м.)

Использование антенн, перекрывающих весь волновод, значительным образом улучшает качество ЗПС. На рис. 5 и 6 для расстояния 5 км показаны зависимости величины BER от отношения сигнал/шум и векторные диаграммы принимаемого сигнала для SNR = 0 дБ соответственно. Как видно, при выбранных для моделирования параметрах задачи величина BER при отношении SNR ≥ -10 дБ близка к нулю как в случае приме-

нения антенны, настроенной на прием сигналов первой моды, так и в случае использования ОВФ. Это имеет место и при наличии ледового покрова. Заметим здесь, что применение антенны, настроенной на прием сигналов первой моды, не только уменьшает межсимвольную интерференцию, но и приводит к подавлению принимаемых акустических шумов, обусловленных поверхностным волнением. Действительно, такая антенна реагирует на шумы в достаточно узком диапазоне углов скольжения $\Delta\varphi_1$, соответствующем углу скольжения так называемого “бриллюэновского” луча первой моды. (Для несущей частоты $f_c = 750$ Гц в рассматриваемом нами акустическом волноводе $\Delta\varphi_1 \approx -5.5^\circ \dots 5.5^\circ$.) При этом шумовое акустическое поле приповерхностных источников анизотропно в вертикальной плоскости. Из приведен-

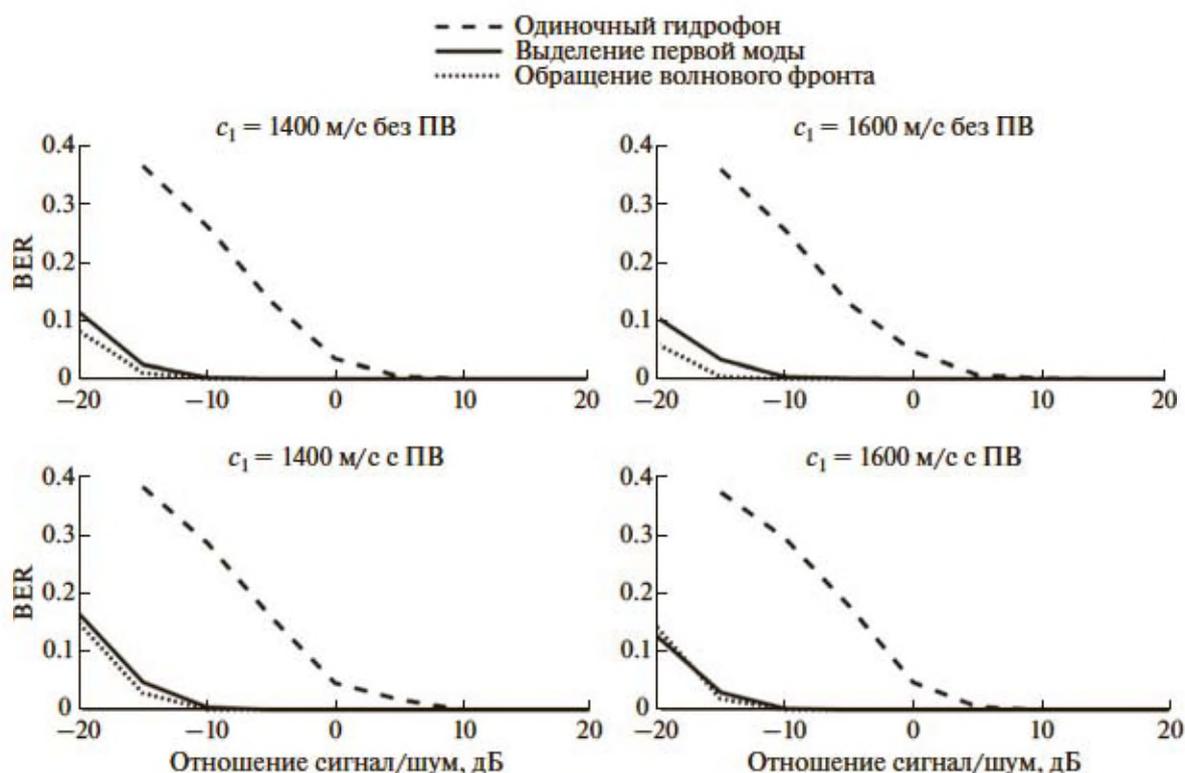


Рис. 5. Зависимости величины BER от отношения сигнал/шум SNR на расстоянии 5 км при различных условиях (скорость звука в дне $c_1 = 1400$ или 1600 м/с, в отсутствие и при наличии поверхностных волн) и вариантах приема (одиночный гидрофон, вертикальная антенна с выделением первой моды или обращением волнового фронта).

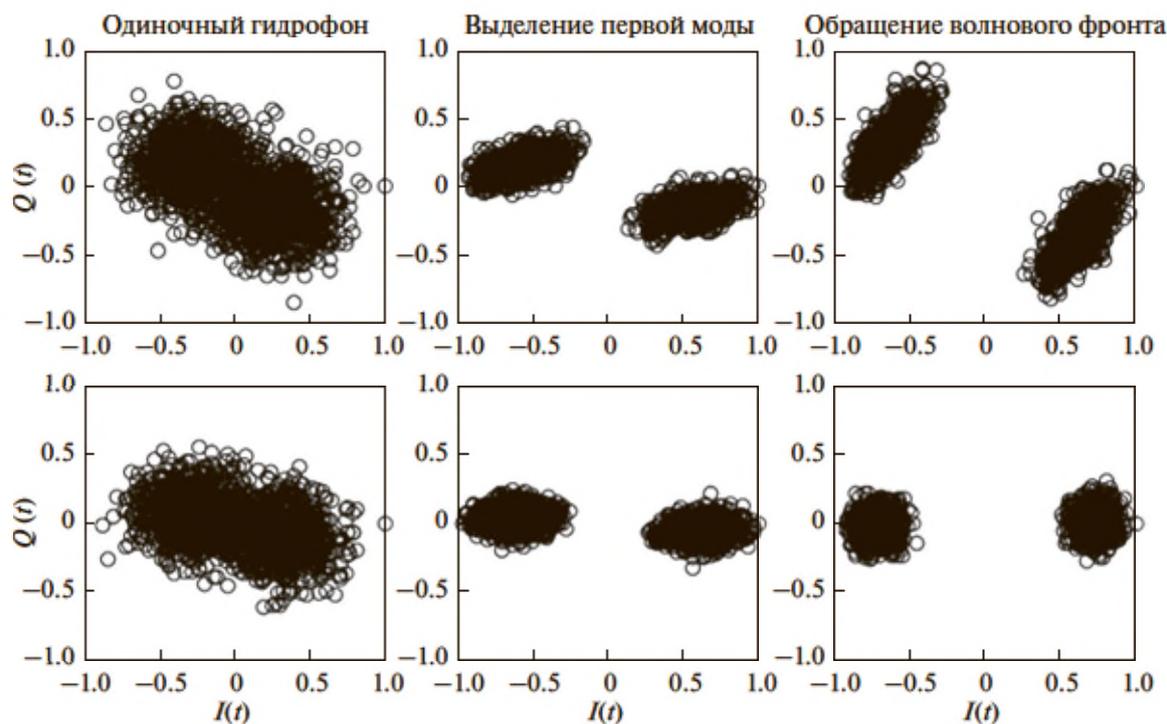


Рис. 6. Векторная диаграмма сигнала, принятого на расстоянии 5 км на одиночный гидрофон и на вертикальную антенну с дополнительной обработкой при наличии поверхностного волнения. Верхний ряд рисунков соответствует скорости звука в дне 1400 м/с, нижний – 1600 м/с. $I(t)$ – синфазная составляющая, $Q(t)$ – квадратурная составляющая. В исходном сигнале $I(t) = \pm 1$, $Q(t) = 0$.

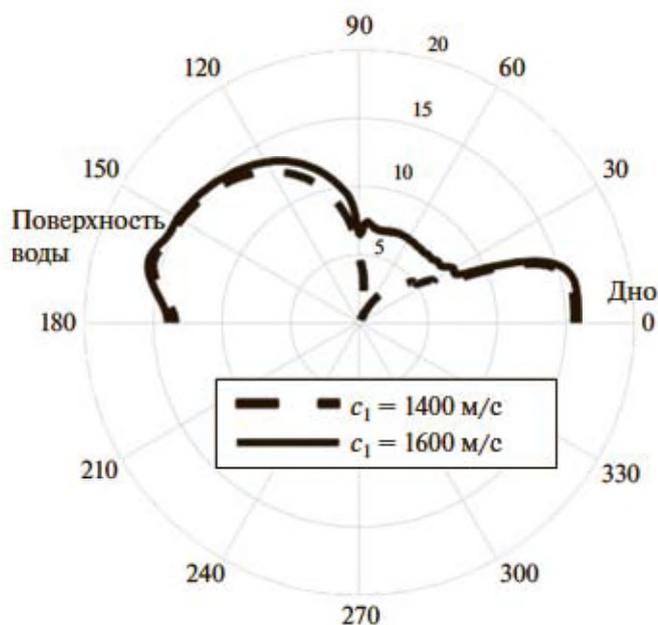


Рис. 7. Диаграмма направленности шума поверхностных источников в вертикальной плоскости для двух типов дна. Уровень шума указан в децибелах относительно минимального значения.

ной на рис. 7 угловой зависимости интенсивности такого шума следует, что наименьший уровень шума будет у звукового поля, отвечающего первой моде. Это, в свою очередь, должно приводить к дополнительному повышению помехоустойчивости.

На рис. 8 показаны зависимости BER от расстояния в случае применения вертикальных антенн при малых отношениях сигнал/шум ($\text{SNR} = -15$ дБ). Как показывает сравнение рис. 3 и 8, применение вертикальной антенны по сравнению с одиночным приемником позволяет компенсировать межсимвольную интерференцию, в том числе на малых расстояниях, а также использовать этот вид связи при значительно меньших величинах SNR. Полученный выигрыш от использования антенны составил около 15 дБ, что близко к величине $10 \lg J$, где J – число элементов вертикальной приемной антенны. Отметим, что применение ОВФ и выделения первой моды дает примерно одинаковый результат с точки зрения уровня ошибок BER, что особенно заметно при наличии поверхностного волнения (см. рис. 5, 6). Однако использование второго метода может быть предпочтительнее, т.к. для него требуются меньшие вычислительные мощности: необходимо только просуммировать сигналы с гидрофонов

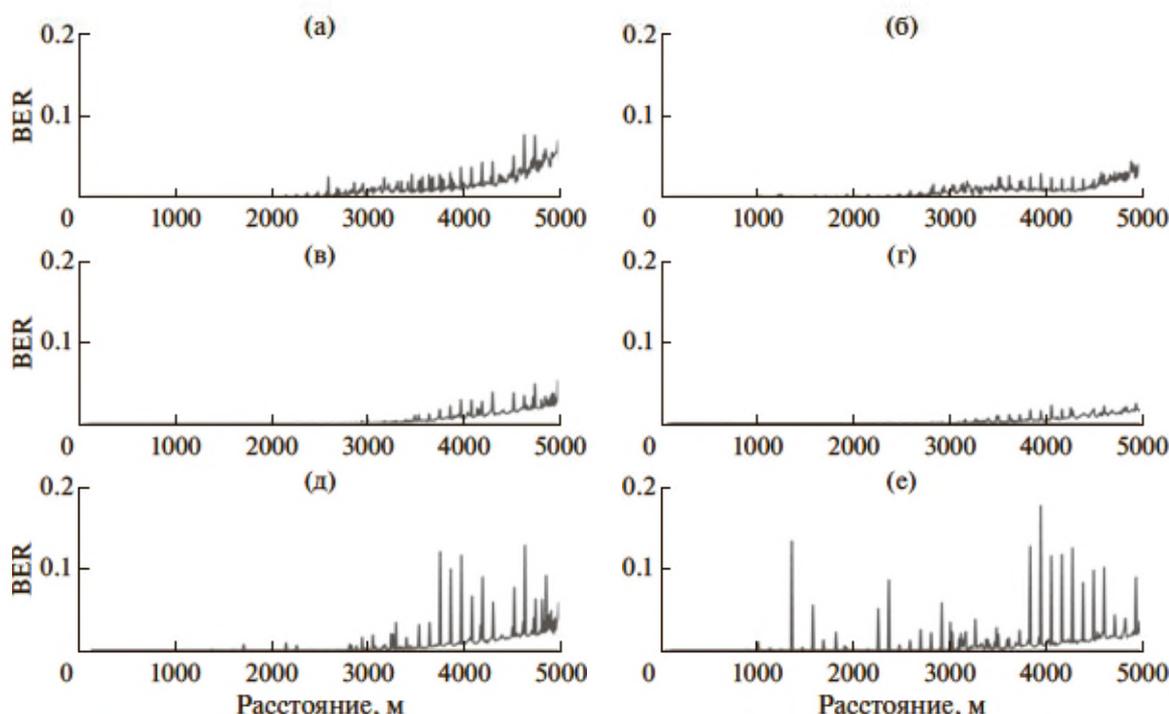


Рис. 8. Зависимость величины BER при приеме на вертикальную антенну. Левая колонка рисунков $c_1 = 1400$ м/с, правая $c_1 = 1600$ м/с. (а) и (б) Величина BER при модовой селекции (настройка на первую моду), (в) и (г) то же при использовании ОВФ при “замороженном” ПВ, (д) и (е) то же, когда вследствие ПВ передаточная функция волновода отличается от ее оценочного значения, полученного с помощью пробного сигнала.

с соответствующими весами, отвечающими первой моде, без какой-либо дополнительной адаптивной обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что при использовании вертикальных антенн, перегораживающих весь акустический волновод, разные методы пространственной обработки сигналов (МС и ОВФ) дают примерно одинаковые результаты при ЗПС.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что на арктическом шельфе качество связи в случае применения вертикальных антенн слабо зависит от скорости звука в дне, присутствия умеренного поверхностного волнения или наличия постоянного ледового покрова. Для рекомендованного в настоящей статье диапазона частот и расстояний в несколько километров указанные факторы слабо влияют на амплитуду сигнала и на межсимвольную интерференцию. Повышение BER главным образом происходит из-за увеличения уровня шумов.

Работа выполнена при частичной поддержке: РФФИ, проекты № 16-29-02036 и № 16-32-60194; Программы президиума РАН № 1.7 “Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proakis J.G. Adaptive equalization technics for acoustic telemetry channels // IEEE J. Ocean. Eng. 1991. V. 16. № 1. P. 21–31.
2. Захаров Ю.В., Коданев В.П. Помехоустойчивость адаптивного приема сложных акустических сигналов при наличии отражений от поверхности океана // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 212–219.
3. Roy S., Duman T.M., McDonald V., Proakis J.G. High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: Receiver structures and experimental results // IEEE J. Ocean. Eng. 2007. V. 32. № 3. P. 663–668.
4. Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 245–255.
5. Бобровский И.В., Рыбина М.С., Мелентьев В.Д., Яготинец В.П. Адаптивный прием составных частотных сигналов в гидроакустическом канале связи в условиях воздействия различных помех // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 275–282.
6. Rouseff D., Jackson D.R., Fax W.L.J., Jones C.D., Ritcey J.A., Dowling D.R. Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results // IEEE J. Ocean. Eng. 2001. V. 26. № 4. P. 821–831.
7. Morozov A.K., Preisig J.C., Papp J.C. Investigation of mode filtering as a preprocessing method for shallow-water acoustic communications // IEEE J. Ocean. Eng. 2010. V. 35. № 4. P. 744–755.
8. Morozov A.K., Preisig J.C., Papp J. Modal processing for acoustic communications in shallow water experiment // J. Acoust. Soc. Am., 2008, V. 124. № 3. Pt. 2. EL177–181.
9. Gray S.D., Preisig J.C., Brady D. Multiuser detection in a horizontal underwater acoustic channel using array observation // IEEE Trans. Signal Process. 1997. V. 45. № 1. P. 148–160.
10. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2012. 540 p.
11. Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система “Моллюск-07” // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 138–142.
12. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 3. С. 342–358.
13. Волков М.В., Григорьев В.А., Жилин И.В., Луников А.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Мелководный акустический волновод арктического типа как канал для передачи информации при звукоподводной связи // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 6. С. 676–681.
14. Edelmann G.F., Akal T., Hodgkiss W.S., Kim S., Kuperman W.A., Song H.C. An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal // IEEE J. Ocean. Eng. 2002. V. 27. № 3. P. 602–609.
15. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика неоднородных сред. Т. 2: Звуковые поля в слоистых и трехмерно-неоднородных средах. М.: Наука, 2009. 426 с.
16. 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.
17. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
18. Papp J.C., Preisig J.C., Morozov A.K. Physically constrained maximum likelihood mode filtering // J. Acoust. Soc. Am., 2010. V. 127. № 4. P. 2385–2391.
19. Cron B.F., Sherman C.H. Spatial-correlation functions for various noise models // J. Acoust. Soc. Am., 1962. V. 34. № 11. P. 1732–1736.
20. Урик П.Дж. Основы гидроакустики. Л.: “Судостроение”, 1978. 448 с.