

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 534.231

ЗВУКОПОДВОДНАЯ СВЯЗЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН В МЕЛКОВОДНЫХ
АКВАТОРИЯХ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

© 2021 г. М. В. Волков¹, А. А. Луньков^{1,2}, В. Г. Петников^{1, *}, А. В. Шатравин^{1, 3, **}

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

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

**e-mail: ashatravin@ocean.ru

Поступила в редакцию 01.08.2020 г.

После доработки 30.11.2020 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

В натурном эксперименте и в рамках численного моделирования продемонстрированы возможности звукоподводной связи в мелководной акватории, покрытой льдом. Исследованы преимущества применения вертикальных линейных приемных антенн различной длины и с разным числом гидрофонов. Анализировалась ситуация, когда глубина акватории много меньше, чем расстояние до приемной антенны. Выполнен сравнительный анализ нескольких алгоритмов пространственной обработки сигналов с двоичной фазовой манипуляцией и несущей частотой около 1 кГц при различных скоростях передачи информации. Эксперимент был проведен на оз. Байкал при толщине ледового покрова ≈ 66 см и при интенсивных акустических шумах, связанных с образованием трещин на поверхности льда. Показано, что в случае применения вертикальной антенны коэффициент битовых ошибок можно снизить более чем в 3 раза по сравнению с одиночным приемником.

Ключевые слова: звукоподводная связь, вертикальные гидроакустические антенны, распространение звука в мелководных акваториях с ледовым покровом

DOI: 10.31857/S003015742104016X

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное освоение и экологический мониторинг океанского шельфа и внутренних водоемов требуют разработки новых технологий для связи с автономными подводными аппаратами различного назначения. Для акваторий с ледовым покровом к таким востребованным и безальтернативным технологиям относится звукоподводная связь (ЗПС) (см., например, работы [5, 10], где описаны результаты применения стандартных модемов ЗПС с одиночными источниками и приемниками звука в Арктическом бассейне). Известно также, что в целом в мелководных акваториях применение вертикальных приемных антенн позволяет существенным образом улучшить качество ЗПС [1, 2, 8, 15]. Это оказывается возможным даже без применения традиционных для этого вида связи алгоритмов обработки сигналов [7, 11, 16] и связано с тем, что вертикальные антенны подавляют оба вида помех, возникающих при ЗПС, – межсимвольную интерференцию и фоновые акустические шумы. Однако в сложных и изменчивых условиях распространения звука

при ледовом покрове и сильных естественных акустических шумах улучшение качества ЗПС, обеспечиваемое антенной, спрогнозировать достаточно сложно. Экспериментальных результатов, позволяющих оценить подобное улучшение, явно недостаточно, а основанные на общей теории цифровой связи предположения в задачах ЗПС зачастую оказываются несостоятельными [14]. Это, во-первых, обусловлено тем, что ледовый покров в природных акваториях нельзя рассматривать как единый ледовый массив постоянной толщины. В натуральных условиях лед покрыт трещинами, а его нижняя граница представляет собой твердую поверхность с характерными шероховатостями (см., например [9]). Все это приводит к тому, что пространственные поля параметров льда, включая а также скоростей звука продольных и поперечных волн, а также коэффициентов затухания этих волн, являются случайными, причем зависящими и от времени. Шероховатости и трещины на льду меняют свои параметры и даже возникают вновь. Сплоченность льда также может быть заметно меньше десяти, когда ледовый

покров чередуется с большими разводьями, как это, например, имело место в экспериментах, описанных в работе [1]. Во-вторых, образование трещин приводит к генерации достаточно интенсивных и нестационарных акустических шумов.

Настоящая работа, где приведены экспериментальные оценки характеристик ЗПС на оз. Байкал в зимнее время года, направлена на выяснение преимуществ применения вертикальных линейных приемных антенн для указанного вида связи при сплошном ледяном покрове (сплоченность льда близка к десяти). Продемонстрировано, что использование автономных вертикальных антенн, опускаемых на дно с берегового припая (льда, примерзшего к берегу), обеспечивает стационарную постановку антенны и возможность долговременной устойчивой связи в диапазоне частот, близких к 1 кГц. Этот диапазон в некотором смысле является оптимальным для мелководного арктического шельфа и, в первую очередь, для районов со скоростью звука в дне меньшей, чем скорость звука в воде [2]. Для таких арктических районов характерно повышенное затухание акустических волн, распространяющихся в водном слое.

При использовании вертикальных линейных антенн, состоящих из цепочек с эквидистантно расположенными гидрофонами, важными параметрами являются необходимое количество этих приемников и отношение длины антенны к глубине акватории в месте ее использования. Чем меньше по абсолютной величине указанные параметры, тем ниже стоимость подобной антенны и больше время ее автономной работы, определяемое энергопотреблением предусилителей гидрофонов и блока первичной обработки информации. Из работы [8] следует, что антенна остается эффективной и в случае, когда расстояние между гидрофонами много больше, чем половина длины звуковой волны λ , соответствующей несущей частоте акустических сигналов. Ниже в рамках численного моделирования продемонстрирована такая эффективность при различных комбинациях числа гидрофонов, расстояний между ними и, соответственно, длины антенны. При этом основное внимание сосредоточено на эффективности пространственной обработки при небольших расстояниях ($r \approx 2H - 40H$, H – глубина акватории) между источником звука и антенной, когда звуковое поле в гидроакустическом канале описывается большим числом энергонесущих волноводных мод, включая как распространяющиеся, так и “вытекающие” моды. В этом случае межсимвольная интерференция проявляется сильнее всего, и такая ситуация, как правило, имеет место при ЗПС с автономными подводными аппаратами, обладающими источниками звука малой мощности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ

Эксперименты по звукоподводной связи были проведены в мелководной части оз. Байкал, где на глубине $H \approx 41$ м в марте 2019 г. была установлена автономная вертикальная цепочка из $J = 10$ гидрофонов (рис. 1а). Цепочка опускалась с припая, характерного для Байкала в это время года. Оцифровка и запись на флеш-память принимаемых сигналов $p_j(t)$ осуществлялись с помощью блока обработки информации, расположенного в специальном герметичном контейнере вместе с аккумуляторами для питания предусилителей гидрофонов. Контейнер располагался на ледовой поверхности. Несущий трос цепочки гидрофонов был натянут между донным якорем и якорем на поверхности льда, что обеспечивало стационарное положение приемных гидрофонов на соответствующих глубинах z_j :

$$z_j = 0.64 + (j - 1) \times 3.5 \text{ м}, \quad (1)$$

где $j = 1, \dots, J$ – номер приемного гидрофона. Глубины здесь и далее отсчитываются от границы раздела вода–лед. Толщина ледового покрова составляла $h = 0.66$ м. Зависимость скорости звука от глубины в месте проведения эксперимента, рассчитанная по результатам измерений вертикального профиля температуры, показана на рис. 1б. Видно, что скорость звука незначительно изменялась с глубиной¹.

Передача информации по ЗПС осуществлялась с помощью удаленного источника звука, находящегося на расстоянии $r = 353$ м от приемной цепочки. Источник был закреплен на растянутом между дном и ледовым покровом несущем фале. Глубина источника составляла $z_0 = 18.4$ м, а глубина места в точке установки излучателя равнялась $H = 55$ м. Акустическая трасса (источник – приемная цепочка) была ориентирована примерно параллельно береговой линии (рис. 2). Более подробно условия эксперимента описаны в работе [3].

Передаваемый бинарный сигнал $s_0(t)$ (ряд значений $+1$ и -1) включал в себя преамбулу из двух М-последовательностей, случайную последовательность из 2000 символов и постамбулу также в виде М-последовательности. Для преамбулы и постамбулы использовались М-последовательности с разным числом символов от 127 до 1023. Излучаемый сигнал $\hat{s}_0(t)$ формировался модуляцией несущего сигнала с частотой $f_c = 735$ Гц из сигнала $s_0(t)$, предварительно пропущенного через фильтр типа “корень из приподнятого коси-

¹ Дополнительные расчеты показали, что эти малые вариации скорости звука практически не влияют на общие закономерности ЗПС, отмеченные в этой статье.

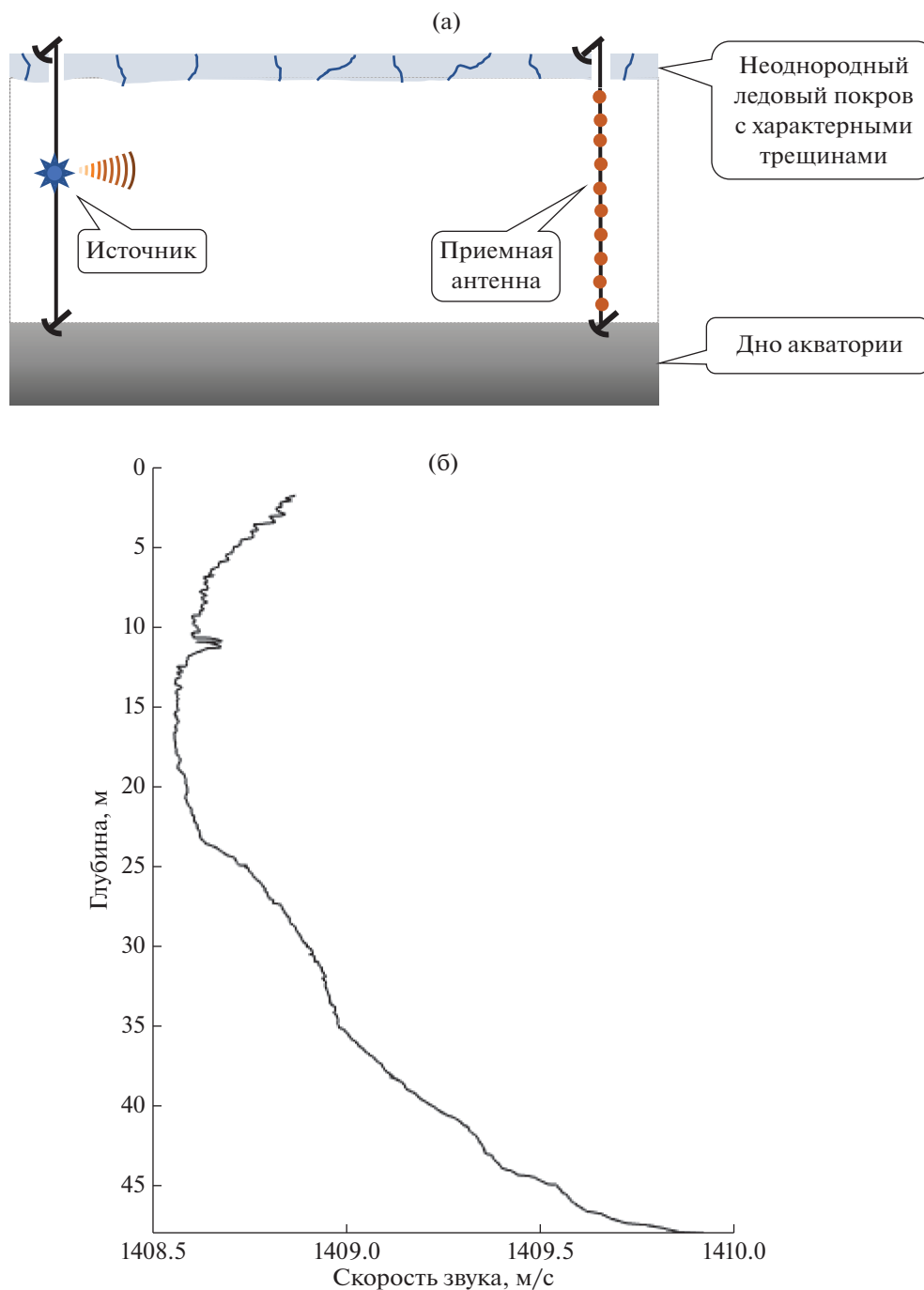


Рис. 1. Эксперимент по звукоподводной связи в оз. Байкал в марте 2019 г.: (а) – схема эксперимента, (б) – зависимость скорости звука в воде от глубины, рассчитанная по результатам измерений вертикального профиля температуры.

нуса”. Использование фильтрации позволяет получить более плоскую частотную характеристику и “сконцентрировать” мощность передаваемого сигнала в рабочей полосе частот по сравнению с простейшей двоичной фазовой манипуляцией [12]. Скорость передачи информации для различных сигналов составляла $q = 122.5$ или 183.75 бит/с (6 или 4 периодов несущей на символ).

Для обработки принятых сигналов применялись стандартные алгоритмы, показанные на рис. 3. Качество передачи информации ЗПС оценивалось с помощью коэффициента битовых ошибок BER (bit error rate), равного отношению ошибочно принятых бит (символов) к общему числу бит передаваемой информации, и отношения сигнал/помеха SNIR (signal to noise-plus-in-

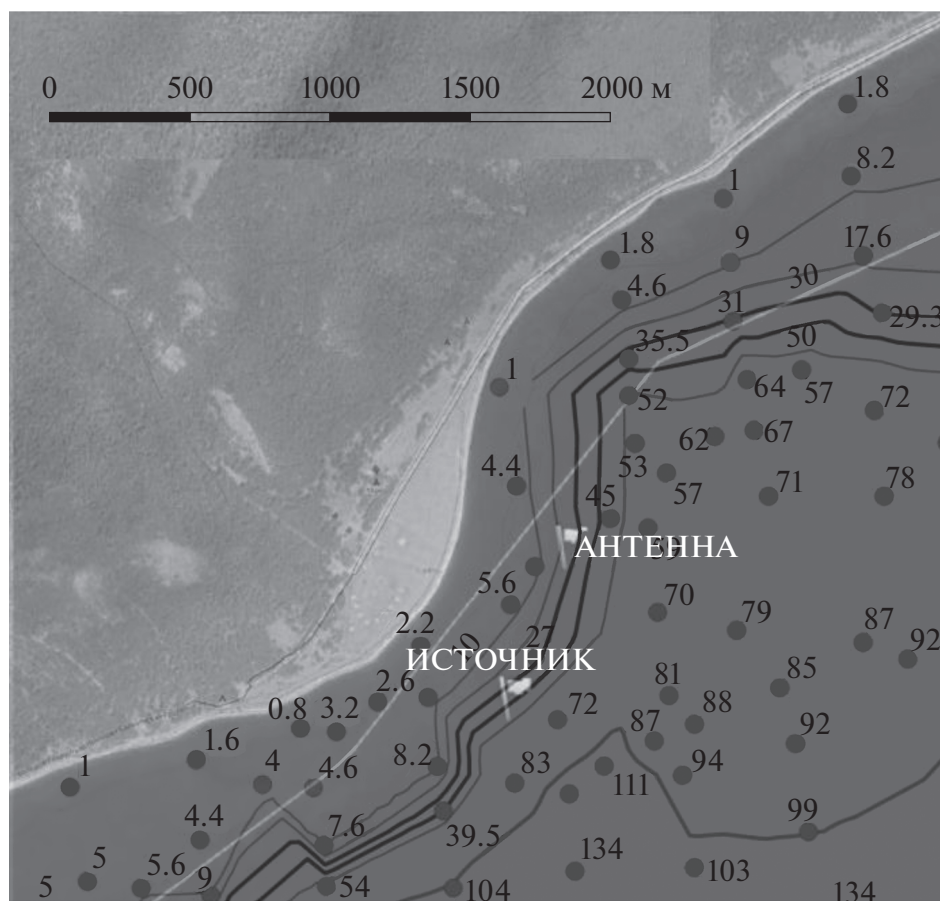


Рис. 2. Батиметрическая карта района работ с нанесенными местоположениями источника звука и приемной цепочки с гидрофонами.

terference ratio), рассчитываемого для так называемого “мягкого решения” декодирования по следующей формуле:

$$\text{SNIR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{N}}{\sqrt{\sum_n |K_j y_j(n) - s_0(n)|^2}} \right), \quad (2)$$

где $N = 2000$ – число символов в передаваемой бинарной последовательности $s_0(n)$, $y_j(n)$ – комплексный демодулированный сигнал, принятый на гидрофон с номером j и оцифрованный с частотой 1 отсчет на символ (см. рис. 3а), K_j – нормировочный множитель, вычисляемый по формуле

$$K_j = \frac{N}{\max_k \left| \sum_n y_j(n-k) s_0(n) \right|}. \quad (3)$$

Такой способ нормировки соответствует приведению уровня максимального по амплитуде

прихода в импульсном отклике к единице и позволяет оценивать помеху как разность между значениями мягкого решения и исходной бинарной последовательности. Нормировка не влияет на окончательный результат декодирования и служит лишь для оценки суммарного вклада межсимвольной интерференции и аддитивного шума в принятый сигнал. В табл. 1 приведены полученные значения SNIR и BER для одиночных гидрофонов, усредненные по четырем сигналам связи, а также для когерентной суммы четырех сигналов. Отметим, что при полученных значениях SNIR низкое качество связи является вполне ожидаемым. На рис. 4а приведено сравнение зависимости полученных в эксперименте значений BER от SNIR (средние для четырех сигналов) с теоретической кривой зависимости BER от отношения сигнал/шум (SNR) для канала с помехой в виде аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в отсутствие межсимвольной интерференции [8].

Наблюдаемая близость экспериментальной зависимости BER от SNIR к теоретической зависимости для АБГШ-канала сама по себе не позво-

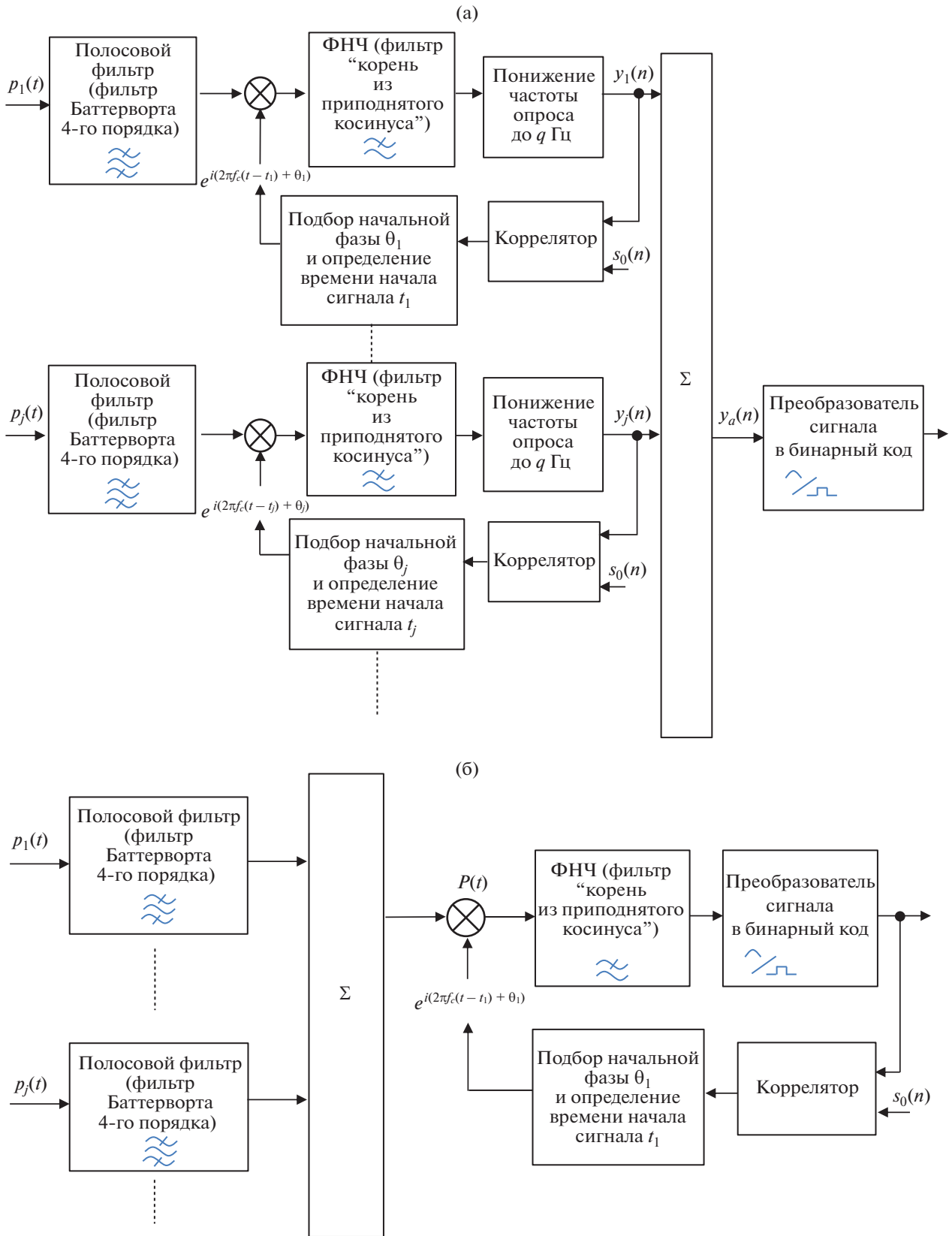


Рис. 3. Алгоритм обработки сигнала с антенны:
 (а) – с подбором фазы сигналов с отдельных приемников,
 (б) – без подбора фазы сигнала с отдельных приемников,
 (в) – в случае применения процедуры обращения волнового фронта.

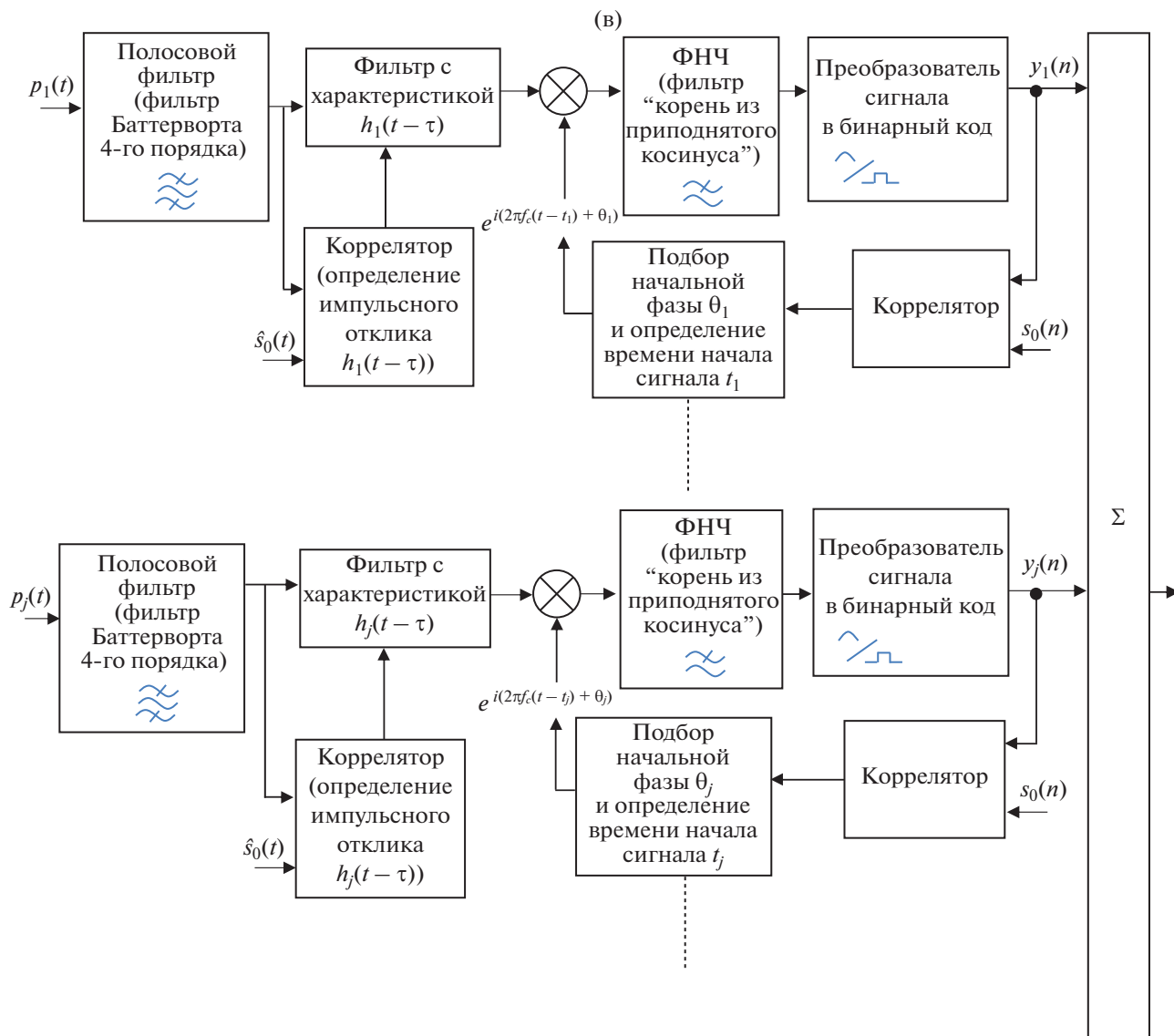


Рис. 3. Окончание.

ляет предположить схожесть двух каналов, т.к. передаваемая последовательность носила случайный характер, а межсимвольная интерференция в таком случае проявляется для одиночных приемников так же, как аддитивный шум. С целью отделить от возможной интерференции вклад аддитивного шума для каждого гидрофона был рассмотрен сегмент записи за несколько минут до начала сеансов связи, содержащий только фоновый шум. По этому сегменту записи были получены оценки SNR с использованием следующей формулы:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{N}}{\sqrt{\sum_n |K_j w_j(n)|^2}} \right), \quad (4)$$

где $N = 2000$ – число символов в передаваемой бинарной последовательности $s_0(n)$, $w_j(n)$ – комплексный демодулированный сегмент шума, принятый на гидрофон с номером j и оцифрованный с частотой один отсчет на символ (аналог сигнала $y_j(n)$ в формуле (3)), K_j – нормировочный множитель, вычисляемый для каждого гидрофона по формуле (3).

В силу линейности преобразований в результате такой обработки получают ошибки декодирования, которые были бы внесены аддитивным шумом в неискаженный интерференцией сигнал связи в случае его излучения в период записи этого шума (то есть “чисто шумовое” отношение SNR). Прослушивание записей, визуальный анализ их спектрограмм и анализ изменчи-

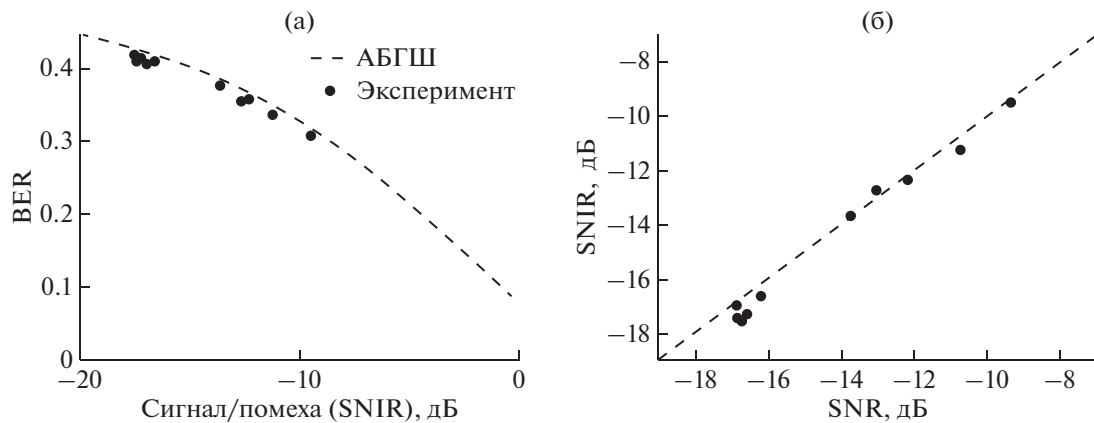


Рис. 4. Соотношение различного рода помех и их совместное влияние на качество ЗПС. (а) – Зависимость BER от уровня отношения сигнал/помеха (SNIR) в эксперименте (точки, средний по 4 сигналам уровень для 10 одиночных приемников) и теоретическая зависимость BER от уровня отношения сигнал/шум (SNR) для канала с помехой в виде аддитивного белого гауссовского шума (пунктирная линия); (б) – сравнение уровня отношения сигнал/помеха (SNIR) в эксперименте (по вертикальной оси) с уровнем отношения сигнал/помеха (SNR) для помехи в виде зарегистрированного в отсутствие связного сигнала аддитивного шума (по горизонтальной оси).

ности уровня шума вне рабочей полосы частот позволяют предположить, что аддитивный шум во время излучения сигналов связи отличался от рассмотренного шумового сегмента записи несущественно. В этом предположении сравнение полученных для одиночных гидрофонов значений “чисто шумового” SNR с SNIR для сигналов связи (рис. 4б) позволяет сделать вывод о том, что вклад аддитивного шума в общую помеху доминировал над межсимвольной интерференцией.

Однако отметим, что в целом аддитивные шумы в регионе работ представляли собой нестационарный случайный процесс. На рис. 5 показан пример сегмента записи фонового шума, содержащего кратковременные импульсы высокой интенсивности. Длительность одного шумового им-

пульса составляет примерно 1 мс, а его амплитуда превышает фоновый уровень на 40–50 дБ (рис. 5б). Спектр такого импульса перекрывает диапазон от нескольких десятков герц до нескольких килогерц (рис. 5в). Возникновение этого треска связано с изменением температуры внешней среды, например, утром после восхода Солнца, когда лед начинает таять. Такая импульсная помеха может полностью перекрывать несколько передаваемых символов, которые уже нельзя декодировать. Отметим здесь также, что, судя по литературным данным, имеет место общее снижение среднего уровня шума подо льдом на 5–10 дБ по сравнению с ситуацией, когда ледовый покров отсутствует [13]. Однако это преимущество реализуется далеко не всегда и вблизи берега существен-

Таблица 1. Экспериментальные значения BER и SNIR

Номер гидрофона	Глубина погружения, м	BER, % для одного сигнала, среднее по четырем сигналам	BER, % для когерентной суммы четырех сигналов	SNIR, дБ для одного сигнала, среднее по четырем сигналам	SNIR, дБ для когерентной суммы четырех сигналов
1	0.6	35.25	26.15	-12.7	-6.8
2	4.1	35.35	27.45	-13.7	-7.9
3	7.6	29.00	18.40	-9.5	-3.4
4	11.0	40.55	34.65	-17.5	-11.5
5	14.5	39.75	35.30	-17.3	-11.4
6	17.9	40.85	34.00	-16.7	-10.7
7	21.4	33.10	24.20	-12.3	-6.5
8	24.9	32.90	21.85	-11.3	-5.4
9	28.3	40.10	34.90	-17	-11.1
10	31.9	42.15	36.80	-18	-11.8

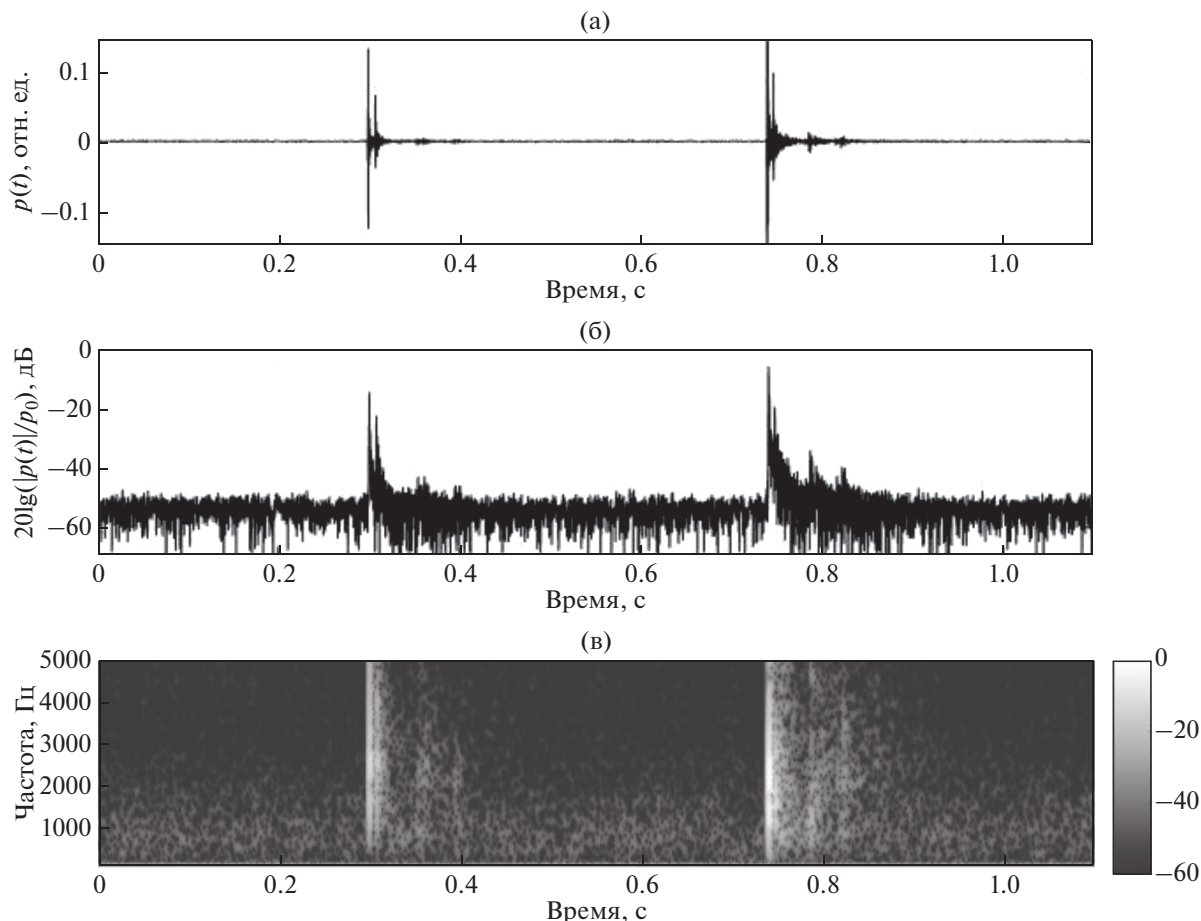


Рис. 5. Пример импульсных шумов высокой интенсивности : (а) – принятое акустическое давление $p(t)$ за интервал времени, в течение которого зарегистрировано два эпизода импульсной помехи (в моменты времени ~ 0.3 и ~ 0.72 с), (б) – уровень $p(t)$ в логарифмическом масштабе, (в) – спектрограмма сигнала. Сигнал зарегистрирован на 4-м гидрофоне антенны.

ным образом определяется уровнем антропогенных шумов, источники которых могут находиться и на берегу.

Преобладание в общей помехе вклада аддитивного шума позволяет предсказуемо увеличивать SNIR простым когерентным суммированием мягких решений для отдельных сигналов и гидрофонов. В табл. 1 представлены результаты такого когерентного суммирования по четырем сигналам связи для каждого гидрофона. Подавление ошибки декодирования для всех гидрофонов практически совпадает с теоретическим улучшением в $10\log_{10}4 = 6$ дБ, которое было бы достигнуто в случае отсутствия интерференции за счет одновременного усреднения некоррелированного аддитивного шума и сохранения мощности сигнала.

В наблюдаемом случае преобладания фонового шума над интерференцией когерентное сум-

мирование сигналов по антенне при использовании алгоритма, представленного на рис. 3а, ожидаемо оказалось по своей эффективности близко к когерентному сложению сигналов для отдельных гидрофонов антенны. Для каждого из 4 сигналов сложение по 10 гидрофонам увеличило SNIR на 9.8–10.2 дБ. Для полной когерентной суммы по 4 сигналам и 10 гидрофонам, т.е. при использовании цепочки гидрофонов как приемной линейной антенны, значение SNIR составило 0.3 дБ, улучшив качество связи на 15.7 дБ по отношению к средней ошибке при приеме на одиночный гидрофон. Это улучшение наглядно демонстрируют представленные на рис. 6 мягкие решения декодирования, т.е. синфазные и квадратурные компоненты сигналов² $y_j(n)$ и $y_a(n)$. (На этом рисунке черные точки соответствуют передаваемому символу -1 , а красные $+1$). Таким

² $y_a(n)$ – сигнал, получаемый на выходе антенны (см. рис. 3а).

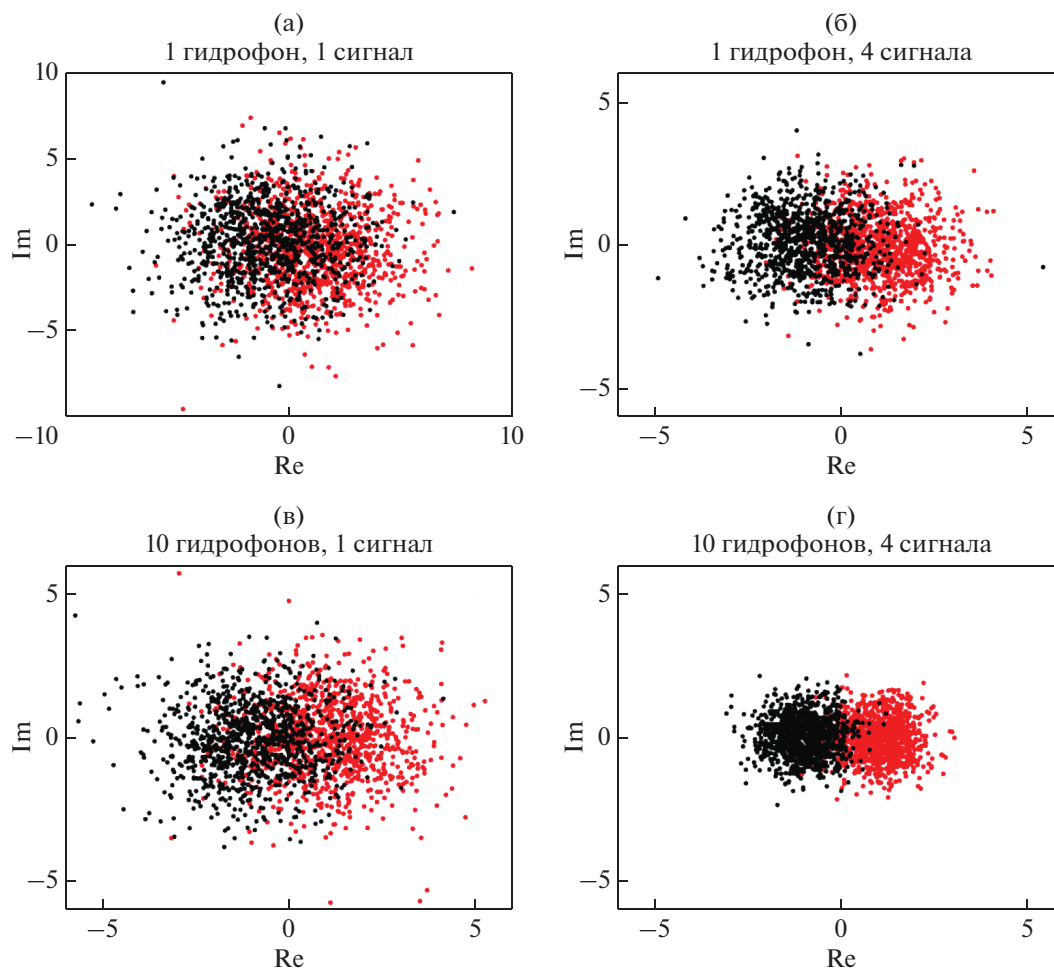


Рис. 6. Мягкие решения декодирования (синфазная и квадратурная компоненты): (а) — для одного из одиночных приемников и одного сигнала, (б) — при когерентном суммировании по 4 сигналам для одного приемника, (в) — при когерентном суммировании по 10 приемникам для одного сигнала, (г) — при когерентном суммировании по всем 10 приемникам и 4 сигналам.

образом, несмотря на заметное повышение качества связи, обеспечиваемое приемной линейной антенной, дополнительного улучшения ЗПС за счет подавления межсимвольной интерференции не наблюдается. В условиях описываемого эксперимента ее вклад в общую ошибку был несущественен по сравнению с влиянием аддитивных шумов. Величина BER для полной суммы (для антенны) составила 4.9%.

В случае применения алгоритма, показанного на рис. 3б, величина BER для этой же суммарной составляющей оказалась равной 25.8%. В случае использования обращения волнового фронта (рис. 3в) $BER = 9.2\%$. Таким образом, вертикальная антенна, использованная в эксперименте, при всех трех алгоритмах позволяет улучшить качество передачи информации; в то же время алгоритм, показанный на рис. 3а, показал наилучшие результаты.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для моделирования ЗПС между точечным источником и вертикальной дискретной линейной антенной использовалась методика, описанная в работе [2]. Напомним здесь основные расчетные соотношения для этой методики, основанной на модовом описании звукового поля [6]. Передаточная функция $K(\omega, r, z_0, z_j)$ между точечным источником и гидрофоном с номером j на приемной антенне равна³:

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

$$G(\omega, r, z_0, z_j) = \sum_{m=1}^M \frac{\Psi_m(z_0, \omega)\Psi_m(z_j, \omega)}{\sqrt{q_m(\omega)r}} \exp(i\xi_m(\omega)r), \quad (5)$$

³ Здесь предполагается, что параметры волновода не зависят от расстояния r .

где N – нормировочный коэффициент, имеющий размерность длины и выбираемый таким образом, чтобы на расстоянии 1 м был заданный уровень излучения акустического сигнала, ω – частота, $G(\omega, r, z_0, z_j)$ – функция Грина для уравнения Гельмгольца с функцией точечного источника (дельта-функцией) в правой части, $\Psi_m(z, \omega)$ и $\xi_m(\omega) = q_m(\omega) + i\gamma(\omega)_m/2$ – собственные функции (волноводные моды) и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля для рассматриваемого волновода. При выбранном определении величина $K(\omega, r, z_0, z_j)$ является безразмерной и определяет связь спектров излученного $\hat{S}_0(\omega)$ и принятого $P(\omega, r, z_0, z_j)$ сигналов: $P(\omega, r, z_0, z_j) = K(\omega, r, z_0, z_j)\hat{S}_0(\omega)$. При численном моделировании удобнее работать во временной области с использованием импульсных характеристик канала $\hat{h}_j(t)$:

$$\hat{h}_j(t) = \mathbf{F}^{-1}[K(\omega, r, z_0, z_j)] \equiv \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[\int_{\omega_1}^{\omega_2} K(\omega, r, z_0, z_j) e^{-i\omega t} d\omega \right], \quad (6)$$

где $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ рабочая полоса сигнала, \mathbf{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье, Re обозначает действительную часть. Тогда для принимаемого сигнала $p_j(t)$ мы можем использовать операцию свертки:

$$p_j(t) = \int_0^t \hat{s}_0(\tau) \hat{h}_j(t - \tau) d\tau, \quad (7)$$

где $\hat{s}_0(\tau) = \mathbf{F}^{-1}[\hat{S}_0(\omega)]$.

Для расчетов функции $G(\omega, r, z_0, z_j)$ при наличии ледового покрова использовалась методика, изложенная в работе [3]. При этом выбирались характеристики волновода, близкие к экспериментальным. В частности, глубина волновода полагалась неизменной и составляла $H = 48$ м, скорость звука в воде $c = 1409$ м/с, толщина ледового покрова $h = 0.66$ м. Акустические характеристики льда выбирались такими же, как в работе [4]: скорость продольных волн $c_2 = 3500$ м/с, скорость поперечных волн $c_s = 1800$ м/с, плотность льда $\rho_2 = 917$ кг/м³, коэффициент затухания продольных волн $\beta_{2f} = 0.086$ дБ/км/Гц, коэффициент затухания поперечных волн $\beta_{sf} = 0.556$ дБ/км/Гц. Глубина источника составляла $z_0 = 18.44$ м. Параметры дна, определенные по специальной методике [3], были равны: скорость звука в дне $c_1 = 1670$ м/с, плотность $\rho_1 = 1500$ кг/м³, коэффициент затухания в дне $\beta_f = 0.45$ дБ/км/Гц. Следует подчеркнуть, что при расчетах учитывались все

энергонесущие моды, включая вытекающие моды и квазимоды.

Для моделирования использовался тот же излучаемый сигнал $\hat{s}_0(t)$, что и в описанном выше эксперименте. Принятый расчетный сигнал $p(t)$ обрабатывался по алгоритмам, показанным на рис. 3а, 3б, 3в. Результаты моделирования (значения BER) для разных скоростей передачи информации показаны на рис. 7–10. Шумы здесь не учитывались, и единственным видом помехи являлась межсимвольная интерференция. Результаты представлены для расстояний r между источником и приемниками звука от 100 до 2000 м. Как видно на рисунках (см. рис. 8–10 по сравнению с рис. 7 (одиночный приемник)), численное моделирование также демонстрирует существенное улучшение качества связи в случае применения вертикальных линейных антенн в отсутствие шумов. Сравнение рис. 7 с результатами табл. 1 еще раз подтверждает вывод о том, что в эксперименте основные ошибки при ЗПС были связаны именно с шумами. Они и привели к экспериментальным значениям BER, значительно большим, чем при моделировании.

Улучшение качества связи зависит как от длины апертуры антенны, так и от числа приемников. Диапазон допустимых значений BER зависит от специфики конкретной задачи, однако условно можно считать, что при значениях $\text{BER} < 0.1$ качество связи остается удовлетворительным. В таком случае, используя коды, исправляющие ошибки [12], можно добиться безошибочной передачи информации, сохранив приемлемый уровень полезной (информационной) нагрузки в передаваемом сигнале. Проведенные расчеты показали, что в отсутствие шумов при любом из указанных выше алгоритмов пространственной обработки сигналов этот коэффициент заведомо меньше 0.1 в случае, когда антенна перекрывает более половины толщины лежащего подо льдом водного слоя, а расстояния между гидрофонами не больше, чем 2λ . При этом в отсутствие шумов наилучшие результаты получаются в случае применения алгоритма, основанного на процедуре обращения волнового фронта (см. рис. 3в).

Здесь следует также подчеркнуть, что тестируемые алгоритмы (см. рис. 3а, 3б) не использовали возможности модовой селекции сигналов в океанических волноводах, предложенных в работах [2, 8]. Попытка применить один из вариантов модовой селекции [2] при моделировании не позволила улучшить качество ЗПС даже в отсутствие шумов (см. рис. 10). К такому же результату привела и обработка экспериментальных данных. Отметим, что в численном и натурном экспериментах сигналы с приемных гидрофонов умножались на значение первой волноводной моды на глубине их расположения (см. формулу (1)). Не-

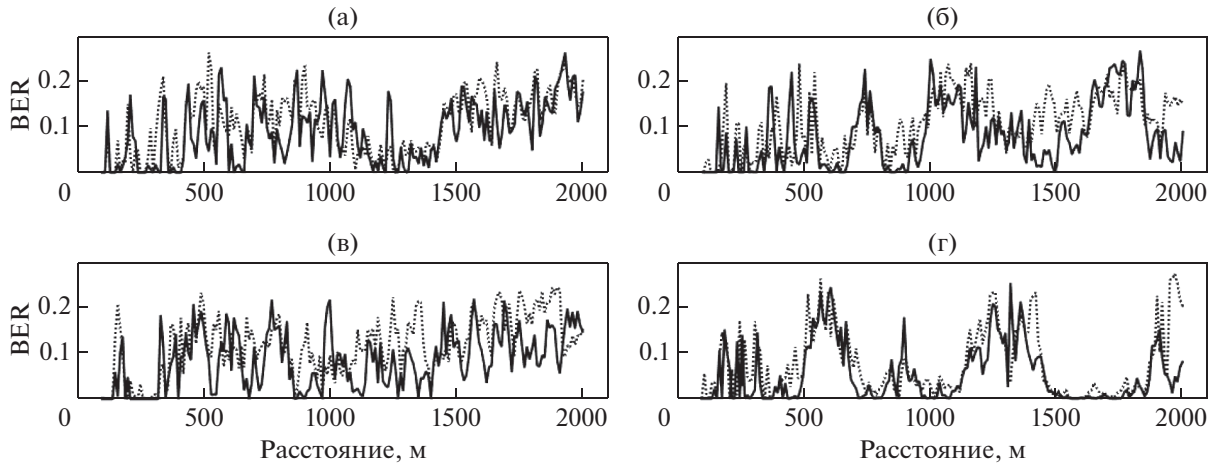


Рис. 7. Зависимость BER от расстояния до источника звука для одиночного приемника на различных глубинах: (а) – глубина приема 0.64 м, (б) – глубина приема 17.9 м, (в) – глубина приема 24.9 м, (г) – глубина приема 31.9 м. Сплошная линия соответствует скорости передачи информации 122.5 бит/с, пунктирная – 183.75 бит/с.

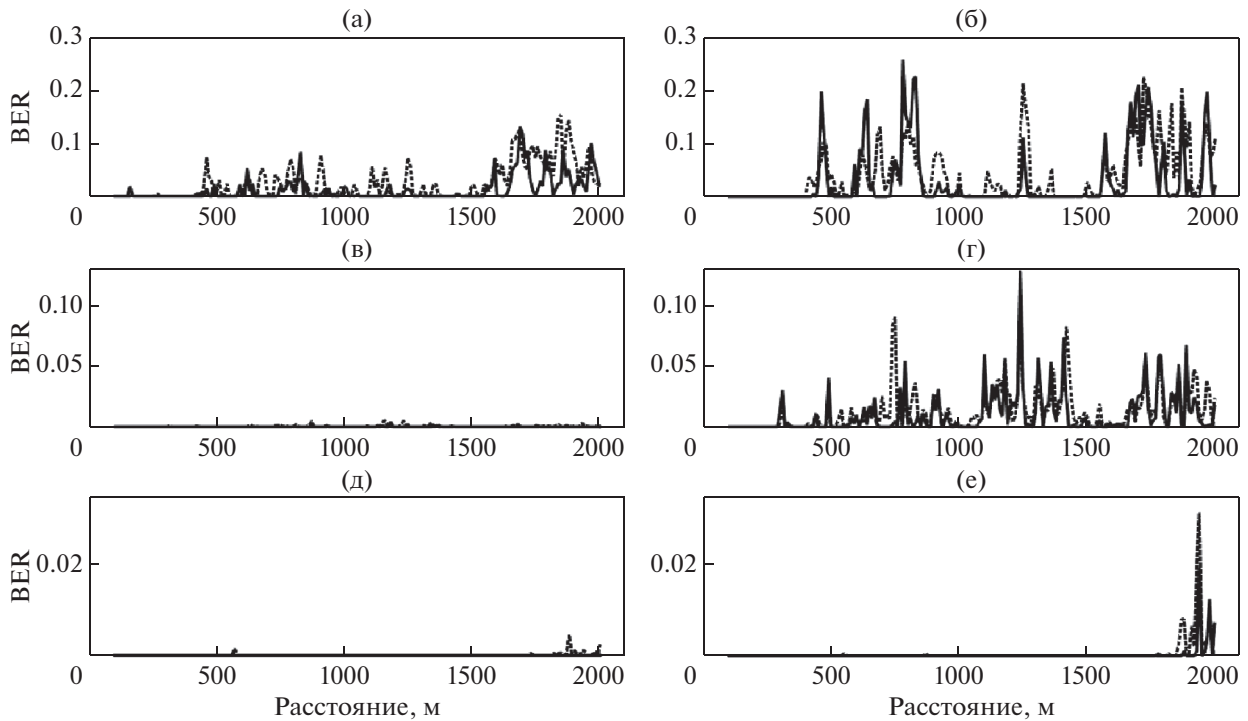


Рис. 8. Зависимость BER от расстояния до источника звука. Левый ряд рисунков получен с помощью алгоритма, представленного на рис. 3а, правый ряд – с помощью алгоритма на рис. 3б. Сплошная линия соответствует скорости передачи информации 122.5 бит/с, пунктирная – 183.75 бит/с. Положение приемников:

(а, б) – 5 приемников на глубинах $z_j = 22, 23, 24, 25, 26$ м,
 (в, г) – 5 приемников на глубинах $z_j = 1, 10, 20, 30, 40$ м,
 (д, е) – 10 приемников на глубинах, определяемых формулой (1).

эффективность модовой селекции в рассматриваемом случае, по-видимому, была обусловлена следующими факторами. Расстояния между гидрофонами l были значительно больше, чем $\lambda/2$. Это привело к тому, что величина l превышала ха-

рактерный пространственный период изменения по вертикали для высших волноводных мод, формирующих звуковое поле на рассматриваемых расстояниях от источника. Число таких энергоносущих мод было равно 35. Таким образом, здесь

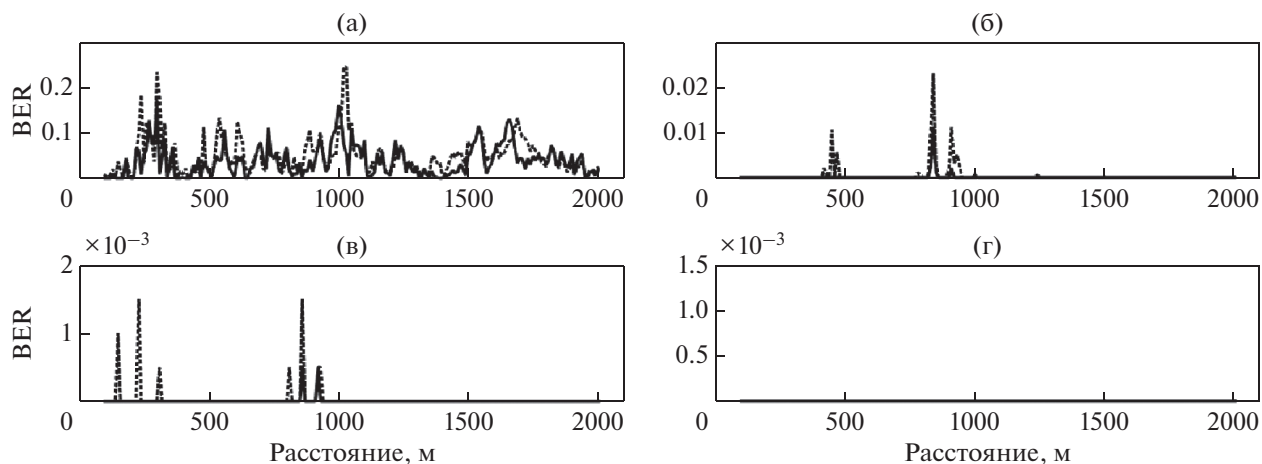


Рис. 9. Зависимость BER от расстояния до источника звука в случае применения обращения волнового фронта (см. рис. 3в). Сплошная линия соответствует скорости передачи информации 122.5 бит/с, пунктирная – 183.75 бит/с. Положение приемников:

- (а) – одиночный приемник на глубине 17.9 м,
- (б) – 5 приемников на глубинах $z_j = 22, 23, 24, 25, 26$ м,
- (в) – 5 приемников на глубинах $z_j = 1, 10, 20, 30, 40$ м,
- (г) – 10 приемников на глубинах, определяемых формулой (1).

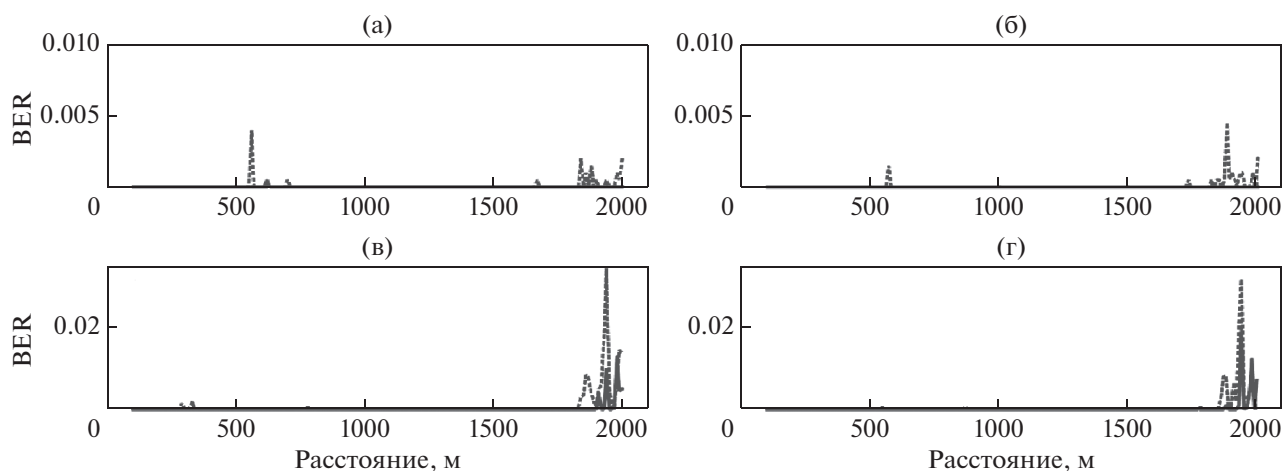


Рис. 10. Оценки величины BER при использовании модовой селекции (слева) и без нее (справа):

- (а, б) – результат применения алгоритма, показанного на рис. 3а; (в, г) – алгоритма на рис. 3б. Сплошная линия соответствует скорости передачи информации 122.5 бит/с, пунктирная – 183.75 бит/с.

условия применения ЗПС принципиально отличались от рассмотренных, например, в работе [8], где l была сравнима с $\lambda/2$ и рассматривались относительно большие расстояния. Соответственно энергонесущими в этой работе являлись только моды первых номеров с большим пространственным периодом вариаций. Именно для такой ситуации модовая селекция оказалась весьма эффективной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что использование вертикальных линейных антенн для ЗПС по сути

своей представляет лишь первый этап обработки принимаемых гидроакустических сигналов. Этот этап не исключает применения при необходимости на выходе антенны других известных методов адаптивной эквализации [7, 11, 12, 16], но существенным образом уменьшает требования к этим методам.

Благодарности. Авторы выражают благодарность К.М. Кучеру и М.М. Макарову за помощь в проведении экспериментов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-02-00127) и государственного задания ИО РАН (тема 0128-2021-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакин Р.А., Волков Г.И. Адаптация гидроакустического канала связи с OFDM к негативному влиянию дрейфующего ледяного покрова // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 2. С. 223–231.
2. Волков М.В., Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. О возможности применения вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи на арктическом шельфе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 332–342.
3. Григорьев В.А., Кучер К.М., Луньков А.А., и др. Акустические характеристики дна озера Байкал // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 5. С. 517–526.
4. Collis J.M., Frank S.D., Metzler A.M., Preston K.S. Elastic parabolic equation and normal mode solutions for seismo-acoustic propagation in underwater environments with ice covers // J. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 139. № 5. P. 2672–682.
5. Freitag L., Koski P., Singh S. et al. Acoustic Communications under Shallow Shore-Fast Arctic Ice // IEEE OCEANS 2017. Anchorage. P. 1–5.
6. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2012. 540 p.
7. Kilfoyle D.B., Baggeroer A.B. The state of the art in underwater acoustic telemetry // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2000. V. 25. № 1. P. 4–27.
8. Morozov A.K., Preisig J.C., Papp J.C. Investigation of Mode Filtering as a Preprocessing Method for Shallow-Water Acoustic Communications // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2010. V. 35. № 4. P. 744–755.
9. National Snow & Ice Data Center. <http://nsidc.org/data/g01360>.
10. Plueddemann A.J., Kukulya A.L., Stokey R., Freitag L. Autonomous Underwater Vehicle Operations beneath Coastal Sea Ice // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012. V. 17. № 1. P. 54–64.
11. Preisig J.C., Performance analysis of adaptive equalization for coherent acoustic communications in the time-varying ocean environment // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 118. № 1. P. 263–278.
12. Proakis J. Digital Communications. N.Y., USA: McGraw-Hill, 2001. 1150 p.
13. Roth E.H., Hilderbrand J.A., Wiggins S.M., Ross D. Underwater ambient noise on the Chukchi Sea continental slope // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131. № 1. P. 104–110.
14. Rouseff D. Counterintuitive Results in Underwater Acoustic Communications / Zhou L., Xu W., Cheng Q., Zhao H. (eds.) // In: Underwater Acoustics and Ocean Dynamics. Springer, Singapore, 2016. P. 11–18.
15. Rouseff D., Jackson D.R., Fox W.L.J. et al. Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2001. V. 26. № 4. P. 821–831.
16. Stojanovic M., Proakis J.G., Catipovic J.A. Performance of high rate adaptive equalization on a shallow water acoustic channel // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100. № 4. P. 2213–2219.

Underwater Acoustic Communication in Ice-Covered Shallow Water Areas with Vertical Receiver Arrays

M. V. Volkov^a, A. A. Lunkov^{a, b}, V. G. Petnikov^{a, #}, A. V. Shatravin^{a, c, ##}

^aProkhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^cShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: petniko@kapella.gpi.ru

^{##}e-mail: ashatravin@ocean.ru

Feasibility of underwater acoustic communication in an ice-covered shallow water area is demonstrated in a field experiment and by means of computer modeling. We study the advantages brought in by use of linear vertical receiver arrays of various lengths and numbers of hydrophones. The case of water depth much smaller than the distance to the receiver array was considered. A comparative analysis was performed for several algorithms of spatial signal processing for binary phase-shift keyed signals with carrier frequency of ~1 kHz and variable information bit rate. The experiment was conducted in Lake Baikal with the ice-cover thickness of ~66 cm and high intensity of acoustic noise associated with formation of ice fractures. It is shown that a vertical array allows to reduce the bit error rate by more than a factor of 3 compared to a single receiver.

Keywords: underwater acoustic communication, vertical hydroacoustic arrays, sound propagation in ice-covered shallow water areas