

НОВАЯ РУБРИКА: «ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ»

Начиная с этого номера журнал «Цифровая обработка сигналов» открывает новую рубрику: «Первые шаги в науке». Авторами, представленных работ, как правило, являются студенты и аспиранты – победители конкурса на лучший научный доклад, который традиционно проводится в рамках ежегодной международной научно-технической конференции (МНТК) «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA». Публикуемые ниже статьи дополняют и расширяют материалы докладов, представленных молодыми учеными на 12-й МНТК «DSPA'2010» (ИПУ РАН, г. Москва). В последующих номерах журнала планируется дальнейшая публикация представленных работ.

УДК 004.383.3:621.376.9:004.942

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПОДВОДНЫМИ РОБОТАМИ

*Линник М.А., аспирант кафедры вычислительной техники (ВТ), Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ), Института проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН, mikelinnik@rambler.ru.
Научный руководитель - Бурдинский И.Н., доцент, к.т.н., доцент кафедры ВТ ТОГУ, ИПМТ ДВО РАН.
Научный консультант - Миронов А.С., старший преподаватель кафедры ВТ, ТОГУ, ИПМТ ДВО РАН.*

Ключевые слова: гидроакустическая система связи, модем, модуляция, программируемые логические интегральные схемы, отношение сигнал/шум, относительное число ошибок (BER), корреляционная функция, M -последовательности.

Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к беспроводным системам связи, в независимости от среды передачи и вида используемых сигналов, остаются *скорость* и *достоверность* передаваемой информации. Усилия разработчиков различных модулей гидроакустических систем связи (ГАСС) в первую очередь направлены на достижение высоких показателей качества, но при этом не должны уходить на второй план и такие важные для автономных систем показатели как *энергопотребление* и *надежность*, что напрямую зависит от используемой элементной базы.

Задачей работы является разработка и оптимизация алгоритмов работы модулей ГАСС, связанных с излучением, детектированием и декодированием информационного сигнала (сообщения), с целью улучшения основных показателей системы в целом.

Принцип работы большинства современных ГАСС основан на излучении и приеме информационных символов, в которых в качестве различительного признака выступают частота и фаза сигнала. Декодирование принимаемого символа основано на предположении, что прямой сигнал имеет максимальную амплитуду, а уровень донных и поверхностных отражений ниже. Чтобы обеспечить режим выбора максимального сигнала, в течение сеанса связи ведется оценка передаточной характеристики канала связи и выравнивание модулей коэффициентов передачи на всех рабочих частотах.

Рассматриваются вопросы улучшения качественных показателей гидроакустической системы связи подводного робота. Описаны результаты математического моделирования алгоритмов функционирования приемо-передатчика системы связи. Представлены реализация исследуемых алгоритмов с применением технологии FPGA и результаты натурных испытаний опытного образца системы в условиях мелкого моря.

Математическое моделирование

В качестве исследуемого алгоритма функционирования модема ГАСС был выбран комбинированный метод, соединяющий в себе элементы квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) и частотной модуляции (FSK) [1]. Частота и фаза символа принимают четыре значения: частота – $f_{1..4}$, фаза – $\varphi_{1..4}$, что дает возможность кодировать четыре бита на символ. Для анализа работы модема (*достоверность определения информации (BER)*) при различных параметрах модуляции (длительность символа t_s , относительная частота $f^* = f_a/f_s$, f_s – несущая частота сигнала) и соотношениях сигнал/шум (SNR) использовалась разработанная математическая модель в среде MATLAB v.7.8 [2]. Передача телеметрических сигналов ($BER < 10^{-2}$ [3]) по данным математического моделирования для $t_s = 0,667$ мс и $f^* = 4$ возможна при $SNR > -3$ дБ.

Пакет данных состоит из 256 символов (1024 бит). Формат информационного сообщения представлен на рис. 1. В него включены также сигнал синхронизации и пилот-сигнал. Кроме того, пакет данных разбит на 4 информационного сегмента. Каждый сегмент содержит 4 пилот-символа и 64 информационных символов. По синхросигналу происходит определение момента прихода пакета, корректировка фазы синхронизации и настройка параметров приемного тракта.

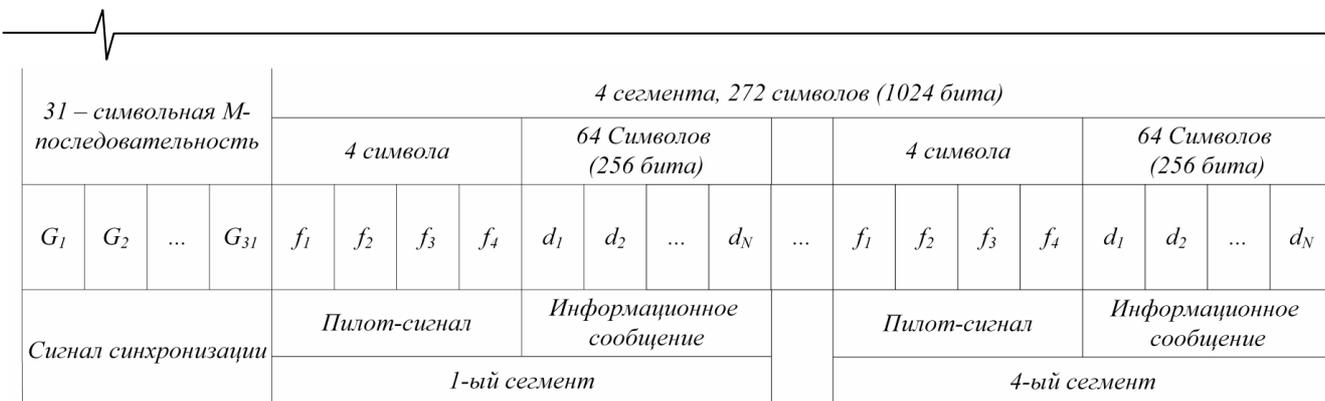


Рис. 1. Формат информационного сообщения

Сигнал синхронизации представляет собой фазоманипулированный сигнал (BPSK) частотой f_1 . В качестве синхронизирующего сигнала была выбрана 31-символьная M -последовательность, обладающая высокой степенью автокорреляции, что позволяет с высокой достоверностью определить момент прихода сигнала [4]. Основным методом для детектирования M -последовательностей является вычисление корреляционной функции принимаемого сигнала с маской:

$$R_k = \sum_{i=0}^{C_S \cdot n - 1} S_{k+i} \cdot M_i, \quad (1)$$

где n – количество семплов в символе, S_{k+i} – входные данные, M_i – отсчеты маски, k – номер символа, C_S – количество символов в M -последовательности.

Детектирование сигнала основывается на поиске максимума корреляционной функции, который должен удовлетворять критерию достоверности. Один из вариантов определения критерия достоверности заключается в нахождении величины отношения максимумов двух корреляционных функций – для излучаемой и неизлучаемой M -последовательности [5]:

$$r = \max_k (R_k^1) / \max_k (R_k^2), \quad r \geq r_{\min}, \quad (2)$$

где R_k – значение корреляционной функции, r_{\min} – заданный порог детектирования.

При помощи численного моделирования было выяснено, что для 31-символьной M -последовательности, при $SNR \geq -3$ дБ, $r_{\min} \geq 2$.

Пилот-сигнал добавлен для автоматической адаптации параметров приемного тракта к каналу связи в полосе рабочих частот ГАСС в начале каждого сегмента. Его обработка позволяет получить оценки АЧХ и ФЧХ канала [6]. Пилот-сигнал является детерминированным и содержит колебания всех рабочих частот фиксированной амплитуды и фазы. Многократная привязка необходима для компенсации набега фазы, вызванного эффектом Доплера при движении подводного аппарата и нелинейностью передаточной характеристика гидроакустического канала связи. На рис. 2 демонстрируется процесс обработки входных данных с автоматической адаптацией к каналу связи при $SNR = -3$ дБ: а) излучаемый сигнал; б) прием без адаптации в) прием с применением адаптации.

Основным блоком цифровой обработки сигнала в модели исследуемого модема ГАСС служит набор стандартных квадратурных демодуляторов сигнальных частот. Решение о значении информационного символа принимается на основании анализа набора калибровочных данных по всем сигнальным частотам (оценка амплитуд и фаз) и текущих данных демодуляторов [6].

Для рассмотренного алгоритма при следующих входных данных модели: длительность одного символа - $t_S = 0,667$ мс, относительная частота - $f^* = 4$, частота дискретизации - $f_d = 48$ кГц; количество пилот-сигналов – 4; количество символов в сигнале синхронизации – 31; размер одного пакета данных – 303 символа; скорость передачи данных – 5067 бит/с.

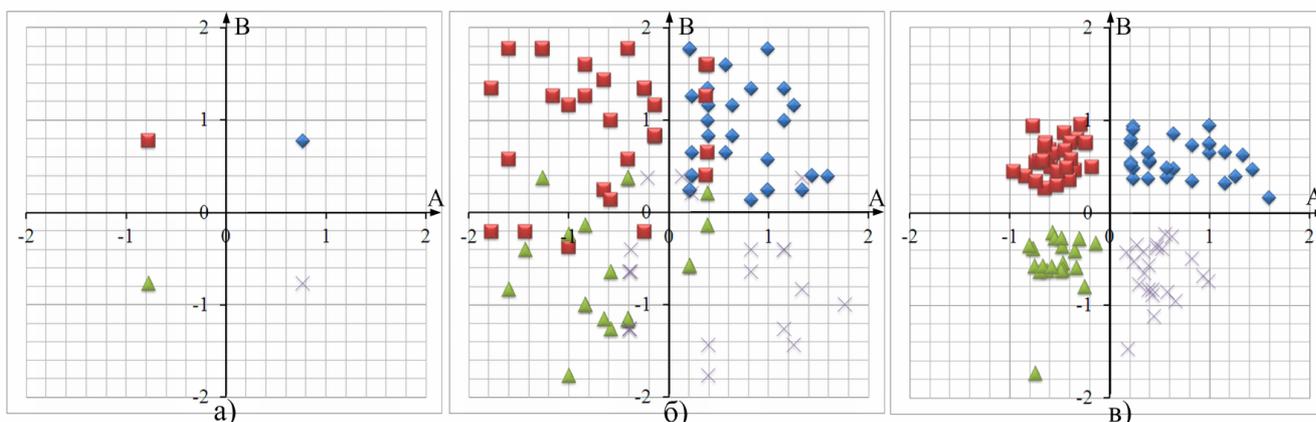


Рис. 2. Процесс обработки входных данных

Аппаратная реализация

В качестве экспериментальной базы для реализации и исследования разработанных алгоритмов работы модема ГАСС было решено использовать систему ПЛИС типа FPGA. Это позволило провести полнофункциональную реализацию алгоритмов на современной элементной базе, характеристики которой удовлетворяют требованиям надежности и энергопотребления. Использование ПЛИС позволяет проектировать реконфигурируемую систему, которая может быть быстро наделена дополнительными функциями в зависимости от условий эксплуатации и требования потребителя.

Аппаратная реализация модуля модема ГАСС производилась на базе FPGA матрицы Virtex-4 XC4VSX35 фирмы Xilinx [7]. Использование технологии FPGA позволит избежать недостатков DSP процессоров, в частности, появится возможность распараллелить несколько процессов внутри одного устройства. Разработка схематехнического дизайна модема ГАСС производилась в среде проектирования Xilinx ISE v10.1. В качестве прототипа для реализации модулей модема ГАСС использовался отладочный стенд ML402 фирмы Xilinx. Поступающий из канала связи сигнал оцифровывается кодеком LM4550 с 18-разрядным сигма-дельта АЦП и с $f_d=48$ кГц. Тактовая частота работы матрицы FPGA $f_{clk}=100$ МГц. Функциональная схема устройства для вычисления корреляционной функции представлена в работе [8]. При реализации разработанного алгоритма модем ГАСС [9] для $f_s=10, 11, 12, 13$ кГц, $f_d=48$ кГц, $f_{clk}=100$ МГц,

$t_c=0,667$ мс затраты ресурсов матрицы XC4VSX35 составили менее 20 %.

Структурная схема разработанного модема ГАСС для FPGA на базе стенда ML402 представлена на рис. 3а. Блок обработки данных с GPS используется для относительной синхронизации модема в пределах 1 сек. Контроллеры кодека, Ethernet и RS-232 требуются для осуществления интерфейсов соответственно с кодеком LM4550, микросхемой физического уровня Ethernet и преобразователем RS-232. Блок синхронизации осуществляет поиск сигнала и запуск блока демодулятора. Фотография макетного образца ГАСС представлена на рис. 3б.

Натурные испытания

Натурные испытания макетного образца проводились в сентябре 2009 г. в бухте Рында залива Петра Великого (г. Владивосток) с борта научно-исследовательского судна «Юрий Молоков».

В ходе натурных испытаний было определено, что эффективная ширина спектра приемо-передающего тракта на базе антенн ПИ1-ЛУ 3.814 составляет менее 500 Гц. На рис. 4 представлен график зависимости BER от SNR для разных длительностей символа. Для получения $BER < 10^{-2}$ при использовании антенн ПИ1-ЛУ 3.814 длительность символа должна быть больше 3,0 мс (скорость передачи 1500 бит/с), а отношение сигнал/шум свыше 0 дБ. Использование антенн с более широким спектром позволило бы добиться лучших показателей ГАСС.

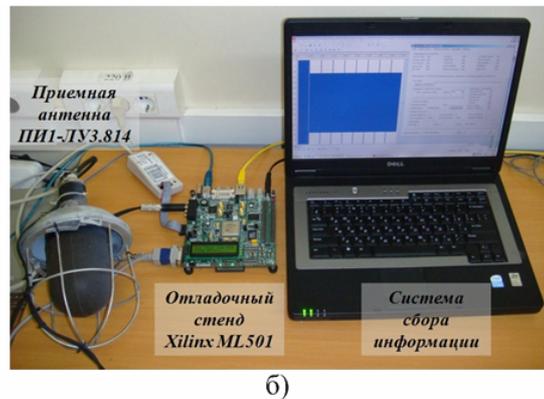
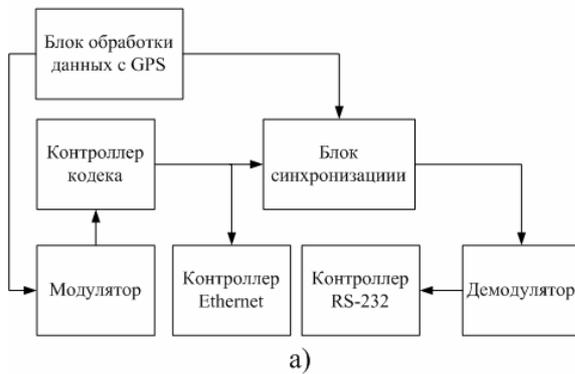


Рис. 3. Структурная схема разработанного модема ГАСС и фотография макетного образца

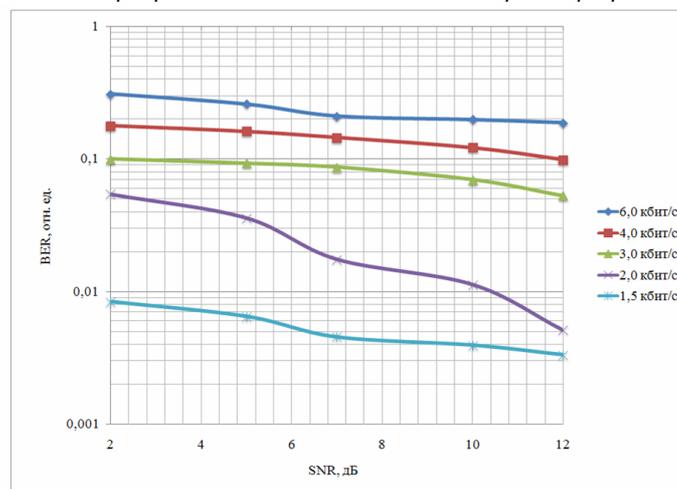


Рис. 4. Результаты натурных испытаний

Заключение

В данной работе представлена аппаратная реализация цифровых блоков ГАСС на FPGA матрице фирмы Xilinx. Приведены натурные испытания разработанных блоков на базе отладочного стенда ML501 фирмы Xilinx в реальных условиях. Полученные результаты позволяют судить о перспективности использования технологии FPGA для создания высокоскоростных систем связи. Разработанный макетный образец предполагается использовать в ГАСС автономных подводных аппаратов, разрабатываемых Институтом проблем морских технологий ДВО РАН, а также в системах телеметрии и навигации.

Литература

1. Матвиенко Ю. В. Гидроакустический комплекс навигации подводного робота // Диссертация по соисканию ученой степени д.т.н. – Владивосток, 2004.
2. Модель высокоскоростной гидроакустической системы связи «ГАСС» / Бурдинский И.Н., Карабанов И. В., Линник М.А., Миронов А. С. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613300. – 2009.
3. Milica Stojanovic Underwater Acoustic Communication, Department of Electrical and Computer Engineering Northeastern University Boston
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. Girod L., Estrin D. Robust Range Estimation Using Acoustic and Multimodal Sensing // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), Maui, Hawaii, October 2001.
6. Marc Stebber J. PSK Demodulation. - WJ Communications, Inc, 2001 [Электронный ресурс].
7. Virtex-4 Family Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds112.pdf
8. Бурдинский И.Н., Миронов А.С. Мяготин А.В. Измерительный комплекс для регистрации шумоподобных

гидроакустических сигналов / И.Н. Бурдинский, А.С. Миронов, А.В. Мяготин // Материалы IX Международной конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения. Новосибирск: 2008.

9. Модуль цифровой обработки сигналов гидроакустической системы связи / Бурдинский И.Н., Карабанов И. В., Линник М.А., Миронов А. С. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613588. – 2009.

ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM FOR UNDERWATER VEHICLE TELECOMMUNICATION

Burdinsky I.N., Linnik M.A, Mironov A.S.

The work deals with development and optimization algorithms of acoustic underwater modem (AUM) to improve key indicators of the system. These algorithms are associated with radiation detection and decoding the information signal. In this paper scientifically sound and experimentally investigated principles of multi-channel high-speed information transmission systems for acoustic communication channel. These systems are designed for management and operational control of the implementation of the underwater vehicle (AUV). Developed mathematical model of the AUC using a mathematical programming environment Matlab. Presented the result of mathematical modeling algorithms of AUM. Presented model of the AUM, developed by FPGA technology from Xilinx. This model allows for high-speed telecommunication interaction between the AUV. Using FPGA technology improves important indicators for autonomous systems such as power consumption and reliability. Presented the results of field tests of a developed system in a shallow sea. Practical results of work will be used in research conducted by the Institute of Marine Technology Problems FEB RAS in the framework of government order.

Уважаемые авторы!

Редакция научно-технического журнала "Цифровая обработка сигналов" просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1) Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст - текстовый редактор Microsoft Word.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается:
 - краткой аннотацией на русском и английском языках;
 - номером УДК;
 - сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, телефоны, электронная почта).

2) Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) - желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) - М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.