

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.87,551.463.28

АДАПТАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ
С ТЕХНОЛОГИЕЙ OFDM К НЕГАТИВНОМУ ВЛИЯНИЮ
ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

© 2019 г. Р. А. Балакин^{а, в, *}, Г. И. Вилков^{а, в, **}

^аАрктический и антарктический научно-исследовательский институт
Россия, 199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга 38

^вАкционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»
Россия, 197375 Санкт-Петербург, ул. Новосельковская 37, лит. А

*e-mail: rigms@aari.ru

**e-mail: glebvilkov@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2018 г.

После доработки 04.09.2018 г.

Принята к публикации 30.10.2018 г.

Проведены натурные исследования влияния дрейфующего ледяного покрова на вероятность битовых ошибок в гидроакустическом канале связи, построенном по технологии Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов. Определены количественные оценки влияния дрейфующего льда на отраженный от нижней поверхности льда многочастотный фазо-модулированный сигнал с технологией OFDM. Негативное влияние проявляется в расширении спектра несущих частот и в снижении взаимной корреляции частотно-фазовых сдвигов между несущими частотами в точке приема. В результате расширения спектра и скачкообразных изменений фазы информационных сигналов резко возрастает вероятность битовых ошибок при приеме. Предложены способы выбора оптимальных параметров широкополосного OFDM-сигнала, позволяющие нейтрализовать негативное влияние ледяного покрова и осуществлять передачу сигнала по гидроакустическому каналу связи с заданными характеристиками.

Ключевые слова: гидроакустика, технология OFDM, фазовая модуляция, ледяной покров, помехоустойчивость

DOI: 10.1134/S0320791919020047

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего исследования является решение актуальной задачи повышения надежности гидроакустической связи, предназначенной для обеспечения оперативного контроля и диагностики технически сложных подводных объектов в мелководных арктических морях. К таким объектам относятся, например, подводные трубопроводы, нефтегазовые платформы, исследовательские буйковые станции, роботизированные подводные аппараты и т.п.

В настоящее время наиболее эффективной и широко используемой технологией цифровой гидроакустической связи является широкополосная связь на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (технология OFDM) [1, 2]. При использовании этой технологии передача данных осуществляется параллельным двоичным кодом с одновременным излучением большого количества несущих ча-

стот, каждая из которых несет несколько бит передаваемой информации на основе фазовой или амплитудно-фазовой модуляции. Технология OFDM позволяет успешно преодолевать такие негативные факторы внешней среды как многолучевое распространение сигнала, частотно-селективные замирания, доплеровский сдвиг несущих частот, динамическая нестационарность среды распространения сигнала, высокий уровень шумовых помех [3–8]. В зависимости от степени нестационарности среды распространения, уровня шумовых помех и многолучевости используются методы фазовой модуляции с различным индексом, например, BPSK (двухпозиционная или двоичная фазовая модуляция), QPSK (четырёхпозиционная или квадратурная фазовая модуляция), 8-PSK (восьмипозиционная фазовая модуляция) и т.д. Чем больше индекс модуляции, тем больше данных несет каждая несущая частота и соответственно выше скорость передачи дан-

ных, но ниже помехоустойчивость к негативным факторам [9–11].

Задачей настоящей работы является решение проблемы негативного влияния дрейфующего ледяного покрова на гидроакустический канал связи с технологией OFDM в мелководных арктических морях. Негативное влияние дрейфующего льда проявляется в вариациях доплеровского сдвига частоты и фазы несущего сигнала, а также в поглощении и рассеянии звука при отражениях от неровностей нижней поверхности льда. Задача решалась путем выбора оптимальных параметров широкополосного OFDM-сигнала и режимов работы приемно-передатчика с учетом акустических характеристик окружающей среды. Также в статье рассмотрены цифровые алгоритмы компенсации доплеровского сдвига частоты и фазы несущих частот для выбора оптимального варианта по эффективности снижения вероятности битовых ошибок. В работе приведены результаты экспериментальных исследований в натуральных условиях предложенного метода адаптации гидроакустического канала связи.

2. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

В технологии OFDM формирование излучаемого сигнала и модуляция несущих частот выполняются в цифровом формате, используя алгоритм дискретного быстрого преобразования Фурье (ДБПФ), который реализуется высокопроизводительным сигнальным процессором (DSP) [12, 13] в реальном масштабе времени в темпе передачи. На выходе микропроцессора сформированный сигнал преобразуется из цифровой формы в аналоговую с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), входящего в состав микропроцессора. Фазовая модуляция несущих частот выполняется путем раздельного формирования действительной и мнимой компонент сигнала, сдвинутых по фазе на 90° .

На стороне приема демодуляция сигнала осуществляется зеркально-обратным алгоритмом дискретного преобразования Фурье, который реализуется также сигнальным микропроцессором DSP [12, 13].

Для преодоления частотно-селективных замираний несущих частот, приводящих к потере отдельных блоков информации, применяется один из видов избыточного кодирования типа дополняющих CRC-полиномов, кодов Рида-Соломона и подобных. Избыточное кодирование существенно снижает эффективную скорость передачи данных, но позволяет обнаруживать и восстанавливать ошибочно принятые биты данных [14].

Другим эффективным средством подавления частотно-селективных замираний является применение антифединговой многоканальной антенны с разделением каналов по углам прихода акустических лучей [15].

Наиболее сложной технологической задачей при реализации алгоритма OFDM-связи является частотная и фазовая синхронизация несущих частот на стороне приема. Известно несколько различных способов синхронизации частоты и фазы, основным из которых является способ на основе передачи опорных пилот-сигналов с априорно известной амплитудой и фазой. Описанный в работах [16, 17] способ заключается в измерении возможного доплеровского или иного сдвига частоты и фазы несущих частот в начальный момент связи путем передачи так называемой преамбулы, которая предназначается для символьной синхронизации, а также для обозначения старта передачи блока данных. В состав преамбулы входят два или более служебных символа с априорно известными частотами и фазами, разнесенными по времени на определенный интервал. При наличии доплеровского или иного сдвига несущих частот фазы частот от символа к символу сдвигаются на определенные углы, пропорциональные измеряемому доплеровскому сдвигу и интервалу временной задержки. В величину фазовых погрешностей входят также индивидуальные вклады от шумовых помех от нестационарной структуры среды распространения, вызванной отражениями сигнала от неровной поверхности дрейфующего льда. Для расчета сдвига частоты и фазы, вызванного движением источника сигнала, принимается среднее значение из сдвига фаз всех опорных пилот-сигналов. В результате осреднения исключаются вклады от шумов и других случайных кратковременных помех. Полученная средняя оценка доплеровского сдвига частоты и фазы используется в качестве поправки ко всем несущим частотам последующего символа данных. Величина этой поправки каждый раз обновляется и корректируется с приходом очередного символа данных на некоторую относительно небольшую добавку, получаемую при округлении фазы до ближайшего фиксированного значения согласно “кодовому созвездию”. Например, в формате модуляции QPSK фазовый сдвиг округляется до ближайших фиксированных значений 0° , 90° , 180° , 270° . В итоге введения скорректированной поправки к значению фазы принятых сигналов происходит непрерывная текущая коррекция доплеровского сдвига частоты от движения источника сигнала и малых отклонений частоты опорного генератора.

По-другому проявляется негативное влияние дрейфующего льда с неровной нижней поверхностью и торосистыми образованиями или разводьями. При отражении акустического сигнала от нижней поверхности ледяного покрова наблюда-

ются вариации частоты и фазы одновременно на всех частотах, когда пятно облучения попадает на выступы льда или на грань торосистого образования. Эти вариации вызваны изменениями длины хода луча, которые неодинаково проявляются в фазовых сдвигах несущих частот, хотя и являются коррелированными. По этой причине смещения фазы пилот-сигналов не могут непосредственно использоваться в качестве прогнозируемой поправки к последующим символам данных, но используются для расчетов поправок. Тесная корреляция фазовых сдвигов наблюдается только для частот, находящихся в непосредственной близости к частоте пилот-сигнала. Из этого следует, что если применить достаточно большое количество пилот-сигналов, то фазовые поправки к информационным частотам могут быть вычислены оптимальным алгоритмом интерполяции между смежными пилот-сигналами, фазы которых измерены. Соответственно, защита от негативного влияния дрейфующего ледяного покрова на помехоустойчивость гидроакустического канала связи может быть обеспечена оптимальным выбором алгоритма интерполяции и количества опорных пилот-сигналов. При этом следует иметь в виду, что пилот-сигналы занимают часть выделенной частотной полосы и снижают информационную емкость канала. В предельном случае, если каждая вторая несущая частота используется в качестве пилот-сигнала, то обеспечивается максимально возможная корректирующая способность данного метода по отношению к резким изменениям фазы, но скорость передачи данных снижается в два раза.

Доплеровские вариации фазы не являются единственным источником помех, вызывающих битовые ошибки в потоке данных. Остаются еще частотно-селективные замирания и индивидуальные шумовые помехи на каждой несущей частоте, которые компенсируются защитным избыточным кодированием. Поэтому при решении вопроса о выборе оптимальных параметров аппаратуры гидроакустической связи и формата данных следует принимать компромиссное решение между возможными вариантами помехозащиты, руководствуясь приоритетом характеристик канала связи в данном конкретном приложении.

3. МОДЕЛЬ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ДРЕЙФУЮЩИМ ЛЬДОМ

Для решения поставленной задачи адаптации канала связи к негативному влиянию дрейфующего ледяного покрова предлагается математическая модель сигнала в типовой технологии OFDM [11, 18]. Согласно этой модели, поток цифровых данных в двоичной последовательной форме сначала подвергается избыточному коди-

рованию и перемежению в псевдослучайном порядке, а затем преобразуется в параллельную форму для передачи по каналу связи. В параллельной форме поток данных представлен ортогональными несущими частотами с числом каналов K , где каждый канал представлен выражением $d_k(n)$, а k принимает значение от 0 до $K - 1$.

Параллельный двоичный код используется для формирования акустических сигналов согласно выражению

$$U_k(t) = \sum_n d_k(n) e^{jk\Delta\omega(t-nT')} g(t-nT'), \quad (1)$$

где $U_k(t)$ – передаваемый сигнал; $g(t)$ – прямоугольный импульс с единичной амплитудой и длительностью T ; $T' = T + T_g$ (T_g – длительность защитного интервала, который заполняется так называемым циклическим префиксом); $d_k(n)$ – символ данных; $\Delta\omega$ – приращение частоты; n – номер блока данных.

Циклический префикс превышает по длительности задержки многолучевости и представляет собой концевую часть символа данных, составляющую примерно 25% от длины символа. Величина приращения частоты $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, где $\Delta f = 1/T$ равняется шагу несущих частот внутри символа данных. Сигналы $U_k(t)$ суммируются и сдвигаются по частоте так, что имеет место равенство

$$s(t) = R_e \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} U_k(t) e^{j\omega_k t} \right\}, \quad (2)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – это наименьшая несущая частота; $f_k = f_0 + k\Delta f$ определяет k -ю несущую частоту сигнала.

Полоса частот канала связи определяется согласно выражению $B = K\Delta f$, а скорость передачи данных $R = K/(T + T')$. Результирующая эффективность использования частотной полосы в бит/с рассчитывается по формуле

$$\frac{R}{B} = \frac{1}{1 + T_g/T}. \quad (3)$$

Сигнал $s(t)$ проходит через канал связи с импульсной реакцией $A_p(n)$ в течение n -го блока OFDM с длительностью $t \in (nT', nT' + T')$ и моделируется выражением

$$C(t, n) = \sum_p A_p(n) \delta(t + Q(n)t - \tau_p(n)), \quad (4)$$

где $C(t, n)$ – принятый сигнал; $\delta(t + Q(n)t)$ – функция преобразования; $\tau_p(n)$ – временная задержка.

Затухание амплитуды в канале связи, временные задержки и доплеровский сдвиг частоты предполагаются постоянными в течение длительности одного символа T при условии отсутствия помехи от резкого перепада высоты отражающей поверхности льда. Доплеровский сдвиг частоты

от движения источника сигнала предполагается одинаковым для всех лучей, поскольку энергетически значимые лучи в первом приближении можно считать горизонтальными при большом отношении дальности связи к глубине моря. Соответствующая функция преобразования сигнала в канале связи выражается формулой

$$y_k(n) = \sum_{l=0}^{K-1} y_{kl}(n) + \omega_k(n), \quad (5)$$

где $\omega(n)$ – аддитивный шум; $y_{kl}(n)$ – отклик системы на сигнал $U_l(t)$.

4. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА СТОРОНЕ ПРИЕМА

На стороне приема используется гидроакустическая антифендинговая антенна [15] с трехлепестковой диаграммой направленности по преобладающим углам прихода акустических лучей. По каждому лепестку диаграммы направленности действуют три независимых канала приема с несовпадающими по времени частотно-селективными замираниями сигнала. Выбор одного из трех каналов по максимуму амплитуды в каждый момент времени осуществляется по типовому алгоритму, принятому в многоканальных системах MMSE (Minimum Mean Square Error – минимальная среднеквадратическая погрешность). Предполагается, что антифендинговая антенна обеспечивает подавление частотно-селективных замираний.

Дрейфующий ледяной покров оказывает значительное влияние на передачу сигнала по гидроакустическому каналу связи. При отражении сигнала от неровной поверхности подвижного льда происходит доплеровский сдвиг частоты и фазы, а также частичное поглощение и рассеяние звука. Доплеровский сдвиг частоты обусловлен как горизонтальными, так и вертикальными движениями льда и имеет характер знакопеременных вариаций с нулевым средним значением. Горизонтальный дрейф ровного льда не вызывает доплеровского сдвига частоты или фазы.

Амплитуда частотных вариаций пропорциональна высоте неровностей льда в пятне облучения и скорости дрейфа. Период вариаций определяется горизонтальным масштабом неровностей льда и обратно пропорционален скорости дрейфа. Максимально допустимая девиация частоты в точке приема не должна превышать половины разделительного интервала между несущими частотами OFDM-сигнала. При несоблюдении этого условия происходит ошибка в идентификации номера несущих частот и нарушение их ортогональности, приводящее к межсимвольным помехам. В итоге связь полностью прерывается. Для восстановления связи требуется компенсация до-

плеровского сдвига частоты и фазы с достаточно высокой точностью в пределах шага фазовой модуляции кодового созвездия.

Поглощение звука при отражении сигнала от поверхности льда зависит от коэффициента отражения, который определяется известной формулой [6]:

$$R_0 = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (6)$$

где R_0 – коэффициент отражения звука при нормальном угле падения; $\rho_1 c_1$ – волновое сопротивление воды; $\rho_2 c_2$ – волновое сопротивление льда.

Согласно формуле (6), часть энергии падающего луча отражается в обратном направлении, а другая часть проходит через границу раздела внутрь льда и там поглощается.

Коэффициент отражения морского льда изменяется в широких пределах в зависимости от структуры льда, солености, возрастных градаций и согласно опытным данным может принимать значения от 0.05 до 0.3 [6].

При наклонном падении луча на поверхность льда отраженная и преломленная волны подчиняются закону Снеллиуса [6]:

$$\frac{c_1}{\sin \alpha_1} = \frac{c_2}{\sin \alpha_2}, \quad (7)$$

где c_1, c_2 – скорости звука в воде и во льду; α_1, α_2 – углы падения и преломления.

Если облучаемая поверхность льда имеет шероховатую структуру с высотой неровностей порядка длины волны сигнала, то происходит диффузное рассеяние звука по закону Ламберта равномерно во всех направлениях в пределах угла падения около 60° [6]. Диффузное рассеяние части энергии звука нарушает когерентность сигнала, снижая отношение полезного сигнала к шумам и тем самым значительно увеличивая вероятность битовых ошибок.

Функция передачи канала меняется относительно медленно от одного символа OFDM к последующему, поэтому оценка предшествующего символа может использоваться для расчета текущего значения по формуле

$$d_k(n) = \gamma_k(n-1) C'_k(n-1) y_k(n) e^{-j\theta_k(n)}, \quad (8)$$

где $d_k(n)$ – текущее значение символа данных; $\gamma_k(n-1)$ – корректирующий коэффициент; $C'_k(n-1)$ – обратное преобразование Фурье; $y_k(n)$ – выходной сигнал демодулятора; $\theta_k(n)$ – фазовый угол n -го символа данных.

Оценка фазы принятого сигнала базируется на модели гидроакустического канала связи при наличии дрейфующего ледяного покрова с определенной

скоростью дрейфа и перепадом высоты отражающей поверхности и вычисляется по формуле

$$\theta_k(n) = \theta_k(n-1) + \alpha(n)\omega_k T', \quad (9)$$

где $\theta_k(n)$ – текущая оценка фазы принятого сигнала; $\alpha(n)$ – прогнозируемая скорость изменения фазы сигнала, отраженного от льда; ω_k – угловая частота несущей сигнала; T' – длительность символа данных.

Эта модель является ключевой для отслеживания изменений фазы несущих частот; она учитывает скорость изменения фазы и использует данную оценку для всех несущих частот в одном символе данных, опираясь на измеренные приращения фазы опорных пилот-сигналов.

Подводя итог анализа данного алгоритма, можно заключить, что фазы пилот-сигналов предшествующего символа данных $\theta_k(n-1)$ и доплеровская скорость изменения частоты и фазы $\alpha_k(n)$ могут использоваться для прогнозирования фазы $\theta_k(n)$ последующего символа.

Такой прогноз возможен для начала каждого N -го блока при демодуляции данных, и его можно использовать в том числе для компенсации влияния дрейфа льда при условии достаточного количества опорных пилот-сигналов в соответствии с расчетной оценкой радиуса корреляции фазы в частотной области.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА АДАПТАЦИИ КАНАЛА СВЯЗИ К ВЛИЯНИЮ ДРЕЙФА ЛЬДА

Натурные исследования эффективности предложенного метода адаптации канала связи к негативному влиянию ледяного покрова проводились в мелководных морях арктического шельфа в рейсе научно-экспедиционного судна (НЭС) ледового класса “Академик Трешников” в летне-осенний сезон 2016 г.

Цель исследований заключалась в экспериментальной проверке результативности работы цифрового алгоритма адаптации к влиянию ледяного покрова и выбору оптимального набора параметров, заложенных в экспериментальный образец приемно-передатчика информационно-телекоммуникационной системы гидроакустической связи, и в оценке характеристик сигнала, отраженного от ледяного покрова. При исследовании варьировались количественные значения параметров сигнала связи в формате OFDM. В состав программно-управляемых параметров входили: длительность информационных символов, количество несущих частот, количество опорных пилот-сигналов, скорость передачи данных, глубина избыточного защитного кода, мощность передатчика.

Для исследований канала связи использовался экспериментальный образец аппаратуры, состоящий из приемного и передающего модулей, а также из трехэлементной антифединговой антенны. Антенна предназначалась для защиты от частотно-селективных замираний сигнала и состояла из трех отдельных антенн рупорного типа с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости и конической диаграммой в вертикальной плоскости с углом 60° каждая в верхней, средней и нижней полусферах. Такая антенна не требует ориентации в направлении на источник излучения, поскольку имеет круговую диаграмму направленности.

Приемник и передатчик разносились по дистанции на расстояние от 200 до 3000 м и погружались на глубину от 5 до 15 м. Приемный модуль размещался на борту НЭС, а передающий модуль находился на борту малого плавсредства (катера или плашкоута). Для связи использовалась оптимальная частота 24 кГц с общей шириной полосы 5 кГц. Количество несущих частот в одном символе данных изменялось от 128 до 1024.

Формирование излучаемого сигнала и обработка принимаемых сигналов выполнялись программным способом на персональном компьютере (ПК). При этом использовалась звуковая карта ПК, в которую входят аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи. В состав оборудования приемно-передающих модулей входили только усилитель мощности передатчика и широкополосный усилитель с набором входных фильтров приемника, а функции остальных элементов системы возлагались на ПК. Это позволило гибко изменять параметры алгоритма адаптации программным способом. В ходе эксперимента по каналу связи передавался тестовый сигнал в виде буквенно-цифрового текста объемом 4 килобайта.

Принятые данные регистрировались в ПК, и определялась вероятность битовых ошибок без учета защитного кодирования. Эксперименты проводились при наличии ледяного покрова в форме больших сплоченных полей с разводьями и разрозненных ледовых образований сплоченностью от трех до четырех баллов.

В районе работ дополнительно проводились измерения характеристик ледяного покрова, влияющих на канал связи. Измерялись такие характеристики как скорость дрейфа льда, высота и характер неровностей нижней отражающей поверхности, коэффициенты отражения и рассеивания звука, вариации доплеровского сдвига частоты сигнала в зависимости от скорости дрейфа и геометрии неровностей крупных ледовых образований типа торосов. Измерения проводились с помощью автономного измерительного комплекса, состоящего из направленного вверх эхолота типа

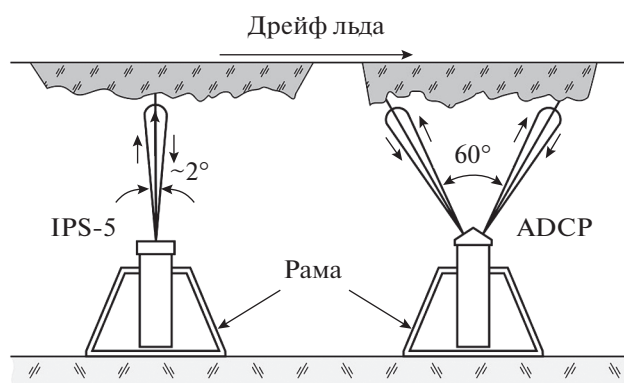


Рис. 1. Автономный измерительный комплекс.



Рис. 2. Пример записи профиля нижней поверхности дрейфующего льда при цикличности измерения 1 с.

IPS-5 [19] и доплеровского измерителя скорости дрейфа типа ADCP [20] (рис. 1). Приборы устанавливались на дно моря стационарно на глубине 50 м, а результаты измерений записывались в память. Пример записи профиля нижней поверхности дрейфующего льда при скорости дрейфа 30 см/с приведен на рис. 2.

В зависимости от ледовой обстановки производилась регулировка параметров излучаемого сигнала с целью выбора их оптимального сочетания. Критерием оптимальности служило снижение вероятности битовых ошибок. Выбор оптимального формата осуществлялся не простым перебором возможных вариантов, но целенаправленным поиском, исходя из математической модели физических процессов с учетом значимости каждого регулируемого параметра. Так, согласно модели следовало, что для снижения погрешности прогнозирования доплеровского сдвига частоты нужно увеличивать количество опорных пилот-сигналов и уменьшать частотный интервал между ними. Но такая мера приводит к уменьшению информационной емкости канала и снижению скорости передачи данных. Информационную емкость канала можно восстановить увеличением индекса фазовой модуляции, применив, например, вместо модуля-

ции BPSK или QPSK более высокий индекс 8-PSK. Такое решение в свою очередь снижает помехоустойчивость к шумам торошения льда и повышает вероятность битовых ошибок. Очевидно, что для нахождения оптимума требуется компромиссный выбор величины этих параметров.

Все битовые ошибки, независимо от вызывающих их причин, радикально устраняются избыточным защитным кодированием типа CRC-полинома и кодом Рида-Соломона. Но такая мера сопровождается существенным снижением информационной емкости канала и эффективности скорости передачи данных. Защитное кодирование имеет определенный порог эффективности относительно степени искажений исходных данных. Если количество допущенных битовых ошибок превышает 10% от объема данных, то защитные коды становятся неэффективными. Таким образом, задача состоит в том, чтобы аппаратными средствами, в частности оптимизацией параметров сигнала и алгоритмов обработки, обеспечить достаточно низкий исходный уровень битовых ошибок, не более 10%.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе натуральных экспериментов регистрировался характер неровностей отражающей поверхности дрейфующих ледяных полей и соответствующих акустических характеристик. Измерялись коэффициенты отражения звука от нижней поверхности льда при нормальном падении зондирующих сигналов и при наклонном падении на поверхность килей торосов. Типичная картина неровностей дрейфующего льда с подводными килями на глубину 25 м и более показана на рис. 2. Наибольшие значения коэффициента отражения звука наблюдались для молодого тонкого льда с гладкой нижней поверхностью. Для такого льда величина коэффициента отражения изменялась в диапазоне от 0.3 до 0.6 относительных единиц по отношению к отражению от чистой воды с коэффициентом 1.0. Для многолетних льдов с толщами 1 м и более коэффициент отражения снижается до значений 0.05–0.1 за счет поглощения в толще льда и рассеяния на неровностях. Еще больше коэффициент отражения звука снижается для тающего многолетнего льда с ажурной нижней поверхностью и клиновидной звукопоглощающей структурой, до значений 0.02–0.05. Гистограмма распределения коэффициента отражения звука от дрейфующего льда при нормальных углах падения звукового луча приведена на рис. 3.

Оценивалась также диффузность рассеяния звука при отражениях от ажурной рыхлой поверхности тающего льда по степени падения когерентности сигнала и снижения дальности связи

при относительно высоком энергетическом уровне сигнала.

Измерялись вариации доплеровского сдвига частоты и фазы отраженного сигнала в зависимости от скорости дрейфа и высоты неровностей льда. Распределение амплитуды вариаций доплеровского сдвига частоты (по модулю) приведено на рис. 4. Для оценки вариаций доплеровского сдвига частоты относительно среднего значения использовался цифровой алгоритм упреждающего прогнозирования. При этом компенсация среднего значения доплеровского сдвига, обусловленного движением источника сигнала, выполнялась с помощью следящего фильтра с использованием всех опорных пилот-сигналов.

Распределение вероятности битовых ошибок в зависимости от использованного алгоритма компенсации вариаций доплеровского сдвига и от отношения полезного сигнала к помехам (SNR) приведено на рис. 5.

Результаты экспериментальных исследований четырех вариантов адаптации к негативному влиянию ледяного покрова при различных форматах OFDM-сигнала приведены в табл. 1. В ней приведена физическая скорость передачи данных без учета снижения скорости, вызванной избыточным защитным кодированием. Постоянные параметры несущего сигнала OFDM составляли: средняя частота спектра $F = 24$ кГц, полоса частот $B = 5$ кГц, $SNR \approx 3$.

Наилучшие результаты с точки зрения помехоустойчивости к негативному влиянию ледяного покрова и минимальной вероятности битовых ошибок показал первый вариант формата OFDM-сигнала. В этом формате использовалась длительность символа 13 мс при количестве несущих частот 128, из которых 24 частоты были задействованы на выполнение функции опорных пилот-сигналов. Для фазовой модуляции несущих частот использовался режим BPSK с индексом модуляции $\pm 180^\circ$. Эффективная скорость передачи данных составила 2400 бит/с, а эффективность использования частотной полосы 0.12 бит/Гц при дальности связи 3000 м. Вероятность битовых ошибок от сеанса к сеансу связи изменялась в пределах от 1×10^{-3} до 1×10^{-2} в зависимости от гидрологических и ледовых условий. Такие показатели при использовании избыточного кода с достаточной глубиной позволяют снизить вероятность ошибок до заданного уровня 1×10^{-6} .

Испытания многоканальной антенны, обеспечивающей избирательность по углам прихода акустических лучей, не подтвердили ожидаемой эффективности. Исследования показали, что в точке приема преобладающую амплитуду сигнала имел только один канал с горизонтальной ориентацией лучей. Два других канала, ориентированных на прием лучей с крутыми углами в верхней и

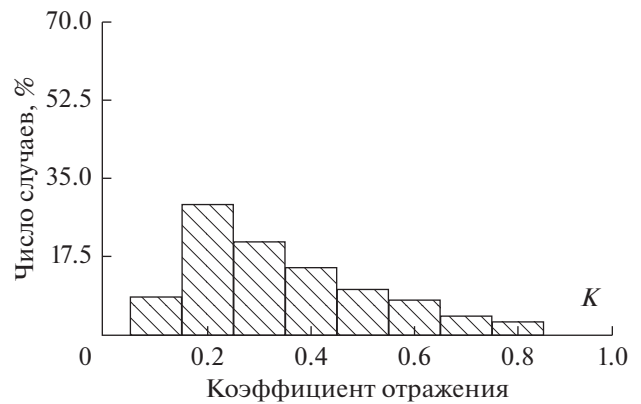


Рис. 3. Гистограмма распределения коэффициента отражения звука от дрейфующего льда при нормальном падении звукового луча.

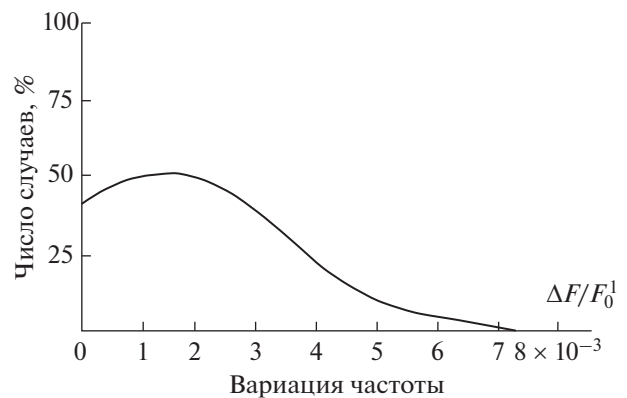


Рис. 4. Распределение амплитуды вариаций доплеровского сдвига частоты (по модулю).

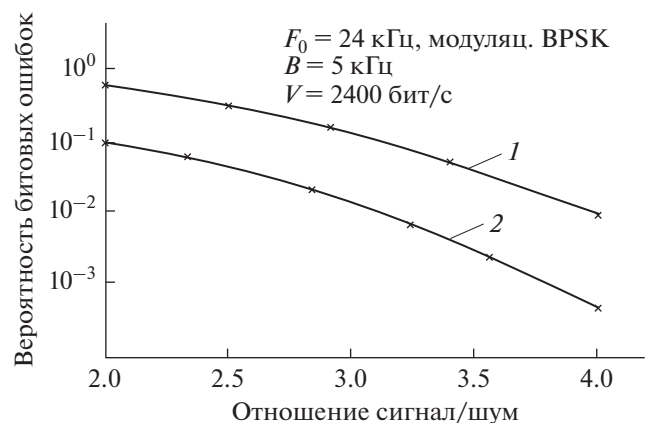


Рис. 5. Распределение вероятности битовых ошибок в зависимости от использованного алгоритма компенсации: 1 – типовой алгоритм компенсации доплеровского сдвига частоты; 2 – алгоритм компенсации с упреждающим прогнозированием фазы.

Таблица 1.

Количество несущих частот K	Шаг несущих частот Δf , Гц	Длительность символа T , мс	Эффективность частотной полосы, бит/Гц	Скорость передачи данных R , бит/с	Вероятность ошибок (до защитного кодирования), %
128	39	13	0.12	2400	1
256	19.5	26	0.24	8000	5
512	9.8	52	0.48	16000	12
1024	4.9	104	0.48	16000	50

нижней полусферах, имели недостаточную амплитуду сигнала и поэтому не использовались. Причина низкой эффективности антенны данного типа заключается в том, что в мелководных арктических морях круто направленные лучи по отношению к горизонту испытывают многократные отражения от границ раздела и быстро затухают, не достигая точки приема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных натурных исследований экспериментального образца приемопередатчика информационно-телекоммуникационной системы с гидроакустическим каналом связи с технологией OFDM предложены эффективные меры преодоления негативного влияния ледяного покрова на дистанционность и помехоустойчивость связи. Основным итогом работы явился оптимальный выбор параметров акустического сигнала и алгоритмов обработки данных, ориентированных на достижение следующих заданных характеристик гидроакустического канала связи при известных ледовых и гидрологических условиях:

- дистанционности;
- вероятности битовых ошибок;
- скорости передачи данных.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы и предложить способы преодоления негативного влияния ледяного покрова на передачу сигналов по гидроакустическому каналу связи с технологией OFDM.

При неподвижном ледяном покрове с неровной отражающей поверхностью основным фактором его негативного влияния является повышенное поглощение и диффузное рассеяние звука, приводящее к снижению амплитуды полезного сигнала и отношения полезного сигнала к уровню шумов. Следствием такого влияния является повышение вероятности битовых ошибок и снижение дистанционности связи. Это влияние может в значительной степени преодолеваться повышением мощности передатчика и многократным сужением полосы частот каждой из несущих сигнала при

сохранении общей полосы частот. Сужение полосы частот ортогональных несущих достигается соответствующим увеличением длительности информационных символов до допустимого предела. Сужение полосы несущих частот пропорционально повышает отношение полезного сигнала к шумам и тем самым значительно восстанавливает дистанционность и надежность связи.

Данный способ улучшения параметров сигнала, естественно, снижает скорость передачи данных и, кроме того, ограничен уровнем нестационарности канала связи, который не допускает увеличения длительности информационных символов за пределы определенного порога, при котором нарушается ортогональность несущих частот и полностью прерывается связь.

Негативным фактором подвижного ледяного покрова являются вариации доплеровского сдвига частоты и фазы относительно среднего значения, обусловленного движением источника излучения. Вариации частоты и фазы вызывают резкое повышение вероятности битовых ошибок за счет потери ортогональности несущих частот, а при достаточно большой амплитуде могут полностью нарушать связь. Вариации частоты и фазы, обусловленные дрейфом льда, эффективно компенсируются цифровым алгоритмом упреждающего прогнозирования, которое опирается на оценку скорости изменения доплеровской частоты в серии из нескольких предшествующих символах данных. Алгоритм упреждающего прогнозирования вариаций доплеровского сдвига позволил примерно в 10 раз снизить вероятность битовых ошибок по сравнению с типовым алгоритмом компенсации без прогнозирования от исходного значения 1×10^{-2} до 1×10^{-3} при SNR равном 2.5. Снижение уровня вероятности битовых ошибок аппаратными средствами позволило применить эффективный алгоритм избыточного кодирования типа Рида–Соломона и довести вероятность ошибок до заданного уровня 1×10^{-6} .

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках прикладных научных исследований по федеральной целевой программе “Исследования и разработки

по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.”, Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0009 от 05.06.2014 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шустов А.С., Куцко А.Е.* Использование модуляции с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) для высокоскоростной гидроакустической связи / Труды XIII Всероссийской конференции Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. СПб, 2016.
2. *Prashant K., Preetam K.* Performance evaluation of modified OFDM for underwater communications / IEEE Int. Conf. on Communications, 2013: IEEE ICC'13 – workshop on radar and sonar network. Budapest, 2013. P. 977–981.
3. *Александров И.А.* Отражение звука от гладких льдов: методика и результаты расчетов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 673–676.
4. *Малышкин Г.С., Шафранюк А.В.* Адаптивное разрешение широкополосных гидроакустических сигналов с частично нарушенной когерентной структурой // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 5. С. 613–629.
5. *Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 526–545.
6. Теория отражения звука. Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: БРЭ, 1992. С. 504.
7. *Polprasert C., Ritcey J.A., Stojanovic M.* Capacity of OFDM systems over fading underwater acoustic channels // IEEE J. Ocean. Eng. 2011. V. 36. № 4. P. 514–524. doi 10.1109/JOE.2011.2167071
8. *Huang J., Berger C.R., Zhou S., Huang J.* Comparison of basis pursuit algorithms for sparse channel estimation in underwater acoustic OFDM // OCEANS 2010 IEEE Conf. Sidney, 2010. P. 24–27.
9. *Hoag D.F., Ingle V.K., Gaudette R.J.* Low-bit-rate coding of underwater video using wavelet-based compression algorithms // IEEE J. Ocean. Eng. 1997. V. 22. № 2. P. 393–400.
10. *Stojanovic M.* OFDM for underwater acoustic communications: adaptive synchronization and sparse channel estimation / IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. Las Vegas, 2008. P. 5288–5291.
11. *Le Page K., Schmidt H.* Analysis of spatial reverberation statistics in the central Arctic // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 99. № 4. P. 2033–2047.
12. *Trubuil J., Goalic A., Beuzelin N.* Synchronization and channel coding in shallow water acoustic communication // OCEANS 2008 IEEE Conf. Quebec City, 2008. P. 1–5.
13. *Zhaohui W., Shengli Z., Preisig J.C., Pattipati K.R., Willett P.* Clustered adaptation for estimation of time-varying underwater acoustic channels // IEEE Trans. Sign. Proc. 2012. V. 60. № 6. P. 3079–3091. doi 10.1109/TSP.2012.2189769
14. *Labrador Y., Karimi M., Pan D., Miller J.* Modulation and error correction in the underwater acoustic communication channel // Intern. J. Comp. Sci. & Network Security. 2009. V. 9. № 7. P. 123–130.
15. Гидроакустическая многоэлементная антенна. Патент на изобретение № 2597687, опубликован 20.09.2016, бюллетень № 2.6.
16. *De Rango F., Veltri F., Fazio P.* A Multipath Fading channel model for underwater shallow acoustic communications / IEEE Intern. Conf. Communic. Ottawa, 2012. P. 3811–3815.
17. *Tong Xuejian, Tao Luo.* Theory and application of OFDM mobile communication technology // Beijing: Posts and Telecommunications Press. 2003, 6 [in Chinese].
18. *Zheng Y.R.* Channel estimation and phase-correction for robust underwater acoustic communications / IEEE Military Communications Conf. Orlando, 2007. P. 1–6.
19. Электронный ресурс: Ice Profiling Sonar (IPS)TM <https://www.aslenv.com/brochures/IPS-Brochure.pdf>.
20. Электронный ресурс: Workhorse Monitor ADCP <http://www.teledynemarine.com/workhorse-monitor-adcp?ProductLineID=12>.