

К. Г. КЕБКАЛ, А. И. МАШОШИН, Н. В. МОРОЗ

## ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ СЕТЕВОЙ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

*Рассмотрены основные проблемы создания сетевой подводной связи, основное отличие которой от традиционной гидроакустической связи состоит в одновременном информационном взаимодействии большого числа пространственно разнесенных абонентов, включающем обмен сообщениями между ними и их высокоточное позиционирование. Этот факт добавляет к существующим проблемам традиционной гидроакустической связи, обусловленным в основном сложностью и изменчивостью гидроакустического канала распространения сигнала, ряд других, например, коллизии в сети, возникающие при одновременной передаче сообщений несколькими абонентами и требующие принятия специальных организационно-технических мер по их устранению (минимизации), а также обусловленную особенностями гидроакустической среды сложную конфигурацию зон парной взаимной «слышимости» абонентов, что ведет к необходимости нетривиальной маршрутизации потоков данных от источника к получателю. В работе показано, что решить эти вопросы может разработка методов формирования и излучения сигналов связи, которые затем трансформируются в протоколы взаимодействия абонентов при передаче и приеме сообщений и реализуются в цифровых гидроакустических модемах, в результате превратившихся в сложные радиоэлектронные устройства.*

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, сетевая подводная связь, гидроакустический модем.

### Введение

Эксплуатация ресурсов морей и океанов для производства продуктов питания, добычи полезных ископаемых и других материалов, а также мониторинг и управление процессами изменения климата и предотвращение опасного загрязнения окружающей среды являются глобальными задачами, которые привлекают к себе все больше внимания.

В то же время океаны и моря до сих пор полностью не изучены. Спутниковые технологии дистанционного зондирования обеспечивают большую территорию покрытия, но в сфере исследования глубин их возможности весьма ограничены. В целом они пригодны лишь для изучения характеристик и свойств поверхности океана. В свою очередь, сенсорные системы, предназначенные для подвод-

---

**Кебкал** Константин Георгиевич. Доктор технических наук, директор, Evologics GmbH (Берлин, Германия) и директор по науке, АО «Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации» (С.-Петербург, Россия).

**Машошин** Андрей Иванович. Доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург, Россия).

**Мороз** Нил Вадимович. Доктор наук, научный сотрудник, Университет Йорка (Йорк, Великобритания).

ных исследований, могут эффективно использоваться практически на любой глубине, однако диапазон их покрытия весьма ограничен.

Для исследования морских глубин поиск путей расширения территории покрытия сенсорных систем выполняется по следующим направлениям:

- построение универсальных маломерных и простых в эксплуатации донных модулей, оснащенных средствами гидроакустической связи и обеспечивающих множественное использование, продолжительное автономное функционирование, малозатратное развертывание, свертывание и перемещение;
- создание маломерных и простых в эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) невысокой стоимости, способных адаптировать/оптимизировать взаимное расположение в группе на маршруте следования и за счет этого создавать мобильную сеть распределенных сенсоров с пространственной дискретизацией достаточной плотности;
- разработка адаптивных методов выборочного обследования морских районов с оптимизацией пространственного распределения подводных аппаратов/сенсоров в мобильной или смешанной сети для наилучшего изучения отдельных явлений во времени и пространстве (временного и пространственного изменений интересующего явления).

Наряду с разработкой маломерных недорогих АНПА и экономичных сенсоров (акустических, радионуклидных, анализаторов содержания растворенного кислорода, углекислого газа, углеводорода и т.д.) чрезвычайно важным является создание технологии гидроакустической связи, обеспечивающей оперативный обмен информацией с узлами распределенной сенсорной системы (сети) и сетевых узлов между собой, а также их высокоточное позиционирование, реализуемое путем измерения текущего расстояния между узлами сети.

Использование множества устройств гидроакустической связи со случайным взаимным перекрытием зон «слышимости» должно, как минимум, обеспечивать множественный доступ к среде распространения сигнала (в частности, разрешение коллизий при приеме пакетов данных), а также маршрутизацию потоков данных от источника к получателю. В общем случае для сбора информации от установленных на большом расстоянии разнородных стационарных и/или мобильных средств как на поверхности, так и под водой необходимым условием является создание набора (стека) специализированных протоколов управления доступом и сетевых протоколов, способных обеспечить эффективное функционирование в гидроакустической среде.

Перечисленные задачи входят в область, рассматриваемую разделом гидроакустики, называемым сетевой подводной связью (СПС).

В целом развитие технологий СПС обусловлено не только необходимостью решить несколько частных задач. Создание гибких и многофункциональных гидроакустических сетей позволит обеспечить совместное/групповое использование стационарных и мобильных систем, например для:

- проведения масштабных подводных научных исследований в следующих областях: океанография, океанология, гидрофизика, геология, подводная археология, охрана природы – с возможностью достаточной (адаптивной) пространственной дискретизации исследуемых районов [1–7];
- поиска подводных месторождений углеводородов методом сейсморазведки с применением группы АНПА в качестве носителей приемников сейсмосигналов [8], а также обширного и тщательного обследования дна перед началом работ по добыче углеводородов на шельфе и прокладке подводных трубопроводов.

проводов, информационно-коммуникационной поддержки работ по прокладке подводных кабелей, в частности подо льдом; обследования подводных сооружений, добывающих платформ и трубопроводов;

- создания сетевых (сетецентрических) систем (полей из множества зажженных либо дрейфующих автономных гидроакустических станций) [9, 10] или распределенных мобильных антенн на базе группы АНПА при решении задач освещения подводной обстановки, охраны водного района, масштабного поиска потенциально опасных объектов на дне и в толще воды, поиска на обширном морском пространстве затонувших кораблей и самолетов [11], создания управляемых минных полей;
- позиционирования и ориентирования АНПА с использованием сигналов нескольких донных маяков-ответчиков при доставке различных грузов в труднодоступные подводные районы [12].

Некоторые типовые примеры применения СПС приведены на рис. 1.

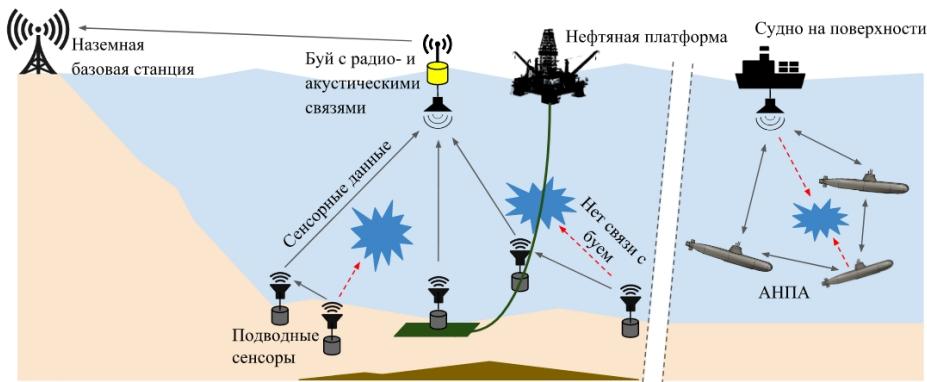


Рис. 1. Типовые примеры применения сетевой подводной связи

Для решения перечисленных и других задач СПС должна удовлетворять ряду традиционных требований, во многом исключающих друг друга, предъявляемых к гидроакустической связи, к которым относятся:

- высокая надежность связи в сложных гидроакустических условиях и при одновременном информационном взаимодействии большого числа корреспондентов;
- большая дальность связи при высокой скорости обмена данными;
- высокоточное взаимное позиционирование корреспондентов в процессе обмена данными;
- ограниченные габариты и энергопотребление сетевого оборудования, предназначенного для установки на малогабаритные АНПА.

Целью работы является обзор путей решения проблем СПС с одновременным изложением ряда оригинальных результатов в части структуры модема для сетевой подводной связи и реализуемых им протоколов связи.

### Особенности цифровой гидроакустической связи

Активное развитие гидроакустической связи началось с появлением подводного флота. За более чем 100 лет технологии проделали путь от подводного колокола до адаптивной связи с использованием сложных кодированных сигналов и с радиусом действия до нескольких сотен километров [13]. Вместе с тем, не-

смотря на все очевидные достижения, у гидроакустической связи осталось одно существенное ограничение – возможность связываться одновременно только с одним корреспондентом. Данным ограничением можно пренебречь, если речь идет о связи между подводными лодками и/или надводными кораблями, но оно критично для подводных сетевых и робототехнических систем, в которых наличие одновременной связи и взаимного позиционирования множества корреспондентов друг с другом является принципиально необходимым.

В результате началось интенсивное развитие СПС, позволяющей объединить на сетевой основе большое количество подводных абонентов, совместно решаящих поставленную задачу. В научно-технической литературе по аналогии с устоявшимся термином «интернет вещей» (Internet of Things – IoTs), предложенным американским ученым Кевином Эштоном в 1999 году и подразумевающим сетевое объединение различных устройств на производстве и в быту, появился термин «интернет подводных вещей» (Internet of Underwater Things – IoUTs) [14], по сути эквивалентный понятию «сетевая подводная связь».

В целом, какое бы физическое поле ни использовалось, передача цифровых данных под водой является весьма сложной задачей. Из-за сильного затухания в соленой воде передача радиоволн для цифровой связи в океане возможна лишь на очень небольшие расстояния (от единиц до десятков метров в зависимости от частоты). В силу большого рассеивания и затухания светового сигнала в морской воде передача данных с помощью оптических методов осуществляется лишь на дистанции порядка десятков метров, а у дна, в облаке донных отложений, расстояние может сокращаться до десятков или даже единиц сантиметров. Ввиду этого гидроакустическая связь, сигналы которой могут распространяться на десятки, сотни и даже тысячи километров [13, 15], обладает большим преимуществом.

Тем не менее созданию технических средств гидроакустической связи препятствует множество специфичных (по сравнению с радиосвязью) эффектов гидроакустической среды, таких как сильно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала, длительные задержки распространения гидроакустического сигнала (скорость распространения на пять порядков меньше, чем у радиосигнала), реверберация (реверберация вперед) большой интенсивности и длительности, образование протяженных зон тени, замирания сигнала вследствие его многолучевого распространения, большие доплеровские искажения (частотный сдвиг и доплеровское расширение спектра сигнала), быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды, различие (асимметрия) характеристик принимаемого сигнала на противоположных сторонах гидроакустического канала связи, обусловленная пространственно-временными искажениями связного сигнала, которые вносят среда его распространения. Заметим, что под реверберацией в гидроакустической связи понимаются отражения связного сигнала от неоднородностей среды распространения, которые приходят в точку приема, как правило, с некоторым запаздыванием и, возможно, с доплеровским искажением по отношению к прямому связному сигналу и вносят искажения в него [110].

Наличие подобного рода эффектов в среде распространения создает сложности при разработке таких методов гидроакустической связи, которые бы одинаково хорошо функционировали в самых разнообразных условиях распространения сигнала. В связи с этим, чтобы устранить последствия влияния среды, в гидроакустической связи используется множество частных методов и их комбинаций:

- формирование и обработка гидроакустического сигнала высокой помехоустойчивости (обычно широкополосных сигналов);

- управление доступом к среде с учетом специфики распространения гидроакустического сигнала;
- сетевая маршрутизация данных с учетом многолучевости и временной изменчивости среды распространения;
- транспорт данных в условиях длительных задержек в их доставке и разрывов связности сети.

Внедрение этих методов обусловило повсеместный переход на цифровую гидроакустическую связь (ЦГАС).

Ниже анализируются основные направления, по которым происходит развитие методов ЦГАС.

### Методы формирования и обработки сигнала

Современные методы формирования и обработки сигнала позволяют вести оперативный учет и противостоять воздействию многолучевого рассеивания (замираниям, межсимвольной интерференции) [16–18], доплеровским искажениям (частотным сдвигам и расширению доплеровского спектра) [19–21], а также становятся более эффективными с точки зрения потребления энергии [22–30] и удельной плотности передачи данных в сильно ограниченной полосе частот [27, 31–34].

В целом, для повышения устойчивости сигналов к воздействию многолучевого рассеивания разработчики устройств ЦГАС ищут альтернативы принимающим эквалайзерам классической структуры. Одним из таких альтернативных вариантов является так называемый разреженный эквалайзер [17, 18]. Соответствующий алгоритм обеспечивает работоспособность эквалайзера при обработке меньшего числа весовых коэффициентов принимаемых сигналов (далее – весов), а также меньшего числа их выполняемых обновлений. Благодаря уменьшению числа весов эквалайзера он способен более оперативно отслеживать изменение условий приема сигнала. Кроме того, уменьшается мощность шума, поступающего на его вход.

Для повышения энергетической эффективности систем ЦГАС быстрое развитие получило направление итеративного выравнивания сквозной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала с помощью турбоэквалайзеров [21, 24, 27, 28, 35].

Для повышения надежности работы когерентного приемника классические эквалайзеры дорабатываются устройствами предобработки, позволяющими комбинировать множество разнесенных в пространстве каналов, по которым принимаются сигналы связи. Для улучшения характеристик принимаемого сигнала в условиях продолжительной реверберации и доплеровских искажений разрабатываются средства адаптивного формирования диаграммы направленности приемо-передающих антенн, что позволяет упростить обработку и повысить достоверность декодирования сигнала связи [27, 32, 35–37]. Кроме того, создаются методы множественного излучения и/или множественного приема с использованием пространственно-временной модуляции сигнала [38–41, 72].

Каждый метод формирования и обработки сигнала может с большей или меньшей эффективностью обеспечивать обмен данными в соединении «точка–точка», т.е. между двумя устройствами ЦГАС. Тем не менее такие методы обычно не обеспечивают одновременную работу множества устройств в зоне взаимного покрытия (или обеспечивают в очень ограниченных пределах,

например одновременно может функционировать лишь небольшое число устройств за счет разделения частотной полосы между ними, что, однако, приводит к значительному снижению производительности каждого из них).

### **Проблемы создания цифровых гидроакустических сетей и их решение**

Существует четыре основных варианта совместного использования общей среды связи между несколькими узлами в сети:

- частотное разделение каналов (Frequency Division Multiple Access – FDMA), при котором для каждого узла связи выделяется своя уникальная полоса частот, так что несколько передающих/принимающих устройств могут работать без помех одновременно в разных полосах частот;
- временное разделение каналов (Time Division Multiple Access – TDMA), при котором все узлы связи передают/принимают в одной полосе частот, но в разное время;
- кодовое разделение каналов (Code Division Multiple Access – CDMA), при котором несколько узлов передают/принимают одновременно в один и тех же полосах частот, но с разным кодированием (модуляцией) символов, передаваемых разными узлами;
- пространственное разделение каналов (Space Division Multiple Access – SDMA), при котором передача/прием сообщений между каждой парой узлов осуществляется в специально сформированных узких, не перекрывающихся с другими парами диаграмм направленности излучающих/приемных антенн.

Все эти способы мультиплексирования широко применяются в наземных беспроводных сетях. Например, сотовые сети GSM второго поколения (2G) используют TDMA, мобильные сети 3G UMTS – CDMA, а современные сети 4G LTE – Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) и Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), где блоки ресурсов, назначенные разным пользователям, разделены как по частоте, так и по времени. Помимо этого, многие современные наземные беспроводные сети используют пространственное разделение каналов с помощью многоантенных устройств и методов передачи на основе технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output), чтобы повысить скорость передачи данных, предоставляемую пользователям сетей (например, сотовые сети на основе Massive MIMO и IEEE 802.11 Wi-Fi сети с многоантennными точками доступа).

Вместе с тем фундаментальные физические ограничения подводного акустического канала связи не позволяют применять методы множественного доступа столь же эффективно, как в наземных радиосетях. Использование FDMA в гидроакустических сетях ограничено узкой полосой используемых частот, дробить которую на еще более узкие полосы нецелесообразно, поскольку [42, 107], во-первых, резко сокращается скорость передачи информации, а во-вторых, при сужении полосы частот повышается риск селективных замираний при распространении связного сигнала в многолучевом канале.

Использование CDMA для множественного доступа в гидроакустических сетях [108] тоже гораздо менее эффективно, чем в наземных радиосетях, поскольку большие задержки прихода сигналов от разных передатчиков значительно усложняют поддержание ортогональности используемых кодов. В классическом CDMA, например 3G UMTS, чтобы эффективно подавлять помехи, все символы от нескольких узлов должны приниматься синхронно. В противном случае значительно снижается отношение «сигнал–шум».

Для достижения пространственного мультиплексирования с использованием методов предварительного кодирования и выравнивания MIMO [109] необходимо точное знание характеристик канала на момент передачи между каждой парой узлов. Оценка характеристик канала может быть выполнена только приемником. В результате пространственное мультиплексирование в гидроакустических сетях осуществимо при приеме сигналов от нескольких разнесенных узлов, но трудно реализуемо при передаче сигналов разным узлам, поскольку требует предварительной передачи от приемника передатчику измеренных текущих характеристик каналов.

По сравнению с частотным, кодовым и пространственным разделениями каналов временнóе является более простым и гибким методом множественного доступа к среде, поскольку оно позволяет создавать сколько угодно ортогональных каналов с переменной пропускной способностью, не ограниченных шириной используемой полосы частот и не требующих синхронности принятых символов или передачи от приемника передатчику измеренных текущих характеристик канала. Ввиду этого в СПС наиболее распространены методы, основанные на временнóм разделении каналов, которые можно объединить в две группы, рассматриваемые ниже: методы на основе расписания передач и методы на основе конкуренции за доступ к среде.

#### *Методы управления доступом к среде на основе расписания передач*

Одним из простейших и наиболее распространенных методов управления доступом к среде (Medium Access Control – MAC) является TDMA-мультиплексирование с разделением по времени. В TDMA каждому узлу назначается отдельный периодический временной интервал (слот), в течение которого он может передавать пакет без помех от других узлов в сети, как показано на рис. 1. Этот временной слот содержит защитный интервал, который компенсирует задержки распространения сигналов, внесенных в расписание, а также дрейф часов каждого из узлов сети. Обычно этот дрейф составляет порядка десятков микросекунд за секунду, что может сильно ограничить автономность подводной сети или вызвать необходимость существенного увеличения защитных интервалов. Тем не менее разделение во времени считается надежным и эффективным подходом к MAC, особенно в условиях высокой нагрузки на сеть, где большая часть слотов используется для передач пакетов данных. В качестве основного недостатка (кроме протяженного защитного интервала) отмечается длительная задержка распространения гидроакустического сигнала, что является фундаментальной проблемой при применении TDMA в гидроакустических сетях в отличие от обычных наземных радиосетей. Если длительность защитного интервала из-за дрейфа часов со временем становится управляемой величиной вследствие развития техники, в частности установки атомных часов на каждом донном узле, то низкая скорость распространения гидроакустического сигнала (на пять порядков ниже скорости света) не позволяет сократить длительность защитного интервала до малозначимой величины. Это означает, что, во-первых, пропускная способность классических протоколов TDMA в гидроакустических сетях значительно уменьшается за счет больших защитных интервалов, необходимых для компенсации длительных задержек распространения звука [42, 43], как показано на рис. 2. Во-вторых, рост продолжительности TDMA-слотов из-за защитных интервалов увеличивает общую длительность временного кадра TDMA, то есть последовательность слотов, назначенных

каждому узлу в сети. При больших размерах сети это может приводить к недопустимо большим задержкам в доставке пакетов, поскольку каждый узел должен ждать следующей возможности своей передачи, которая обычно возникает один раз за каждый TDMA-кадр.

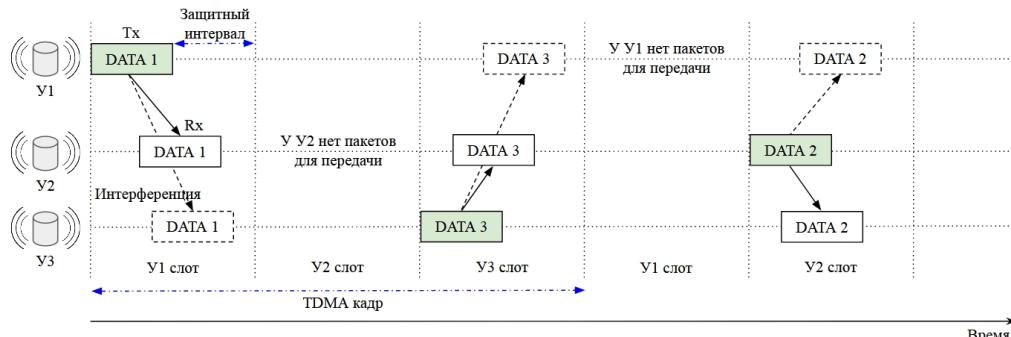


Рис. 2. Типовой пример мультиплексирования с временным разделением (TDMA),  
где каждому узлу назначается отдельный временной интервал для передач,  
при котором не происходит коллизий

Существует множество публикаций, посвященных созданию таких графиков передачи TDMA, которые направлены на преодоление негативного воздействия длительных задержек сигнала на производительность сети. Это часто означает, что предлагаемые решения ограничиваются конкретным типом топологии сети или определенным типом пакетного трафика. Например, в [44] предложен метод создания графиков передач для специального случая гидроакустических сетей с линейной топологией, которые максимизируют пропускную способность сети. В [45] те же авторы строят графики максимизации пропускной способности для сетей с решетчатой топологией, которые используют длительные задержки распространения сигналов для осуществления нескольких передач одновременно. В [46] предложена аналогичная идея использования длинных задержек распространения сигналов для обеспечения возможности одновременного использования временных слотов в ad-hoc-сетях. Так, пакеты, передаваемые двумя узлами в одно и то же время, могут достичь приемника в разное время (т.е. без коллизий), если различаются задержки распространения сигнала. Еще один пример из известных протоколов MAC на основе расписания передач, предназначенных именно для гидроакустических сетей, – это так называемый Staggered TDMA Underwater MAC Protocol (STUMP) [47]. Он компенсирует временную привязку TDMA на каждом узле на основе знаний о задержках распространения и таким образом обеспечивает высокую пропускную способность сети.

Основной недостаток подхода TDMA заключается в необходимости синхронизации часов между узлами сети, что в отличие от наземных радиосистем часто является сложной задачей в условиях гидроакустических сетей из-за длительных задержек распространения сигналов, изменяющихся во времени параметров каналов, многолучевого распространения и необходимости передавать служебные пакеты, объем которых является достаточно большим [42, 48].

Использование атомных часов (chip-scale atomic clocks) [49] является альтернативным способом обеспечения точной синхронизации времени сетевых узлов в течение длительных периодов, но это неосуществимо во многих случаях, в частности, из-за их чрезмерной стоимости, высокого потребления мощности и старения кристалла [50, 51].

Из-за сложности синхронизации узлов гидроакустических сетей во многих работах, посвященных протоколам MAC на основе расписания, изучается возможность снизить точность синхронизации узлов – как правило, за счет некоторого уменьшения производительности сети. Например, в [47] показано, что описанный ранее протокол STUMP может обеспечить достаточную производительность даже при ошибках в синхронизации узлов и неточных знаниях задержек распространения сигналов. В [52] предложен алгоритм UW-FLASHR, который позволяет узлам оперативно получать временные слоты для передачи данных с небольшим количеством конфликтов, без необходимости централизованного управления, точной синхронизации часов и точного знания задержек распространения сигналов. Он обеспечивает пропускную способность сети до 80% от максимальной производительности канала, однако она значительно снижается при росте длительности задержек распространения сигналов и более коротких пакетах. Например, при 50-байтовых пакетах и скорости передачи 15 кбит/с с максимальной задержкой распространения в 1 с пропускная способность UW-FLASHR падает до 10%.

Еще один вид протоколов на основе расписания пакетов, недавно предложенный, предполагает полное отсутствие синхронизации между сетевыми узлами. Эти протоколы обеспечивают высокую пропускную способность, но ценой ограничения этих решений конкретными сценариями и типами топологии сети. Например, так называемый Transmit Delay Allocation (TDA-MAC) протокол, предложенный в [53] и проверенный на практике в [54], работает на основе одного ведущего узла, передающего широковещательный пакет управления всем остальным узлам с запросом данных (request for data – REQ) и с инструкцией отправить пакет этих данных обратно ведущему узлу после определенной задержки, как показано на рис. 3.

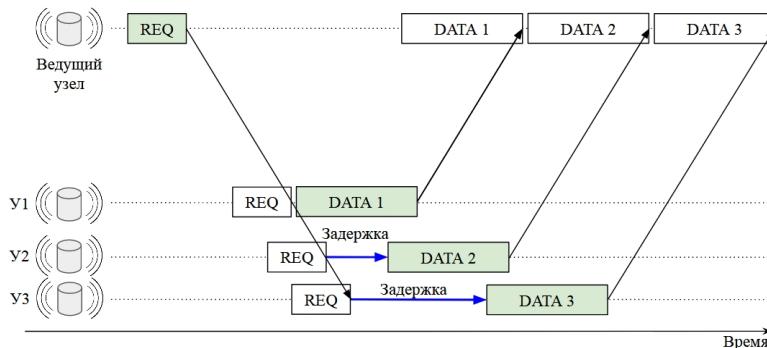


Рис. 3. Иллюстрация несинхронизированного планирования передач пакетов с использованием протокола TDA-MAC

Ведущий узел передает широковещательный пакет, который дает всем другим узлам локальную привязку времени. Длительные задержки распространения гидроакустических сигналов компенсируются за счет уменьшения задержки передачи на данном узле, заранее указанной ведущим узлом. Эти задержки передачи рассчитываются ведущим узлом заранее на основании его знаний о задержках распространения сигналов. При большом количестве узлов и/или достаточно большой длительности пакетов TDA-MAC достигает пропускной способности сети, близкой к теоретическому максимуму. Вместе с тем его применение ограничено централизованными сетевыми топологиями, где все сетевые узлы имеют связь с центральным ведущим узлом. Работа тех же авторов в [55] расширяет TDA-MAC до топологий, позволяющих некоторым узлам подключаться к ве-

дущему узлу через другой узел, который выполняет функцию реле. При этом высокая пропускная способность указанного протокола по-прежнему зависит от сети, в основном состоящей из соединений «много-к-одному».

В [56] предложен протокол Assymetric Propagation Delay-Aware TDMA (APD-TDMA), который обеспечивает несинхронизированное планирование передач, используя тот же принцип отложенного ответа на широковещательный пакет, подобный TDA-MAC, но расширяет его до сетей с мобильными узлами. В начале каждого цикла передач пакет управления от ведущего узла содержит информацию об обновленных задержках передач, учитывающих передвижения узлов. При этом, как и в изначальной версии TDA-MAC, применение этого протокола также ограничено централизованными сетями, где ведущий узел напрямую соединен со всеми остальными узлами.

Подводя итог рассмотрению методов управления доступом к среде на основе расписания передач, можно констатировать, что разные сети требуют различных решений, каждое из которых адаптировано к конкретному типу топологии сети и пакетному трафику вследствие фундаментального ограничения скорости распространения звука. Наиболее удобные с точки зрения топологии сети протоколы TDMA, как правило, значительно менее эффективны из-за резкого увеличения продолжительности интервала бездействия.

Тем не менее, несмотря на гораздо меньшую пропускную способность протоколов TDMA по сравнению с наземными беспроводными сетями, они нередко являются лучшим выбором при высоком уровне пакетного трафика и в СПС, поскольку они по определению избегают коллизий и конкуренции за доступ к среде между несколькими узлами сети. Еще одно ограничение большинства протоколов TDMA в гидроакустических сетях – это необходимость синхронизации часов на разных устройствах, хотя при значительном увеличении длины TDMA-кадра в СПС высокая точность синхронизации часов для успешного разделения канала по времени часто не требуется.

#### Протоколы на основе конкуренции за доступ к среде

Несинхронизированный метод доступа к гидроакустическому каналу предполагает в основном применение другого класса протоколов МАС, основанного на конкуренции за доступ к среде среди нескольких узлов сети.

На рис. 4 показан типовой пример доступа к среде на основе конкуренции, где узел, который должен отправить пакет, сначала передает предполагаемому получателю короткий контрольный пакет, обычно называемый Request-to-Send (RTS).

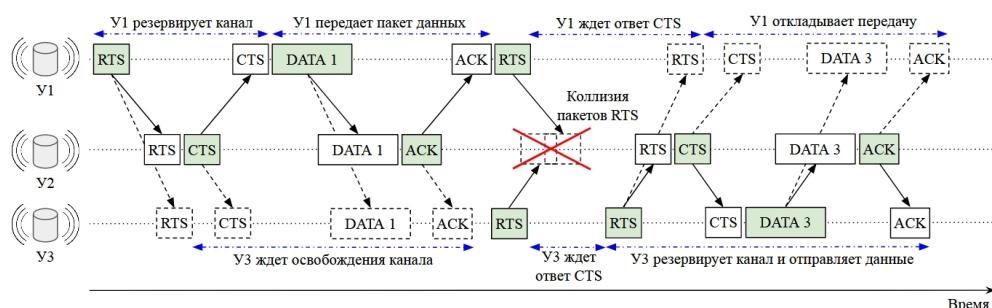


Рис. 4. Типовой пример протокола МАС на основе резервирования канала, где два узла (У1 и У3) пытаются зарезервировать канал для передачи пакета данных узлу У2.

Длительные задержки распространения гидроакустических сигналов вызывают более высокую вероятность коллизий пакетов и более длительные периоды простоя на канале

Если целевой узел принимает этот пакет RTS без коллизий, то предоставляет доступ к каналу исходного узла путем ответа с помощью пакета Clear-to-Send (CTS). Когда исходный узел-источник принимает адресованный ему CTS, он может использовать канал связи, зарезервированный исключительно для его передачи. Тем временем все прочие узлы, которые получают CTS, не адресованный им, откладывают свои передачи, потому что канал зарезервирован для другого узла. После приема пакета данных принятого отправлять короткое подтверждение (Acknowledgement – ACK) исходному узлу об успешной доставке. Этот подход резервирования канала обеспечивает надежный доступ к среде и высокую пропускную способность в наземных радиосетях, в связи с чем он используется, например, в коммерческих сетях IEEE 802.11 Wi-Fi [57]. Вместе с тем на рис. 4 видна ограниченность пропускной способности протоколов на основе RTS/CTS, применяемых в гидроакустических сетях с гораздо более длительными задержками распространения сигналов по сравнению с радиосетями. Доля времени, затрачиваемого на передачу и получение полезной информации (пакетов данных), сравнительно невелика из-за длительных периодов бездействия, когда узел ожидает ответный пакет CTS или ACK. Кроме того, в гидроакустических сетях значительно увеличивается вероятность столкновения пакетов RTS из-за позднего обнаружения пакетов RTS/CTS от других узлов, что обусловлено малой величиной скорости звука. Вероятность коллизий стремительно возрастает с увеличением количества узлов в сети, что часто приводит к очень низкой пропускной способности канала.

На рис. 5 показан другой классический способ разрешения конфликтов для доступа к каналу – Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [58]. Основная идея CSMA заключается в том, что любому узлу, который хочет получить доступ к общему каналу, сначала необходимо прослушать текущие передачи на канале, чтобы определить, занят он или свободен. Только когда на канале не обнаружено передач, данный узел начинает свою собственную передачу. Этот подход хорошо работает, если задержки распространения сигнала короткие, то есть когда узлы могут обнаружить новые передачи в канале почти мгновенно. Как показано на рис. 4, способность узлов к обнаружению текущих передач ограничена скоростью звука.

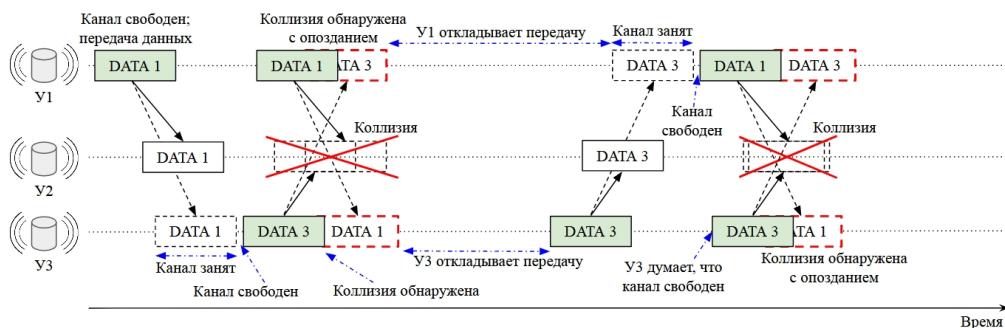


Рис. 5. Типовой пример доступа к среде на основе прослушивания среды, прежде чем передавать пакеты данных (Carrier Sense Multiple Access – CSMA).

Длительные задержки распространения гидроакустических сигналов  
увеличивают вероятность столкновения пакетов  
из-за задержки при обнаружении передач с других узлов

Ниже описаны другие наиболее известные примеры протоколов МАС на основе конкуренции, которые направлены на решение таких задач, как резервирование каналов и прослушивание подводной акустической среды.

Так, Carrier-Sense Multiple Access-Aloha (CSMA-Aloha) [59] относится к классу протоколов управления с некоординированным доступом к среде и является усовершенствованным вариантом широко распространенного в радиосвязи протокола Aloha [60] несогласованного произвольного доступа к каналу, при котором любой узел, имеющий пакет для передачи, передает его без задержки. Усовершенствование состоит в том, что перед передачей данных в гидроакустическую среду распространения каждый узел сети в течение псевдослучайного интервала времени пытается определить, является ли среда свободной от активности соседних узлов. Если канал занят, то передача пакета данных откладывается на псевдослучайное время, до тех пор пока канал не окажется свободным. Интервал выбирается псевдослучайным во избежание синхронизации попыток доступа к среде множеством узлов. Следует отметить, что использование типичного для цифровой радиосвязи баланса между длительностью интервала прослушивания среды и длительностью пакета данных может приводить к значительному снижению пропускной способности сети в гидроакустической среде. В этом случае используется сравнительно короткий интервал прослушивания, для того чтобы исключить передачу собственного сигнала в то время, когда в окрестности размещения текущего узла происходит распространение сигнала от одного из «соседей». Благодаря этому большинства коллизий принимаемых пакетов данных на всех узлах сети удается избежать.

DACAP [61, 62] – несинхронный протокол управления доступом к среде, основанный на квитировании множества отдельных соединений между узлами сети. Для осуществления обмена данными узел-источник, намеревающийся передать данные соседнему узлу, генерирует запрос на разрешение передачи. Получатель (соседний узел) отвечает служебным пакетом, разрешающим передачу данных. В случае когда сразу после этого он обнаруживает активность в среде распространения, которая может привести к коллизии, он генерирует краткий предупредительный сигнал. После получения сигнала, разрешающего передачу данных, узел-источник выдерживает краткую паузу. Если в течение этой паузы он обнаруживает активность соседних узлов или краткий предупредительный сигнал узла-получателя, передача данных откладывается на период, который зависит от дальности между источником и получателем (благодаря двунаправленному квитированию эта дальность является известной величиной). Интервал выбирается так, чтобы гарантировать отсутствие коллизий. Обычно для сохранения высокой пропускной способности сети минимальная длительность отложенного интервала времени выбирается одинаковой для всех узлов и равной двойному времени распространения сигнала между ближайшими узлами сети. Если расстояния между узлами соизмеримы с разнесением наиболее удаленных узлов, длительность отложенного интервала времени выбирается как двойное время распространения сигнала между удаленными узлами.

T-Lohi [63] является протоколом управления доступом к среде, основанным на использовании служебных тонов для резервирования канала и разрешения конкурентных запросов на доступ к каналу от множества узлов сети. Для обнаружения коллизий и оценки числа «соперников» используется механизм разрешения коллизий, учитывающий пространственно-временную неопределенность и большую латентность доставки пакетов данных. Использование протокола T-Lohi позволяет достичь сравнительно высокой пропускной

способности сети в широком диапазоне значений загрузки сети данными полезной нагрузки.

Aloha with Collision Avoidance (Aloha-CA) [64] – вариант протокола Aloha, усовершенствованный за счет включения в него механизма разрешения коллизий. Суть усовершенствования состоит в том, что в отсутствие данных для передачи каждый узел сети находится в режиме прослушивания среды распространения сигнала. Обрабатывается каждый сигнал, поступающий в тракт, вне зависимости от того, кому он направляется. С учетом известной дальности до узла-получателя пакета данных оценивается время, в течение которого среда распространения может быть занята его ответным сигналом. Каждый узел формирует базу данных, содержащую информацию о времени занятости канала сигналами соседних узлов. При наличии данных для передачи узел сети ожидает освобождения среды распространения от сигналов соседних узлов и проверяет собственную базу данных, с помощью которой устанавливает, что его излучение в текущий момент не приведет к коллизиям при приеме данных другими узлами сети. При выполнении этих условий он осуществляет доступ к среде распространения и передает данные. Отличительной чертой протокола является отсутствие необходимости квитирования принимаемых пакетов данных, синхронизации узлов сети и передачи служебных тонов. Алгоритм может быть реализован на малопроизводительном (и малопотребляющем) процессоре с небольшим количеством доступной памяти.

Aloha with Advance Notification (Aloha-AN) [64] – вариант протокола Aloha, усовершенствованный путем включения в него механизма уведомления соседних узлов о предстоящем цикле передачи данных. Протокол подобен протоколу Aloha-CA. Отличие состоит в том, что перед передачей пакета данных узел, претендующий на доступ к среде распространения, генерирует короткий служебный пакет-уведомление о предстоящей передаче и через некоторое время начинает передачу данных. Пакет-уведомление позволяет соседним узлам оценить интервал времени, на котором гидроакустическая среда будет занята. При реализации протокола нет необходимости в квитировании принимаемых пакетов и синхронизации узлов сети, однако требования к ресурсам вычислителя более высокие.

Reservation based MAC (R-MAC) [65] – протокол управления доступом к среде, содержащий три фазы: определение задержки распространения пакета данных в сети, резервирование периода доступа к среде, передачу данных. Здесь в течение первых двух фаз по сути осуществляется синхронизация работы соседних узлов сети. Реализация такого протокола обеспечивает равные возможности для всех узлов в резервировании доступа к среде, а также характеризуется сравнительно высокой энергетической эффективностью и позволяет достигать тщательного планирования времени доступа к среде каждым узлом для полного исключения коллизий. Вместе с тем протокол требует передачи сравнительно большого числа служебных сигналов и характеризуется довольно продолжительными задержками доставки сигнала от источника к конечному получателю.

Протокол Slotted Floor Acquisition Multiple Access (Slotted FAMA) [66] выполняет функции прослушивания среды, конкуренции за доступ к среде RTS/CTS/ACK и синхронизации структуры кадра с отдельными временными интервалами, назначенными для RTS, CTS, передачи данных и подтверждения (ACK). Он разработан специально для гидроакустических сетей, чтобы обеспечить значительную экономию энергии по сравнению с исходным протоколом FAMA [67] за счет уменьшения длины пакетов RTS и CTS. Тем не менее прото-

кол также имеет низкую пропускную способность, вызванную длительными задержками распространения акустических сигналов.

Подводя итог рассмотрению протоколов на основе конкуренции за доступ к среде, можно констатировать, что в отличие от протоколов типа TDMA методы доступа к среде на основе произвольных передач, резервирования канала и прослушивания среды обычно более применимы к различным сетевым топологиям и в целом способны снизить задержки доставки пакетов. Вместе с тем длительные задержки распространения гидроакустических сигналов значительно ограничивают способность узлов к обнаружению других передач, что повышает вероятность коллизий и снижает пропускную способность сети.

В связи с этим протоколы на основе конкуренции за доступ к среде целесообразно применять при низком уровне трафика пакетов и, соответственно, низкой вероятности наличия двух или более узлов сети, одновременно нуждающихся в доступе к среде для передачи данных. Например, такие протоколы более уместны для использования в подводных сенсорных сетях, где передачи данных происходят только при обнаружении относительно редких случайных происшествий, например повышенной сейсмической активности или изменений давления, температуры или других параметров, превышающих нормальный диапазон работы подводной инфраструктуры. В свою очередь, при применении СПС в случаях, где ожидаемый трафик пакетов более предсказуем, регулярен и/или высок, протоколы типа TDMA, описанные в предыдущем подразделе, являются намного более эффективным решением, поскольку позволяют избегать конкуренции за доступ к среде.

### *Методы маршрутизации*

Для того чтобы гидроакустическая сеть охватывала большие пространства в море, требуется, помимо специализированных протоколов уровня управления доступом к среде, наличие специализированных (для условий гидроакустической среды) сетевых протоколов. Дело в том, что из-за физических особенностей водной среды (например, вертикального распределения скорости звука) в ней может наблюдаться образование протяженных зон гидроакустической тени. В связи с особенностями решаемой задачи (например, при движении приемника-передатчика) может наблюдаться также быстрое изменение размеров зон гидроакустической освещенности и их случайное чередование с зонами тени. В результате характеристики сигналов в точке приема могут быстро меняться. В таких условиях передача данных между источниками и получателями, в особенности разнесенными на большое расстояние, гарантироваться не может из-за отсутствия или исчезающее малого уровня сигнала в точке приема.

Необходимость передачи данных в гидроакустической сети, для которой характерны постоянно изменяющиеся условия излучения и приема сигналов, повлекла за собой в последнее время развитие специализированных сетевых методов, которые способны учитывать и использовать случайным образом меняющееся число «соседей» – узлов сети, находящихся в области взаимной или односторонней «слышимости» из-за асимметрии характеристик канала связи. Важным направлением в создании сетевых методов связи является разработка алгоритмов формирования так называемых ad-hoc-сетей [68].

В целом направление, в котором развиваются сетевые протоколы, – это достижение динамической маршрутизации, масштабируемости, снижения потребления энергии на поиск маршрутов и уменьшения задержек доставки от источника к ко-

нечному получателю. Наиболее распространенные в цифровой гидроакустической связи протоколы управления доступом к среде приведены ниже.

Sequence Number Controlled Flooding (SNCF) [69, 70], или протокол затопления с управлением по порядковому номеру, – усовершенствованный вариант базового протокола затопления [71], который исключает фатальное переполнение сети лавиной перепримаемых и перенаправляемых пакетов данных. Перенаправляемые пакеты снабжаются номером и адресом передающего узла сети. При получении пакета принимающий узел сравнивает его номер с таблицей номеров уже переправленных пакетов. Дальнейшей передаче подлежат только пакеты с новыми номерами.

Dynamic Probabilistic Flooding (DPFlood) [72] – протокол маршрутизации, основанный на динамическом вероятностном затоплении. Протокол принимает решение о перенаправлении поступившего пакета данных, исходя из текущего числа соседних узлов (числа доступных соединений). На основе этого для каждого узла генерируется значение вероятности, с которой он отправляет дальше по сети последний поступивший пакет данных. Чем большее число «соседей» имеет узел сети, тем ниже вероятность переотправки им последнего принятого пакета данных. Благодаря этому существенно сокращается количество избыточной информации, передаваемой в сети.

Information Carrying Based Routing Protocol (ICRP) [73, 74] основан на передаче совмещенных пакетов со служебной информацией и данными полезной нагрузки. У этого вида протоколов служебные данные, предназначенные для установления маршрута доставки данных, передаются как часть пакета с данными полезной нагрузки. Благодаря этому механизм маршрутизации и передачи данных является эффективным с точки зрения потребления энергии и характеризуется относительно малым временем маршрутизации. Он не зависит от числа участников сети и их взаимного расположения и, соответственно, легко масштабируется для произвольного количества участников, их пространственного разнесения и/или мобильности.

Focused Beam Routing (FBR) [75] – протокол «сосредоточенной» маршрутизации, реализующий распределенный алгоритм, по которому маршрут устанавливается динамически при прохождении пакета данных в направлении конечного получателя. Установление маршрута происходит поинтервально с задействованием на каждом интервале сравнительно небольшого числа узлов сети. Протокол обеспечивает масштабирование и функционирование многопролетных линий связи с переприемами при покрытии больших пространств моря. При этом узлы связи могут быть как статическими, так и мобильными. Реализация протокола предполагает возможность учета взаимовлияния событий на сетевом уровне и уровне управления доступом к среде для минимизации удельного потребления энергии, необходимой для передачи данных полезной нагрузки. Особенностью этого протокола маршрутизации является необходимость априорного определения местоположения источника и получателя данных.

Hop-by-Hop Dynamic Addressing Based (H2-DAB) [76] – протокол маршрутизации, основанный на алгоритме затопления и динамической адресации узлов сети. При распространении пакета данных алгоритм присваивает идентификатор каждому узлу сети. Уникальный идентификатор соответствует номеру пролета и его логическому удалению от узла – источника данных. Протокол не требует информации о расположении узлов сети и их пространственном разнесении (соответственно, легко масштабируется) и допускает наличие множества конечных получателей данных. Отличительной особенностью является воз-

можность оптимизации (по совместному критерию) энергопотребления и времени доставки данных в сети.

Channel-Aware Routing Protocol (CARP) [77] – протокол маршрутизации, основанный на ведении таблицы истории соединений с актуализацией информации о качестве соединений с соседними узлами. На основе этой информации алгоритм принимает решение о дальнейшем направлении данных каждым узлом сети.

Low Overhead Routing Protocol (LOARP) [78] – протокол маршрутизации с минимизацией размеров служебных пакетов для самоорганизующихся динамических сетей. Установление пути происходит по запросу, в результате которого служебный пакет распространяется в сети в режиме широковещания с перепримером по алгоритму затопления до достижения конечного получателя. Справка о выбранном пути возвращается в уникастовом режиме по установленному пути. В сети выполняется оценка ее производительности по критериям битовой скорости передачи данных, вероятности доставки пакетов данных, задержки распространения пакета от источника к получателю, отношения размера пакета с полезными данными к размеру со служебным сообщением.

Multipath Power control Transmission (MPT) [79] – протокол маршрутизации с оптимизацией энергии для многопролетной доставки данных. При установлении пути узел-источник запускает цикл передачи данных в сети по алгоритму затопления и после прохождения пакета определяет множество существующих путей доставки данных конечному получателю. На основе этой информации узел-источник анализирует суммарную протяженность пролетов и необходимую энергию для передачи данных по каждому из путей. Оптимальный путь выбирается на основе компромисса между энергозатратами и задержкой доставки данных конечному получателю.

Протокол Source routing for Underwater Networks (SUN) [80] – динамическая маршрутизация для установления путей передачи данных, отслеживания качественных характеристик этих путей с предоставлением источнику права выбора пути передачи каждого пакета данных. Отличительные черты: использование программного каркаса DESERT с открытым исходным кодом и исполнение программы маршрутизации непосредственно на аппаратной платформе гидроакустического модема технологии S2C.

Протокол Distributed Underwater Clustering Scheme (DUCS) [81] – маршрутизация по распределенной подводной кластерной схеме. В отличие от других протоколов алгоритм затопления для поиска маршрута здесь не используется. Внутри кластера определяются ведущий и ведомые узлы. Выбор ведущего основывается на величине остаточного заряда питающей батареи и совокупной длине путей передачи данных внутри кластера. На этапе установления маршрута обмен служебными пакетами минимален. Отличительная черта протокола состоит в объединении данных на узлах сети для сокращения объема избыточной информации при ее дальнейшем продвижении в сети.

В качестве одной из перспективных альтернатив разрабатывается бионический подход к маршрутизации с локализацией в сети мобильного узла-получателя данных Phero-trail [82].

Из краткого описания разнообразных протоколов трех приведенных выше уровней следует, что к настоящему времени сложилась солидная основа для создания гидроакустических сетей, способных выполнять самые разнообразные задачи. При этом комбинирование множества протоколов разных уровней представляет собой гибкий инструмент для настройки параметров производительности гидроакустической сети.

## Протоколы физического уровня, реализуемые в средствах цифровой гидроакустической связи

Протоколы физического уровня устройства ЦГАС, как правило, используют алгоритмы формирования и обработки сигнала, не подлежащие изменению со стороны пользователя. Обычно алгоритмы физического уровня направлены на достижение компромисса между скоростью и надежностью передачи данных. Например, некогерентные методы формирования и обработки сигнала [83–88] обеспечивают высокую вероятность доставки данных получателю, т.е. низкую вероятность битовой ошибки, но невысокую скорость передачи данных (порядка сотен бит в секунду). Наоборот, когерентные методы формирования и обработки сигнала [16–32, 35–40] характеризуются высокой вероятностью битовой ошибки, но сравнительно высокой скоростью передачи данных (от единиц до десятков килобит в секунду). Первые способны обеспечивать цифровую связь в условиях быстрой изменчивости характеристик принимаемого сигнала (доплеровских искажений – частотных сдвигов и доплеровского расширения спектра), вторые – цифровую связь в условиях многолучевого рассеивания сигнала, приводящего к замираниям и межсимвольной интерференции, но не допускают большой изменчивости условий приема сигнала (хорошо работают в медленно меняющихся условиях). Альтернативные – гибридные (полукогерентные) – методы формирования и обработки сигнала [89–94] способны обеспечивать как сравнительно низкую вероятность битовой ошибки, так и сравнительно высокую скорость передачи данных (высокую эффективность использования сильно ограниченной полосы частот гидроакустического сигнала).

В любом случае, способы и алгоритмы формирования и обработки сигнала (реализованные в виде протоколов физического уровня) лежат в основе создания устройства ЦГАС. Каждый алгоритм появляется в результате исследований особенностей гидроакустической среды распространения сигнала. С учетом таких результатов промышленный производитель устройств ЦГАС создает новаторские технологии, реализуя один или несколько методов, а также выполняет настройку устройств для работы в определенных (известных) условиях гидроакустической среды или закладывает возможности для работы в неизвестных условиях (широком диапазоне условий) среды. От работоспособности алгоритма физического уровня зависит успешное функционирование и производительность всей системы. В связи с этим реализованные методы физического уровня поставляются в составе устройств ЦГАС в виде законченных и закрытых решений (исходный код программы пользователю не предоставляется). Пользователю предоставляется лишь возможность выбора модели устройства, реализующего тот или иной алгоритм формирования, обработки и помехозащенности сигнала, а также выбора параметров работы устройства.

При этом область применения устройств ЦГАС, содержащих только лишь алгоритмы физического уровня, ограничивается передачей данных в соединении «точка–точка» в зоне их взаимного покрытия (peer-to-peer, или p2p), например в пределах одной зоны гидроакустической освещенности. Работа множества таких устройств в зоне взаимного покрытия не обеспечивается.

### *Методы управления доступом к среде распространения гидроакустического сигнала*

Для работы множества устройств в одной зоне покрытия требуются методы управления доступом к среде, обеспечивающие разрешение коллизий между па-

кетами данных. Вместе с тем, реализуя эти методы, производители устройств ЦГАС обычно предоставляют пользователю лишь самые простые (базовые) возможности и соответствующий интерфейс, чтобы он самостоятельно формировал собственные специализированные алгоритмы управления доступом к среде.

Обычно это объясняется тем, что существует большое количество разнородных задач, каждая из которых требует создания специализированной разновидности того или иного протокола управления доступом к среде. Например, для осуществления множественного доступа к среде распространения могут быть желательными определенный порядок или приоритет обмена данными, или обеспечение очередности распространения потоков данных. В телеметрических задачах при передаче (контрольной) сенсорной информации квитирование доставки может не требоваться, т.е. получателя интересует лишь поступление самых свежих пакетов данных. Вместе с тем в случае необходимости повторной доставки пакета данных, если он поступил поврежденным, квитирование все-таки будет нужно. В частности, речь идет о ситуации, когда данные большого размера сжимаются и разбиваются на пакеты и на стороне получателя из-за повреждения одного пакета становится невозможным декомпримирование всей совокупности принятых данных.

В задачах управления при передаче управляющих воздействий явная передача квитанции, возможно, не понадобится. Так, при дистанционном управлении вентилем подводного трубопровода результат видим и без квитанции. Передача управляющих воздействий или команд может все же требовать явной доставки квитанции, в частности при изменении миссии АНПА оператору следует посредством квитирования убедиться в том, что АНПА принял к сведению команду и приступил к ее исполнению.

Следует, однако, отметить, что, имея в распоряжении лишь самые простые (базовые) возможности создать самостоятельно алгоритмы управления доступом к среде, пользователь часто сталкивается с необходимостью вложить значительные материальные средства на создание дополнительного аппаратного обеспечения и оплату труда высококвалифицированного специалиста. Это приводит к серьезным ограничениям круга организаций, участвующих в развитии подводных технологий, все чаще требуя широкой информационно-коммуникационной поддержки под водой, основанной на использовании множества одновременно действующих устройств ЦГАС в одной зоне покрытия.

Для преодоления ограничений в применении множества устройств ЦГАС в последние годы все большее распространение получает разработка целого ряда (стека) протоколов управления доступом к среде, которые не требуют от пользователя серьезных затрат и предоставляют возможность выбора из состава такого стека наиболее подходящих протоколов и их настройки под требования текущей задачи. В частности, ряд существующих средств ЦГАС [95, 96] были дополнены стеком протоколов управления доступом к среде и размещены непосредственно на аппаратной платформе гидроакустического модема. Этот подход не требует от пользователя создания дополнительного аппаратного обеспечения. Обширный командный интерфейс позволяет пользователю получить доступ к соответствующей области аппаратной платформы гидроакустического модема для настройки и использования функциональных возможностей размещенного на ней стека протоколов. Чтобы быстро и с наименьшими затратами создать собственные приложения, пользователь также может получить доступ к так называемому «sandbox» [97] – вычислительному ресурсу на аппаратно-программной платформе гидроакустического модема с предустановленным программным обеспечением и большим пространством памяти.

Для работы множества устройств в сетевом исполнении в условиях мерцающих зон покрытия необходимо использование специализированных сетевых протоколов – протоколов уровня сетевого коммутатора (сетевого уровня). При этом для реализации собственных протоколов сетевого уровня промышленные производители устройств ЦГАС обычно тоже предоставляют пользователю лишь очень ограниченные возможности. Объясняется это тем же: универсального протокола, пригодного для работы в произвольных условиях с произвольной гидроакустической сетью, не существует; разнородные пользовательские задачи предъявляют к сетевым протоколам большой набор существенно различающихся требований. Так, в динамических задачах предполагается постоянное изменение топологии сети, что требует непрестанного обновления маршрута доставки данных. В одних статических задачах может требоваться доставка данных по самому быстрому пути, в других – по самому экономичному (например, с точки зрения энергопотребления). Различные требования обуславливают разную логику продвижения данных в сети и, соответственно, реализации разных сетевых протоколов. В последнее время предметом множества исследований является важная в ЦГАС ad-hoc-сеть [68] (динамическая, самоорганизующаяся) – децентрализованная сеть, не имеющая постоянной структуры. Задача клиентского устройства – соединяться «на лету». Каждый узел такой сети должен быть способен пересыпать данные, предназначенные другим узлам. При этом определение того, какому узлу пересыпать данные, должно производиться динамически, на основе связности сети. В дополнение к сказанному разные типы задач могут требовать оптимизации/ограничения размера служебной информации, в частности заголовков, сопровождающих передачу полезных данных по гидроакустическому каналу.

В настоящее время не существует какой-либо универсальной реализации сетевого протокола, отвечающего множеству разнородных требований. Тем не менее, как и в случае с управлением доступом к среде, пользователь вынужден самостоятельно создавать собственные специализированные сетевые алгоритмы, что влечет за собой большие материальные затраты.

Для преодоления ограничений применения ЦГАС в разнородных задачах, а также для гибкого и экономичного решения прикладной задачи пользователя в дополнение к протоколам управления доступом к среде ЦГАС гидроакустические модемы могут дополняться многослойным стеком сетевых протоколов, размещенным непосредственно на аппаратной платформе [95, 96].

### *Протоколы транспортного уровня*

Для построения гидроакустических сетей на практике используются методы транспортного уровня доставки данных. При реализации протоколов транспортного уровня промышленные производители обычно не оснащают устройства ЦГАС какими-либо специализированными возможностями. Пользователь вынужден самостоятельно разрабатывать и реализовывать протоколы этого уровня. В подводных приложениях их наличие необходимо для решения сравнительно небольшого, но весьма важного круга задач, а именно обмена данными:

- с периодически доступным радиогидроакустическим сегментом сети на поверхности воды и/или между изолированными сегментами подводной гидроакустической сети (задачи типа Data Muling);
- между ячейками mesh-сетей;

- по сети, допускающей длительные задержки и разрывы соединений между узлами сети на маршруте обмена (задачи типа Delay/Disruption Tolerant Network – DNT) с конечным (достаточно большим) или бесконечным «сроком годности» передаваемых данных.

В качестве примера реализации протоколов транспортного уровня можно назвать ЦГАС технологии S2C, в состав программного каркаса EviNS которой включен протокол транспортного уровня типа DTN. Реализация этого протокола основана на использовании хорошо развитого программного конструктива DTN2 [98, 99], распространяемого также в виде программного обеспечения с открытым программным кодом и построенного на основе каркасного подхода. За счет возможности расширения программного каркаса комбинации протоколов программного конструктива DTN2 интегрированы с программным каркасом EviNS через конвергентные гнезда этого конструктива.

Вообще применение технологии программного каркаса, объединяющего множество разработанных протоколов и вспомогательных компонентов, является мощным средством расширения программного обеспечения гидроакустического модема и превращения его в многофункциональное и многоуровневое сетевое устройство. Создание такого каркаса также служит цели облегчения дальнейшего развития СПС.

Примером такого подхода является программный каркас EviNS [96], в котором каждая из программ, реализующая определенный протокол, может состоять из двух частей: первая, постоянная, часть – каркасная, не изменяющаяся от конфигурации к конфигурации, но несущая в себе гнезда, где размещается вторая, переменная, часть – сменные модули (или точки расширения).

Для решения специализированных пользовательских задач и подготовки соответствующих приложений EviNS выполнен в виде открытого исходного программного кода, поставляемого через электронный ресурс Github [95]. В отношении исходного кода действует открытая общедоступная лицензия GPL/MIT.

Благодаря этому пользователь способен как выбирать подходящий существующий протокол или комбинацию таких протоколов и настраивать их на решение собственной задачи, так и надстраивать, модифицировать и расширять уже существующие или создавать и размещать для исполнения (непосредственно на аппаратной платформе гидроакустического модема) собственные дополнительные протоколы. При этом разработка специализированных приложений, их тестирование и практическое использование могут осуществляться также прямо на аппаратно-программной платформе гидроакустического модема в модуле «sandbox» и параллельно с этим на платформе лабораторного эмулятора гидроакустического модема [97]. Эта плаформа представляет собой программный сервис, доступный через Интернет, а физически – внешний процессорный модуль или удаленный компьютер с программным обеспечением, идентичным тому, что используется гидроакустическим модемом.

Благодаря каркасному построению создание самых разнообразных пользовательских гидроакустических сетей путем комбинирования уже имплементированных в EviNS протоколов разных уровней (с возможностью пользовательской настройки параметров производительности сети) является задачей, которая может решаться небольшим коллективом пользователей за короткое время.

В то же время следует отметить, что вариант решения проблем СПС, основанный на широком применении специализированного программного каркаса, не является единственным и исчерпывающим и может дополняться и комбинироваться с другими решениями.

## Структура гидроакустического модема, обеспечивающего сетевую подводную связь

Гидроакустические модемы являются необходимым атрибутом гидроакустической связи вообще и сетевой подводной связи в частности. Первоначально сравнительно простые аналоговые устройства, сейчас они представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы, которые служат средством реализации описанных выше методов СПС.

Модем есть у каждого абонента СПС, при этом в одной сети, как правило, абоненты оборудуются однотипными модемами, которые попеременно передают и принимают сообщения.

Несмотря на различия, модемы, выпускаемые разными производителями, имеют однотипную структуру. В качестве примера рассмотрим модем компании Evologics, реализующий технологию частотной развертки несущей (Sweep-Spread Carrier – S2C) [100]. Укрупненная структурная схема этого модема приведена на рис. 6.

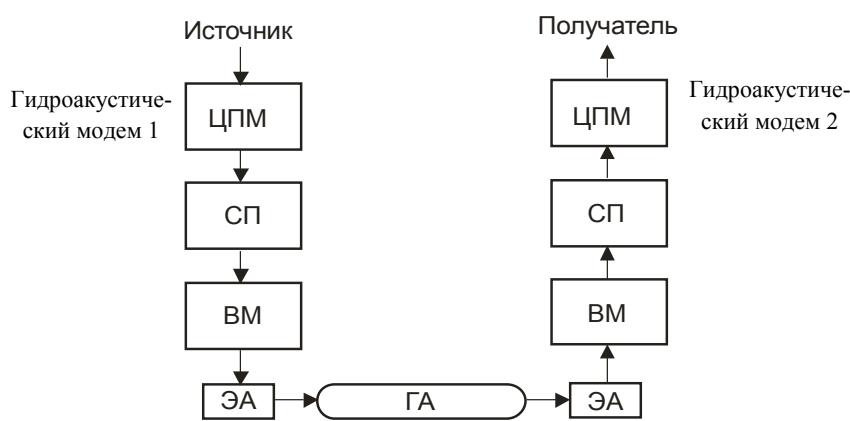


Рис. 6. Укрупненная структурная схема двух гидроакустических модемов, связанных средой распространения сигнала.

ЭА – электроакустический тракт, ВМ – процессор вентильной матрицы, СП – цифровой сигнальный процессор, ЦПМ – центральный процессорный модуль, ГА – гидроакустический канал

Модем имеет аналоговую и цифровую части, каждая из которых состоит из трех модулей. Аналоговая часть представлена электроакустическим трактом (ЭА), содержащим усилитель мощности (включаемый при излучении сигналов), предусилитель (включаемый при приеме сигналов) и приемоизлучатель, работающий в широкой полосе частот.

Цифровая часть устройства состоит из процессора вентильной матрицы (ВМ), цифрового сигнального процессора (СП) и центрального процессорного модуля (ЦПМ). Такая архитектура обусловлена логическим разделением задач, решаемых каждым уровнем, а также целесообразностью использования соответствующих процессоров для их решения.

Цифровой СП в комбинации с процессором ВМ реализуют функции физического уровня, а ЦПМ – функции канального уровня.

Процессоры, которые используются для аппаратной реализации каждого из структурных элементов модема, непрерывно совершенствуются. Примерно раз в два года происходят существенные изменения в архитектуре и производительности встраиваемых процессоров. В соответствии с этим происходит усовершенствование

ствование модемов (изменяются габариты, параметры потребления энергии, вычислительная производительность). Тем не менее не все новшества из области встраиваемых процессоров используются при создании новых версий модемов. Причина состоит в том, что высокопроизводительные процессоры характеризуются высоким потреблением энергии. Это обуславливает уменьшение периода автономности модема или необходимость увеличения емкости питающей батареи (а значит, веса, габаритов и стоимости как ее самой, так и ее корпуса).

На практике для изготовления промышленного модема выбираются процессоры с минимально необходимой производительностью для решаемой задачи (с небольшим запасом), что позволяет производить экономичные, малопотребляющие и малогабаритные устройства.

### **Пути повышения радиуса действия СПС при одновременном повышении скорости обмена данными**

Увеличение радиуса действия гидроакустического модема влечет за собой необходимость снижения рабочей частоты и, соответственно, уменьшения доступной полосы частот. По этой причине расширение радиуса действия СПС при одновременном повышении скорости обмена (или хотя бы сохранения скорости обмена на достаточном уровне) возможно лишь за счет увеличения числа гидроакустических модемов (узлов гидроакустических сетей), образующих СПС и работающих на сравнительно высоких частотах.

Следует иметь в виду, что СПС с большим числом узлов увеличивает покрытие, однако автоматически не приводит к увеличению пропускной способности СПС.

С целью повышения скорости обмена данными СПС могут быть предприняты специальные меры, такие как организация сотовой структуры СПС. В этом случае, по всей вероятности, потребуются наборы протоколов доступа к гидроакустической среде, которые будут различаться по назначению – для обмена данными внутри одной соты или между отдельными сотами сети.

Поскольку сотовая структура сети позволяет вести обмен данными в нескольких (или даже всех) сотах одновременно, общая пропускная способность СПС должна возрасти.

Кроме того, в составе СПС сотовой структуры на различных по нагрузке участках могут быть предусмотрены разные протоколы обмена данными, в наибольшей степени отвечающие нагрузке соответствующего участка. Например, при обмене небольшим количеством данных внутри одной соты может быть предусмотрена комбинация протоколов CSMA-Aloha + SNCF, а при обмене сравнительно большими объемами между сотами (например, сенсорными данными, накопленными в отдельных сотах) может использоваться протокол реальной сети, образуемой последовательностью p2p-соединений. Стандартных протоколов для СПС, основанной на организации последовательности p2p, пока не существует. Для осуществления такой возможности может понадобиться разработка двух модификаций протоколов, способных определять параметры связности СПС и осуществлять поиск маршрутов и устанавливать оптимальные маршруты для передачи данных относительно больших объемов. Оптимальность маршрута определяется по нескольким критериям оптимизации, например по минимальной задержке передачи данных, минимальному потреблению энергии или максимальной скрытности сеанса связи. Поскольку p2p-соединения способны оперативно учитывать характеристики гидроакустического канала

связи и устанавливать скорости передачи данных, максимально возможные для текущих условий связи, общая пропускная способность СПС сотовой структуры будет также возрастать.

Дополнительной возможностью является использование гидроакустических модемов различных частотных диапазонов для осуществления разных задач сетевой связи, в частности более высокочастотных модемов для обмена данными внутри одной соты и более низкочастотных – для обмена данными между разными сотами. Одновременная передача данных в двух частотных диапазонах сможет обеспечить дальнейшим рост пропускной способности сети.

### **Пути уменьшения габаритов и энергопотребления сетевого оборудования**

Эффективный способ уменьшить габариты и энергопотребление сетевого оборудования – максимальная аппаратная и программная интеграция его модулей. С этой целью необходимо создать аппаратно-программную платформу, способную выполнять множество функций, связанных непосредственно с гидроакустическим модемом, протоколами управления доступом к среде и протоколами маршрутизации, а также со специализированными пользовательскими приложениями и драйверами дополнительного (интегрируемого) оборудования.

Разновидностями программных средств, предоставляющих пользователю возможность создания, размещения и эксплуатации собственных приложений, являются разработанные в последнее десятилетие специализированные программные каркасы и конструктивы с открытым программным кодом и архитектурой, например SUNSET [101] и DESERT [102], содержащие наборы сетевых протоколов для СПС. Вместе с тем упомянутые программные каркасы требуют наличия высокопроизводительного процессорного модуля и, соответственно, значительного энергопотребления, что затрудняет их применение в качестве составной части программного обеспечения СПС, предназначеннной для продолжительного автономного функционирования сети.

Альтернативным вариантом служит рассмотренный выше программный каркас EviNS [96], не требующий высокопроизводительного процессора и способный работать прямо на аппаратной платформе гидроакустического модема. EviNS не только упрощает пользователю задачу по созданию кастомизированной гидроакустической сети, но и позволяет избавиться от необходимости разработки и включения в состав сетевого узла промежуточного аппаратного обеспечения, в частности вспомогательного процессорного модуля для интеграции сенсоров и гидроакустического модема. Если программные каркасы SUNSET [101] и DESERT [102] требуют наличия высокопроизводительного процессорного модуля, поэтому размещаются в отдельном герметичном корпусе и оснащаются батареей высокой емкости, подводными специализированными разъемами и кабелями для подключения к гидроакустическому модему, то при использовании EviNS во всем этом нет необходимости, кроме того, программный каркас позволяет реализовывать различные сетевые протоколы и пользовательские приложения, а также интегрировать дополнительное оборудование.

Создание такой аппаратно-программной платформы дало возможность уменьшить стоимость и весогабаритные характеристики узлов гидроакустической сети, что, в свою очередь, привело к снижению требований к тоннажности и оснащению плавсредств, периодически обслуживающих сети, и за счет этого – к сокращению текущих эксплуатационных расходов на содержание инфраструктуры.

Особенность подобного каркаса заключается также в низком пороге входления пользователя в процесс создания пользовательских приложений. Например, для создания пользовательского приложения нет необходимости привлечения высококвалифицированных программистов встраиваемых систем. Важен и бесплатный доступ к программному каркасу. Все это также способствует снижению стоимости производимого сетевого оборудования.

### **Использование подводной оптической связи для повышения скорости обмена данными**

Известно, что гидроакустическая связь имеет жесткие физические ограничения по скорости передачи информации, обусловленные относительно узкой полосой частот связных сигналов. Эти ограничения тем жестче, чем больше расстояние между корреспондентами. Согласно К.Е. Шенону [103], потенциальная удельная (приведенная к полосе частот 1 Гц) скорость передачи данных при отношении «сигнал–помеха» 10 дБ на выходе линейной части приемного тракта составляет 3,5 бит/с/Гц. В гидроакустической связи с учетом ее физических ограничений реально достижимая удельная скорость передачи данных лежит в пределах 0,01...0,3 бит/с/Гц. Учитывая, что рабочая полоса частот звуко-подводной связи в зависимости от несущей частоты составляет 1...30 кГц, можно сделать вывод, что реальная скорость передачи данных по гидроакустическому каналу не превышает 10 Кбит/с.

Указанная скорость не позволяет решить такие актуальные задачи подводной робототехники, как:

- оперативная передача больших массивов сенсорных данных (в частности, передача массива данных размером 1 мегабит может занять несколько минут);
- реально-временная передача видеоизображения с АНПА, обследующего дно, на борт судна управления (в частности, передача записанных коротких фрагментов видео может занимать несколько минут).

Для повышения оперативности передачи данных скорость должна быть увеличена как минимум на порядок.

Одним из путей достижения этой цели является применение подводной оптической связи, которая за счет использования широкой полосы частот позволяет обеспечить высокую скорость передачи данных, что, однако, сопровождается рядом существенных физических ограничений. Основным из них является ограниченная дистанция передачи данных, которая зависит как от физических факторов (главным образом от прозрачности воды), так и от характеристик применяемой аппаратуры. В настоящее время экспериментально подтвержденная дальность надежной передачи данных по гидрооптическому каналу между двумя АНПА типа MEDUSA составляет 10...15 м при скорости 20...200 Кбит/с [104, 105]. Вместе с тем в ряде исследований (например, в [106]) утверждается, что при применении специальных технических решений дальность гидрооптической связи можно повысить до 100 м, а скорость передачи данных довести до Мбит/с и даже до Гбит/с.

Еще одним ограничением является узкий сектор углов, в котором осуществляются передача и прием оптического сигнала, что влечет за собой необходимость точного взаимного позиционирования подводных корреспондентов.

Поскольку направление гидрооптической связи в настоящее время бурно развивается, можно прогнозировать, что АНПА в недалеком будущем будут оснащены аппаратурой подводной комбинированной (акустооптической) связи.

## Заключение

Цифровая сетевая подводная связь является необходимым инструментом исследования и освоения океана. Ее основное отличие от традиционной гидроакустической связи состоит в одновременном информационном взаимодействии большого числа пространственно разнесенных абонентов. Этот факт добавляет к проблемам традиционной гидроакустической связи, связанным в основном со сложностью и постоянной изменчивостью гидроакустического канала распространения сигнала, ряд существенных проблем:

- коллизии в сети, возникающие при одновременной передаче сообщений несколькими абонентами и требующие принятия специальных организационно-технических мер по их устранению (минимизации);
- обусловленная особенностями гидроакустической среды сложная конфигурация зон парной взаимной слышимости абонентов, что ведет к необходимости нетривиальной маршрутизации потоков данных от источника к получателю.

Решение перечисленных проблем заключается в разработке методов формирования и излучения сигналов связи, которые затем становятся протоколами взаимодействия абонентов при передаче и приеме сообщений и реализуются в цифровых гидроакустических модемах, которые, в свою очередь, превращаются в сложные радиоэлектронные устройства.

В работе сформулированы проблемы цифровой сетевой подводной связи и приведен обзор путей их решения, многие из которых уже сейчас успешно реализуются на практике.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00324).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с. (Ageev, M.D., Kiselev, L.V., Matvienko, Yu.V. et al., *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tehnologii (Underwater Autonomous Robots. Systems and Technologies)*, Moscow: Nauka, 2005.)
2. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2(4). С. 5–14. (Inzartsev, A.V., Kamornyi, A.V., L'vov, O.Yu., Matvienko, Yu.V., and Rylov, N.I., *Using autonomous unmanned vehicles for Scientific Research in the Arctic, Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2007, no. 2, pp. 5–14.)
3. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. №1 (7). С. 4–13. (Gizitdinova, M.R. and Kuz'mitskii, M.A., *Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics, Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 4–13.)
4. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №1. С.4–68. (Bozhenov, Yu.A., *Use of the autonomous underwater vehicles for the Arctic and Antarctic regions exploration, Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 4–68.)
5. Millar, G., Mackay, L., Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35–38.
6. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с. (Illarionov, G.Yu., Sidenko, K.S., and Bocharov, L.Yu., *Ugroza iz glubiny: XXI vek (Threat from the Depth: 21st Century)*, Khabarovsk: KGUP Khabarovskaya kraevaya tipografiya, 2011.)
7. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. №5. С. 79–88. (Belousov, I., *Modern and future unmanned autonomous vehicles in the US navy, Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 5, pp. 79–88.)

8. **Al-Khatib, H., Antonelli, G., Caffaz, A., Caiti, A., Casalino, G., de Jong, I.B., Duarte, H., Indiveri, G., Jesus, S., Kebkal, K.**, The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: an overview, *OCEANS 2015*, IEEE, 2015, Genova.
9. **Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.** Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетевентрических войн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 3. С. 49-64. (Kovalenko, V.V., Korchak, V.Yu., and Chulkov, V.L., *Concepts and key technologies of underwater surveillance systems in network-centric warfare, Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 49–64.)
10. **Пешехонов В.Г., Брага Ю.А., Машошин А.И.** Сетевентрический подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. С. 219–227. (Peshkhonov, V.G., Braga, Yu.A., and Mashoshin, A.I., *Network-centric approach to solving the underwater surveillance problem in the Arctic, Izvestiya UFU. Tehnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 219–227.)
11. **Машошин А.И., Скобелев П.О.** Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. №1 (174). С. 45–59. (Mashoshin, A.I., and Skobelev, P.O., *Application of multiagent technology for managing a group of unmanned underwater vehicles, Izvestiya UFU. Tehnicheskie nauki*, 2016, no. 1, pp. 45–59.)
12. **Кебкал К.Г., Машошин А.И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирокопия и навигация. 2016. Т. 24. №3 (94). С. 115–130. (Kebkal, K.G. and Mashoshin, A.I., *AUV acoustic positioning methods, Gyroscopy and navigation*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 80–89.)
13. **Kilfoyle, D.B., Baggeroer, A.B.**, The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, vol. 25, no. 1, pp. 4–27.
14. **Domingo, M.C.**, An overview of the internet of underwater things, *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, vol. 35, no. 6, pp. 1879–1890.
15. **Song, H.C., Kuperman, W.A., Hodgkiss, W.S.**, Basin-scale time reversal communications, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, vol. 125, pp. 212–217.
16. **Homer, J., Mareels, I., Bitmead, R.R., Wahlberg, B., Gustafsson, F.**, LMS estimation via structural detection, *IEEE Trans. Signal Processing*, 1998, vol. 46, pp. 2651–2663.
17. **Lopez, M.J., Singer, A.C.**, A DFE coefficient placement algorithm for sparse reverberant channels, *IEEE Transaction in Communications*, 2001, vol. 49, issue 8, pp. 1334–1338.
18. **Roy, S., Duman, T.M., McDonald, V.**, Error Rate Improvement in Underwater MIMO Communications Using Sparse Partial Response Equalization, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2006.
19. **Stojanovic, M., Freitag, L., Johnson, M.**, Channel-Estimation-Based Adaptive Equalization of Underwater Acoustic Signals, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1999, Seattle, WA.
20. **Weichang, L., Preisig, J.C.**, Estimation of Rapidly Time-Varying Sparse Channels, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2007, vol. 32, no. 4, pp. 927–939.
21. **Sozer, E.M., Proakis, J.G., Blackmon, F.**, Iterative equalization and decoding techniques for shallow water acoustic channels, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2001, vol. 4, pp. 2191–2208.
22. **Capellano, V.**, Performance improvements of a 50 km acoustic transmission through adaptive equalization and spatial diversity, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1997, vol. 1, pp. 569–573.
23. **Roy, S.**, Space-Time Coding for Frequency Selective Fading Channels with Underwater Acoustic Communication Applications. Ph.D dissertation, Dept. Electrical Engineering, Arizona State University, 2006.
24. **Douillard, C., Jezequell, M., Berrou, C., Pricart, A., Didier, P., Glavieux, A.**, Iterative Correction of Intersymbol Interference: Turbo-Equalization, *European Transactions on Telecommunications*, 1995, vol. 6, no. 5, pp. 507–511.
25. **Mani, S., Duman, T.M., Hurski, P.**, Adaptive Coding/Modulation for Shallow-Water, *Proc. 9<sup>th</sup> European Conference on underwater acoustics*, 2008, Paris, France, vol. 2, pp. 471–476.
26. **Blackmon, F., Sozer E., Proakis J.**, Iterative equalization, decoding, and soft diversity combining for underwater acoustic channels, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2002, vol. 4, pp. 2425–2428.
27. **Mani, S.**, Adaptive Modulation Techniques for Underwater Acoustic Channels, M.S.Thesis, Dept. Electrical Engineering, Arizona State University, 2008.
28. **Zhang, Z., Duman, T.M., Kurtas, E.M.**, Achievable Information Rates and Coding for MIMO Systems Over ISI Channels and Frequency-Selective Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 2004, vol. 52, no. 10, pp. 1698–1710.
29. **Shental, O., Shental, N., Shamai, S.**, On the achievable information rates of two-dimensional channels with memory, *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, 2005, Adelaide, Australia.
30. **Rice, J., McDonald, V.**, Adaptive Modulation for Undersea Acoustic Telemetry, *Sea Technology*, 1999, May.

31. **Benson, A., Proakis, J., Stojanovic, M.**, Towards Robust Adaptive Acoustic Communications, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2000, vol. 2, pp. 1243–1249.
32. **Kilfoyle, D.B., Preisig, J.C., Baggeroer, A.B.**, Spatial modulation experiments in the underwater acoustic channel, *IEEE J. Ocean Eng.*, 2005, vol. 30, no. 2, pp. 406–415.
33. **Song, H.C., Hodgkiss, W.S., Kuperman, W.A., Stevenson, M., Akal, T.**, Improvement of time reversal communications using adaptive channel equalizers, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 487–496.
34. **Song, H.C., Hodgkiss, W.S., Kuperman, W.A.**, MIMO Time Reversal Communications, *Proc. WuWNet'07*, 2007, Montreal, Quebec, Canada, pp. 5–10.
35. **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 Journal of Oceanic Engineering*, 2007, vol. 32, no. 3, pp. 663–688.
36. **Roy, S., Duman, T.M., Ghazikhani, L., McDonald, V., Proakis, J., Zeidler, J.**, Enhanced underwater acoustic communication performance using space-time coding and processing, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2004, vol. 1, pp. 26–33.
37. **Nordenvaad, M.L., Oberg, T.**, Iterative Reception for Acoustic Underwater MIMO Communications, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2006.
38. **Edelmann, G., Akal, T., Hodgkiss, W.S., Kim, S., Kuperman, W.A., Song, H.**, An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal mirror, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2002, vol. 27, pp. 602–609.
39. **Silva, A., Jesus, S., Gomes, J., Barroso, V.**, Underwater acoustic communications using a virtual electronic time-reversal mirror approach, *Proc. Fifth European Conference on Underwater Acoustics*, 2000, pp. 531–536.
40. **Rouseff, D., Jackson, D., Fox, W., Jones, C., Ritcey, J., Dowling, D.**, Underwater acoustic communications by passive-phase conjugation: Theory and experimental results, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001, vol. 26, pp. 821–831.
41. **Derode, A., Roux, P.**, Robust Acoustic Time Reversal with High-Order Multiple Scattering, *M. Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 75, no 23, p. 4206.
42. **Heidemann, J., Stojanovic, M., Zorzi, M.**, Underwater sensor networks: Applications, advances, and challenges, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, vol. 370, no. 1958, pp. 158–175.
43. **Akyildiz, I.F., Pompili, D., Melodia, T.**, Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 257–279.
44. **Lmai, S., Chitre, M., Laot, C., Houcke, S.**, Throughput-efficient super-TDMA MAC transmission schedules in ad hoc linear underwater acoustic networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, vol. 42, pp. 156–174.
45. **Lmai, S., Chitre, M., Laot, C., Houcke, S.**, Throughput-Maximizing Transmission Schedules for Underwater Acoustic Multi-hop Grid Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, vol. 40, pp. 853–863.
46. **Diamant, R., Lampe, L.**, Spatial Reuse Time-Division Multiple Access for Broadcast Ad Hoc Underwater Acoustic Communication Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 172–185.
47. **Kredo, K., Djukic, P., Mohapatra, P.**, STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol, *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2009.
48. **Chirdchoo, N., Soh, W.S., Chua, K.C.**, MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks, *Proc. of the ACM International Workshop on Underwater Networks*, 2008.
49. **Knappe, S., Shah, V., Schwindt, P.D., Hollberg, L., Kitching, J., Liew, L., Moreland, J.**, A microfabricated atomic clock, *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 9, pp. 1460–1462.
50. **Gardner, T., Collins, J.A.**, Advancements in high-performance timing for long term underwater experiments: A comparison of chip scale atomic clocks to traditional microprocessor-compensated crystal oscillators, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2011.
51. **Kebkal, K.G., Kebkal, O.G., Glushko, E., Kebkal, V.K., Sebastiao, L., Pascoal, A., Gomes, J., Ribeiro, J., Silva, H., Ribeiro, M., Indivry, G.**, Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning, *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE)*, 2017.
52. **Yackoski, J., Shen, C.**, UW-FLASHR: Achieving High Channel Utilization in a Time-based Acoustic MAC Protocol, *Proc. Third ACM International Workshop on Underwater Networks (WuWNet)*, 2008.
53. **Morozs, N., Mitchell, P.D., Zakharov, Y.**, TDA-MAC: TDMA Without Clock Synchronization in Underwater Acoustic Networks, *IEEE Access.*, 2018, vol. 6, pp. 1091–1108.
54. **Morozs, N., Mitchell, P.D., Zakharov, Y., Mourya, R., Petillot, Y.R., Gibney, T., Dragone, M., Sherlock, B., Neasham, J.A., Tsimenidis, C.C., Sayed, M.E., McConnell, A.C., Arauri, S., Stokes, A.A.**, Robust TDA-MAC for Practical Underwater Sensor Network Deployment: Les-

- sons from USMART Sea Trials, *Proc. The Thirteenth ACM International Conference on Underwater Networks and Systems (WUWNet-2018)*, 2018.
- 55. **Morozs, N., Mitchell, P.D., Zakharov, Y.**, Unsyncrhonized dual-hop scheduling for practical data gathering in underwater sensor networks, *Proc. IEEE International Conference on Underwater Communications and Networking (UComms 2018)*, 2018.
  - 56. **Cho, A.-R., Yun, C., Lim, Y.-K., Choi, Y.**, Asymmetric Propagation Delay-aware TDMA MAC protocol for mobile underwater acoustic sensor networks, *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, p. 962.
  - 57. **Bianchi G.** Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, no. 3, pp. 535–547.
  - 58. **Nasipuri, Zhuang, J., Das, S.R.**, A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC-1999)*, 1999, vol. 3, pp. 1402–1406.
  - 59. **Guerra, F., Casari, P., Zorzi, M.**, World ocean simulation system (WOSS): A simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling, *Proc. Fourth ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet'09)*, 2009, New York, NY, USA, pp. 4:1–4:8.
  - 60. **Roberts, L.G.**, ALOHA Packet System With and Without Slots and Capture, *Computer Communications Review*, 1975, vol. 5, no 2, pp. 28–42.
  - 61. **Peleato, B., Stojanovic, M.**, Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Sensor Networks, *IEEE Communication Letters*, 2007, pp. 1025–1027.
  - 62. **Guerra, F., Casari, P., Zorzi, M.**, MAC Protocols for Monitoring and Event Detection in Underwater Networks Employing a FH-BFSK Physical Layer, Acoustic Sensor Networks, *IEEE Comm. Letters*, 2007, vol. 11, no. 12, pp. 1025–1027.
  - 63. **Syed, A.A., Ye, W., Heidemann, J.**, Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks, *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2008, vol. 26, no. 9, pp. 1731–1743.
  - 64. **Chirdchoo, N., Soh, W.-S., Chua, K.C.**, Aloha-Based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks, *Proc. 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2007, Anchorage, Alaska, USA.
  - 65. **Xie, P. et al.**, R-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks, *Proc. International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications*, 2007, Chicago, IL., pp. 187–198.
  - 66. **Molins, M., Stojanovic, M.**, Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2006.
  - 67. **Fullmer, C.L., Garcia-Luna-Aceves, J.J.**, Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for packet-radio networks, *Proc. Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM)*, 1995.
  - 68. **Garcia, M., Sendra, S., Atenas, M., Lloret, J.**, Underwater Wireless Ad-hoc Networks: a Survey. Mobile Ad hoc Networks: Current Status and Future Trends. Chapter: Underwater wireless ad-hoc networks: A survey, CRC Press, Taylor and Francis, 2011.
  - 69. **Rahman, W., Olesinski, Gburzynski, P.**, Controlled flooding in wireless ad-hoc networks, *IEEE International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks*, 2004, pp. 73–78.
  - 70. **Otnes, R., Astarjadhi, A., Casari, P., Goetz, M., Husoy, T., Nissen, I., Rimstad, K., van Walree, P., Zorzi, M.** Underwater Acoustic Networking Techniques, *Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering*, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-25224-2\_1.
  - 71. **Cavin, D., Schiper, A.**, Probabilistic Broadcast for Flooding in Wireless Mobile Ad hoc Networks, *Proc. Conf. Wireless Communications and Networking*, 2003, vol. 2.
  - 72. **Fink M.** Time Reversed Acoustics, *Phys. Today*, 1997, pp. 34–40.
  - 73. **Liang, W., Yu, H., Liu, L., Li, B., Che, C.**, Information-carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network, *Proc. International Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2007, pp. 729–734.
  - 74. **Wahid, A., Dongkyun, K.**, Analyzing Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks, *International J. of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 253–261.
  - 75. **Jornet, J.M., Stojanovic, M., Zorzi, M.**, Focused Beam Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks, *Proc. 3d ACM international workshop on Underwater Networks (WUWNet'08)*, 2008, New York, pp. 75–82.
  - 76. **Ayaz, M., Abdullah, A.**, Hop-by-Hop Dynamic Addressing Based (H2-DAB) Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks, *Proc. International Conf. on Information and Multimedia Technology (ICIMT'09)*, 2009, pp. 436–441.
  - 77. **Basagni, S., Petrioli, C., Petroccia, R., Spaccini, D.**, Channel-aware routing for underwater wireless networks, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2012, pp. 1–9.

78. **Rahman, R.H., Benson, C., Jiang, F., Frater, M.**, LOARP: A Low Overhead Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks, *J. of Networks*, 2013, vol 8, no. 2, pp. 317–330.
79. **Zhou, Z., Peng, Z., Cui, J.H., Shi, Z.**, Efficient Multipath Communication for Time-Critical Applications in Underwater Acoustic Sensor Networks, *IEEE ACM Trans. on Networking*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 28–41.
80. **Toso, G., Masiero, R., Casari, P., Kebkal, O., Komar, M., Zorzi, M.**, Field experiments for Dynamic Source Routing: S2C EvoLogics modems run the SUN protocol using the DESERT Underwater libraries, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2012, pp. 1–10.
81. **Domingo, M.C., Prior, R.**, A Distributed Clustering Scheme for Underwater Wireless Sensor Networks, *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007, pp. 1–5.
82. **Vieira, L.F.M., Lee, U., Gerla, M.**, Phero-trail: a bio-inspired location service for mobile underwater sensor networks, *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2010, vol. 28, no. 4, pp. 553–563.
83. **Baggeroer, A., Koelsch, D.E., Heydt, K., Catipovic, J.**, DATS – a Digital Acoustic Telemetry System for Underwater Communications, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1981, pp. 55–60.
84. **Coates, R.F.W.**, A deep-ocean penetrator telemetry system, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1988, vol. 13, pp. 55–63.
85. **Catipovic, J., Baggeroer, A.B., Von Der Heydt, K., Koelsch, D.**, Design and performance analysis of a digital acoustic telemetry system for the short range underwater channel, *IEEE J. Ocean. Eng.*, Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Center, 1984, vol. OE-9, pp. 242–252.
86. **Freitag, L.E., Merriam, J.S., Frye, D.E., Catipovic, J.A.**, A Long-term Deepwater Acoustic Telemetry Experiment, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1991, pp. 254–260.
87. **Mackelburg, G.R.**, Acoustic data links for UUVs, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1991, pp. 1400–1406.
88. **Scussel, K.F., Rice, J.A., Merriam, S.**, A new MFSK acoustic modem for operation in adverse underwater channels, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1997.
89. **Howe, G.S., Hinton O.R., Adams, A.E., Holt, A.G.J.**, Acoustic burst transmission of high rate data through shallow underwater channels, *Electronics Letters*, Stevenage, UK: Michael Faraday House, 1992, vol. 28, no. 5, pp. 449–451.
90. **Suzuki, M., Sasaki, T., Tsuchiya, T.**, Digital acoustic image transmission system for deep-sea research submersible, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1992, pp. 567–570.
91. **Jones, J.C., DiMeglio, A., Wang, L.S., Coates, R.F.W., Tedeschi, A., Stoner, R.J.**, The design and testing of a DSP, half-duplex, vertical DPSK communication link, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 1997, vol. 1, pp. 259–266.
92. **Colavolpe, G., Raheli, R.**, Noncoherent sequence detection, *IEEE Trans. On Commun. Syst.*, Piscataway, NJ, USA: IEEE Communications Society, 1999, vol. 47, no. 9, pp. 1376–1385.
93. **Schober, R., Gerstacker, W.H., Huber, J.B.**, Adaptive linear equalization combined with noncoherent detection for MDPSK signals, *IEEE Trans. on Commun. Syst.*, Piscataway, NJ, USA: IEEE Communications Society, 2000, vol. 48, no. 5, pp. 733–738.
94. **Stojanovic, M.**, An Adaptive Algorithm for Differentially Coherent Detection in the Presence of Intersymbol Interference, *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Center, 2005, vol. 23, no. 9, pp. 1884–1890.
95. **EviNS Framework**, Internet resource: <https://github.com/okebkal/evins.git>.
96. **Kebkal, O.G., Kebkal, V.K., Kebkal, K.G.**, EviNS: Framework for development of underwater acoustic sensor networks and positioning systems, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2015.
97. **Kebkal, O.G., Kebkal, K.G., Komar, M.**, Development of upper-layer protocols with S2CR acoustic modems emulator, *Proc. Conf. on Underwater Communications: Channel Modelling and Validation (UCOMMS)*, 2012, Sestri Levante, Italy.
98. **DTN2** manual page, 2015 (<http://dtn.sourceforge.net/DTN2/doc/manual>).
99. Delay-Tolerant Networking Research Group (DTNRG) (<https://sites.google.com/site/dtnresgroup/home>).
100. **Kebkal, K.G., Bannasch, R.**, Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation, *J. Acoustical Society of America*, 2002, vol. 112, no. 5, Pt 1, pp. 2043–2053.
101. **Petrioli, C., Petroccia, R., Potter, J.**, Performance evaluation of underwater MAC protocols: From simulation to at-sea testing, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2011.
102. **Masiero, R., Azad, S., Favaro, F., Petrani, M., Toso, G., Guerra, F., Casari, P., Zorzi, M.**, DESERT Underwater: an NSMiraclebased framework to DЕsign, Simulate, Emulate and Realize Testbeds for Underwater network protocols, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2012.
103. **Shannon, C.E.** Communication in the presence of noise, *Proc. IRE*, 1949.
104. **Kebkal, K.G., Kebkal, O.G., Glushko, E., Kebkal, V.K., Sebastiao, L., Pascoal, A., Gomes, J., Ribeiro, J., Silva, H., M.Ribeiro, M., Indivery, G.**, Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning, *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE)*, 2017.

105. Góis, P., Sreekantaswamy, N., Basavaraju, N., Rufino, M., Sebastião, L., Botelho, J., Gomes, J., Pascoal, A., Development and validation of Blue Ray, an optical modem for the MEDUSA class AUVs, *Proc. 3rd Underwater Communications and Networking Conference (UCOMMS'16)*, Lerici, Italy, 2016.
  106. Fair, N., Chave, A., Freitag, L., Preisig, J., White, S., Yoerger, D., Sonnichsen, F., Optical modem technology for seafloor observatories, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2006, pp. 1–6.
  107. Sozer, E.M., Stojanovic, M., Proakis, J.G., Underwater acoustic networks, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2000, vol. 25, no. 1, pp. 72–83.
  108. Pompili, D., Melodia, T., Akyildiz, I.F., A CDMA-based medium access control for underwater acoustic sensor networks, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2009, vol. 8, no. 4, pp. 1899–1909.
  109. Li, B., et al., MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications, *IEEE J. Ocean Eng.*, 2009, vol. 34, no. 4, pp. 634–644.
  110. Kebkal, K., Mashoshin, A., Yakovlev, S., Kebkal, O., Kebkal, V., Phase Estimation Error of a PSK Underwater Acoustic Signal in Presence of Multipath and Volume Scattering, *Proceedings of 4<sup>th</sup> underwater communications networking conference (UComms'18)*, 28–30 August, 2018, Lerici, Italy.
- 

**Kebkal, K.G.** (Evologies GmbH, Berlin, Germany), **Mashoshin, A.I.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia), **and Morozs, N.V.** (University of York, York, UK)  
Solutions for Underwater Communication and Positioning Network Development, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 106–135.

**Abstract.** The paper addresses the main problems related to the development of underwater communication network which differs from the traditional underwater acoustic communication in simultaneous information interoperability of a large number of spatially separated nodes, including data exchange between them, as well as their high-precision positioning. While the problems of traditional acoustic communication are generally associated with the complexity and variability of acoustic channel for signal propagation, the underwater communication network faces a number of additional significant problems such as collisions in the network, occurring during simultaneous transmission of messages from several nodes and requiring special managerial and engineering measures for their elimination (mitigation); another problem is complex configuration of the zones of binary mutual “audibility” of nodes, caused by specific features of underwater acoustic environment and requiring the nontrivial routing of data flows from source to recipient. It is demonstrated in the paper that these problems can be solved by developing the techniques of communication signals generation and emission, which then form the protocols of nodes’ interaction during transmission and receipt of messages, and are implemented in digital acoustic modems that have ultimately developed into complex radio-electronic devices.

**Key words:** underwater unmanned autonomous vehicle, underwater communication network, underwater acoustic modem.

Материал поступил 31.12.2018