Сопряжение подводных автоматизированных систем со спутниковым каналом связи

The interface of underwater-automated systems to a satellite link

Янжура / Janzhura A.
Александр Станиславович
(janzhura@scaegroup.com)
кандидат физико-математических наук.
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
старший научный сотрудник
г. Санкт-Петербург

Осадчий / Osadchiy A.
Александр Иванович
(aleksandr.osadchiy@scaegroup.com)
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАЕН.
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
заместитель генерального директора по научной работе.
г. Санкт-Петербург

Бушманов / Bushmanov S.
Сергей Михайлович
(bushmanov@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
инженер.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: подводная акустическая связь – underwater acoustic communication; мультиплексирование с частотным разделением каналов – orthogonal frequency division multiplexing; оценка канала связи – cannel estimation.

Рассмотрена возможность создания морского буя-ретранслятора, позволяющего организовать информационный канал между спутниковыми системами связи и автономными подводными объектами. Особое внимание уделено разработке подводного акустического канала связи, исследованы и апробированы методы передачи данных в водной среде.

The possibility of aeration a marine buoy-transponder providing a information channel between satellite communication systems and autonomous underwater objects is considered. Particular attention is paid to the organizing of the underwater acoustic channel. The methods of data transfer in the aquatic environment have been studied and tested.

Введение

Все большее освоение водной среды требует развития методов дистанционной коммуникации с подводными объектами. Развитие хозяйственной деятельности в арктической зоне и увеличение инженерных работ на шельфе приводит к неуклонному возрастанию использования автономных подводных аппаратов, систем мониторинга и управления для обеспечения технологических процессов по разведке и добыче полезных ископаемых, обслуживанию трубопроводов, портовых инженерных сооружений и пр.

Обеспечить коммуникацию на акватории значительной протяженности было бы возможно с помощью спутниковой системы связи. Однако прямая передача данных со спутника в водную среду по радиоканалу неосуществима. Под водой на значительные расстояния распространяются лишь акустические волны в узком диапазоне частот. Единственный способ организовать дистанционный канал связи с подводными автономными объектами через спутниковую систему связи – использование буев-ретрансляторов, которые располагаются в районе проведения подводных работ.

В статье представлены материалы основной целью исследования, которых являлась разработка и макетная реализация такого способа передачи информации по гидроакустическому каналу связи, который бы обеспечивал надежность обмена данными при достаточно высокой скорости коммуникации – 10 кб/с и выше на удалении между объектами до 10 км.

Передача данных в водной среде является достаточно сложной и нетривиальной задачей. Гидроакустические волны, наиболее хорошо распространяющиеся в воде, подвергаются целому ряду искажающих полезный сигнал факторов: многолучевое распространение, преломление, доплеровское смещение частоты,

4 2017.indd 59 12.12.2017 11:24:57

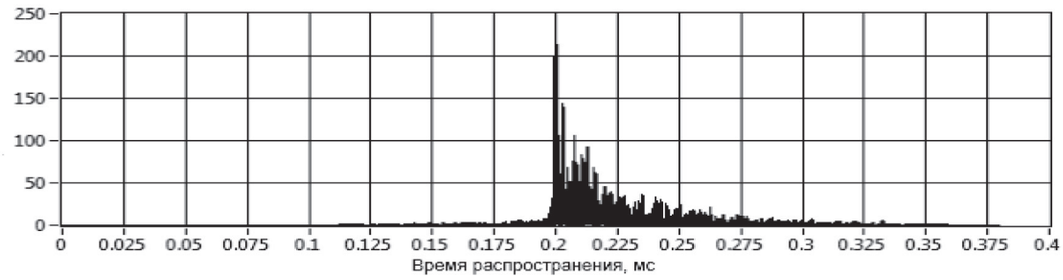

Рис 1. Импульсная характеристика гидроакустического канала связи

частотно-селективные замирания, значительный уровень различного рода шумов и помех. Кроме того, все эти факторы крайне нестационарны и претерпевают значительные изменения в пространстве и времени [1]. Диапазон рабочих частот в гидроакустическом канале ограничен, как правило, несколькими десятками килогерц. С учетом достаточно медленного распространения звуковых волн в водной среде не удается реализовать надежный и достаточно скоростной гидроакустический канал связи стандартными методами, успешно используемыми в других системах коммуникации. На рис. 1 показана импульсная характеристика гидроакустического канала связи, полученная в ходе эксперимента на мелководье.

Рисунок демонстрирует многолучевость распространения сигнала со значимыми амплитудами мод на протяжении примерно 25 мс.

Вышеперечисленные ограничивающие связь факторы физически не позволяют поднять скорость передачи информации более 100 бит/с в одноканальной системе передачи без адаптивной системы оценки динамических искажений даже в условиях глубокой воды, где нестационарность сигнала проявляется наиболее слабо. Однако наибольшая хозяйственная деятельность, как правило, осуществляется в шельфовой мелководной зоне, у поверхности воды или в придонной области, в условиях технологических помех инженерных сооружений, где, по понятным причинам, скорость коммуникации значительно уменьшается. Предельно малые скорости передачи информации даже при обеспечении хорошей устойчивости теряют свою актуальность.

Для повышения эффективности средств подводной цифровой коммуникации рассмотрена возможность передачи данных с использованием мультиплексирования канала связи, т.е. параллельной передачи информации на нескольких несущих частотах. При невозможности увеличения скорости передачи по одному каналу можно одновременно организовать несколько каналов. Такой метод успешно применяется в системах радио коммуникации, проводной и оптоволоконной связи. Наиболее широко используется мультиплексирование канала с ортогональным частотным разделением сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

При моделировании проведена адаптация данного метода к условиям гидроакустического канала связи. Также исследовались задачи по вхождению в связь в условиях повышенного уровня различного рода помех вплоть до постановочных; коррекции частотных групповых сдвигов, вызванных эффектом Доплера в случае использования на подвижных объектах; восстановлению искаженной в результате селективных частотных потерь информации.

Для проведения исследований создана компьютерная имитационная модель, позволяющая моделировать процессы формирования и декодирования информационных сигналов передаваемых по гидроакустическому каналу связи. Модель построена в компьютерной среде разработки LabVIEW в виде функционально законченных программных модулей. На рис. 2 представлена блок-схема имитационной модели, которая позволяет получать сигнал в модуле формирования, подвергать его искажениям среды в модуле распространения и далее анализировать качество его приема в модулях синхронизации и приема.

Модуль распространения сигнала в среде включает шумовые, частотные, селективные и многолучевые искажения, которым подвергается сигнал при прохождении в реальных условиях. В этом модуле имеется возможность изменять и задавать степень каждого типа искажений в целях исследования устойчивости сигнала к помехам. На этапе моделирования был сформирован сигнал OFDM состоящий из 256 несущих частот. Метод построения OFDM сигнала заключается в математическом формировании комплексного сигнала из модулированных несущих частот с помощью алгоритмов прямого и обратного дискретного преобразования Фурье.

Несущие частоты, полученные таким образом, состоят из набора $2N$, что определено алгоритмом быстрого дискретного преобразования, применяемого в данной модели. Число несущих может доходить до нескольких тысяч и ограничиваться лишь максимально допустимой шириной канала связи и условиями распространения различных длин звуковых волн в водной среде. Условие ортогональности – одно из основных требований такого метода, определяющее интермодуляционное взаимодействие отдельных несущих. Оно достигается за счет определенного соотношения длительности символа к расстоянию между несущими частотами. Ортогональ-

4 2017.indd 60 12.12.2017 11:24:57

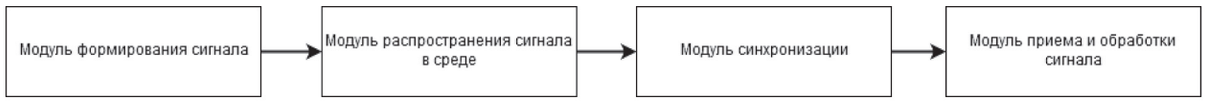

Рис. 2. Структура имитационной модели

ность позволяет избавится от влияния отдельных несущих друг на друга при минимальном расстоянии между соседними частотами. Использование мультиплексирования позволяет увеличить в сотни и тысячи раз пропускную способность при сохранении низкой скорости передачи символов. Минимизировать искажающий фактор многолучевости позволяет способ формирования циклического префикса, который также реализован в данной модели. Несущие частоты модулируются фазовой (PSK) или квадратурной модуляцией (QAM) нижних порядков.

Расчет системы связи на основе OFDM выполнен с учетом особенностей распространения ультразвуковых акустических волн в водной среде. Прежде всего, принималось во внимание значительное влияние межсимвольной интерференции, возникающей по причине многолучевого распространения сигнала. Продолжительность интерференции может меняться в широких пределах в зависимости от условий прохождения: от 2–5 мс в открытой воде до 20 мс и более на мелководье [2]. В принципе можно спроектировать адаптивную систему связи, учитывающую длительность межсимвольной интерференции, но в модельном варианте такой задачи не ставилось из-за необходимости получения стабильных статистических результатов в определенных условиях, поэтому для расчета канала использовалось интерференционное время 20 мс, которое покрывает большинство условий распространения в реальной среде.

Исследования показали, что с использованием OFDM метода можно достичь скорости передачи полезной информации до 30 кб/с. Уменьшение количества ошибок происходит за счет использования методов избыточного кодирования. Также алгоритмы сверточного кодирования совместно с позиционным перемежением информации позволяют эффективно бороться с селективными замираниями и помехами. В этом случае наложение узкополосной помехи, например в виде тона, на полезный сигнал не приводит к каким либо потерям принимаемой информации.

Один из важных вопросов, решенных в процессе моделирования гидроакустической системы связи – вхождение в связь и начальная синхронизация. Многочастотная OFDM модуляция является шумоподобным сигналом, занимающим значительную часть спектра с относительно равномерным энергетическим распределением. Такой сигнал трудно выделить на фоне естественного канального шума, а используемые в радиосвязи корреляционные методы анализа сигнала не эффективны, так как не работают при значительных доплеровских сдвигах, возникающих в гидроакустической среде. Поэтому модель была дополнена кадровой синхронизацией с функциональной преамбулой.

В результате формируется преамбула, состоящая из ЛЧМ несущей, крайние частоты которой ограничены F_a – частотным диапазоном OFDM сигнала и четырех fn_x – несущих постоянной частоты равномерно распределенных в спектре полезного сигнала. Длительность преамбулы в два раза больше длительности OFDM символа для обеспечения точности восстановления частотного домена. Структура преамбулы в частотной и временной областях показаны на рис. 3.

ЛЧМ сигнал обладает значительной устойчивостью к сдвигу Доплера и частотно-селективным замираниям. Корреляционный анализ преамбулы с ЛЧМ копией позволяет надежно выделить начало информационного кадра с незначительным смещением по времени вызванным сдвигом Доплера.

При последовательной передаче информации практически невозможно учесть нестационарность канала связи. Такая неустойчивость канальных характеристик распространения сигнала (в основном вызванных волнением поверхности воды, либо движением системы относительно шероховатого дна) компенсируется за счет синхронизации.

Проведены исследования по оптимизации плотности распределения сигналов синхронизации для «мелкой воды», когда условия распространения сигнала наиболее сложные, и условия «открытой воды», которые можно получить в глубоководных областях мирового океана. Первый результат был получен экспериментально с глубиной водоема не более 5 метров, второй – использованием гидроакустической модели, так как в этом случае модель упрощается и теоретический результат хорошо сочетается с экспериментальным. На рис. 4 показаны нормированная значения зависимости неискаженной полезной информации *Es* для различного шага сигналов синхронизации в «мелкой воде» (черная линия) и в «открытой воде» (серая линия).

Из графиков видно, что в стационарных условиях достаточно использовать сигналы синхронизации на каждой десятой поднесущей частоте для надежной эквализации сигнала, однако в нестационарных условиях периодичность синхронизирующих сигналов удваивается.

Учитывая значительную нестационарность распространения, моделировался изменяющийся во времени канал связи. Для определенного дискретного набора

4 2017.indd 61 12.12.2017 11:24:57

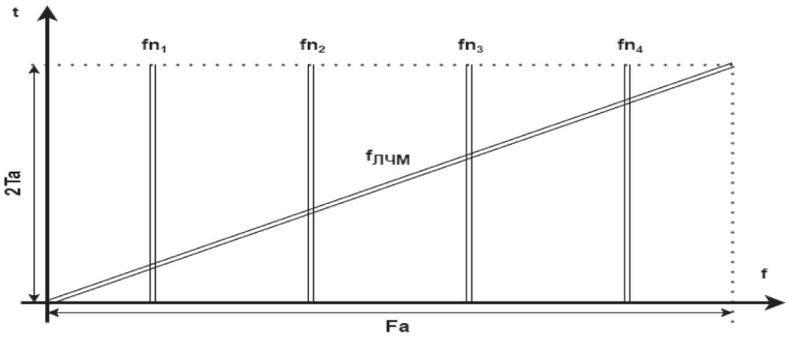

Рис. 3. Структура преамбулы кадровой синхронизации

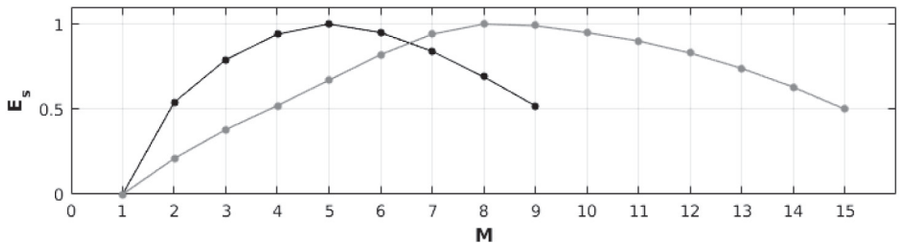

Рис. 4. Зависимость объема неискаженной полезной информации Es от шага расположения сигналов синхронизации для различных типов распространения сигнала

многолучевых компонент s гидроакустический канал можно представить как:

$$y(\tau,t)=\sum_{s}A_s(t)\delta(\tau-\tau_s(t)) \quad . \qquad (1)$$

Если принять, что амплитуды в каждой моде распространения не меняются в блоке данных $A_s(t)\approx A_s$, то каждый путь распространения может быть связан с отдельным масштабом смещения Доплера [3]:

$$\tau_S(t)=\tau_s-a_s t \, . \qquad (2)$$

Для простоты реализации при достоверном достижении результата была принята модель, в которой использовалось конечное число путей распространения N_s. В этом случае принятый сигнал записывается как:

$$y(\tau,t)=\sum_{s=1}^{N_s}A_s\delta(\tau-[\tau_s-a_s t]) \, . \qquad (3)$$

Анализ полученных результатов

Модель гидроакустического канала связи и программная часть приемо-передающего тракта системы связи выполнены в системе разработки LabVIEW в виде отдельных программных модулей. Сопряжение с реальным гидроакустическим каналом связи осуществлено с помощью специально разработанной аппаратной части с использованием гидрофонов. Испытания проведены как в модельном варианте, так и в условиях естественной среды в дельте реки Невы и на мелководье в Ладожском озере.

Анализ экспериментов показал, что при отношении сигнал/шум 10 дБ отношение количества ошибочных бит к принятому объему информации (BER) не превышал значения 10^{-4}. Эффективная скорость передачи информации составила 3000 бит/с. Вхождение в связь (распознавание начала информационного кадра) и коррекция смещения Доплера в диапазоне частот ±100 Гц происходило в 100% случаев при отношении сигнал-шум не менее 5дБ за счет использования начальной синхронизации во временном и частотном доменах по предложенной в работе преамбуле.

Заключение

Реализованная компьютерная имитационная модель подтвердила эффективность использования предложенных методов и алгоритмов для гидроакустической передачи данных. С помощью разработанного на базе модели макета продемонстрированы возможности подводной системы связи в реальной среде.

Отработанные в процессе моделирования и проектирования алгоритмы и программные решения можно относительно легко переложить на микроконтроллерное

4 2017.indd 62 12.12.2017 11:24:58

устройство, что позволит создать миниатюрный и автономный модем для гарантированной передачи информации в водной среде с достаточными скоростями для решения большого круга прикладных задач.

Разработанная и апробированная система гидроакустической связи в сочетании со спутниковой системой, например Гонец, позволяет построить ретрансляционный буй для обмена информацией с удаленными подводными объектами. Полученные наработки позволят согласовать стандартные коммуникационные протоколы с гидроакустической системой связи для дистанционного управления и передачи команд беспилотным подводным аппаратам, организовать распределенный мониторинг глубоководных объектов.

Литература

1. Кацнельсон, Б. Г., Акустика мелкого моря / Б.Г. Кацнельсон, В.Г. Петников. – М.: Наука, 1997. – 191 с.

2. Stojanovic, M. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization / M. Stojanovic, J. Preisig // IEEE Communications Magazine. – 2009. – P. 40–47.

3. Trubuil, J. Accurate Doppler estimation for underwater acoustic communications / J. Trubuil, T. Chronavel // OCEANS, Yeosy. – May 2012. – P. 1–5.

4 2017.indd 63 12.12.2017 11:24:59