

УДК 621.396

М. Л. Никитин, аспирант
 А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент
 М. М. Марков, кандидат технических наук
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИОМОДЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛИС

Рассмотрены особенности построения широкополосного радиомодема, построенного по технологии программно-определяемого радио. Показаны особенности реализации стенда для оценки эффективности работы схем передатчика и приемника. Показана необходимость реализации алгоритмов формирования и обработки сигнальных конструкций на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, программно-определяемое радио, частотно-временной сигнал, частотно-временная матрица, прямое расширение спектра, псевдослучайная последовательность, широкополосный сигнал.

При обработке широкополосных сигналов (ШПС) [1–5], имеющих большую базу, требуется высокая производительность процессора, выполняющего обработку сигналов. Такой производительностью обладает цифровой приемник, построенный по технологии программно-определяемого радио или software defined radio (SDR) [6, 7], где обработка сигнала происходит на персональной электронной вычислительной машине (ПЭВМ). В случае использования мобильных платформ актуальной становится задача реализации алгоритмов обработки на базе ПЛИС без использования ПЭВМ в качестве ядра цифровой обработки [8].

В качестве сигнальной конструкции (СК) в работе использован широкополосный составной частотно-временной сигнал (ЧВС) [9–11] с прямым расширением спектра псевдослучайной последовательностью (ПСП), при этом в качестве алфавита применен ансамбль из 4 матриц размерностью 4×4 для перемежения информации, а в качестве ПСП применяются последовательности Голда длиной в 127 чипов. Применение в СК последовательностей Голда позволяет увеличить скорость передачи относительно применения М-последовательностей с 1574 до 2755 бит/с в полосе 100 кГц [12]. При этом возрастает энергетическая эффективность СК [13], что отражено на рис. 1.

На рис. 1, а представлена зависимость вероятности ошибки для сигнала с использованием М-последовательностей, а на рис. 1, б – для сигнала с использованием последовательностей Голда.

Таким образом, актуальной является задача формирования и обработки рассмотренной широкополосной СК с использованием SDR-радиомодема, построенного с использованием ПЛИС в качестве ядра цифровой обработки.

Приемная часть SDR-радиомодема (рис. 2) может включать в себя входное устройство, представляющее собой усилитель с коэффициентом усиления 10 дБ, аттенуатор с коэффициентами ослабления 0...30 дБ шагом 10 дБ, блок фильтров. Также приемная часть содержит антиалиасинговый фильтр, аналогоцифровой преобразователь, квадратурный преобразователь, включающий в себя квадратурный

гетеродин, дециматоры, фильтры нижних частот для I- и Q-каналов. Для примера следует отметить, что все эти блоки, например, реализованы в коротковолновом трансивере SunSDR2 [14].

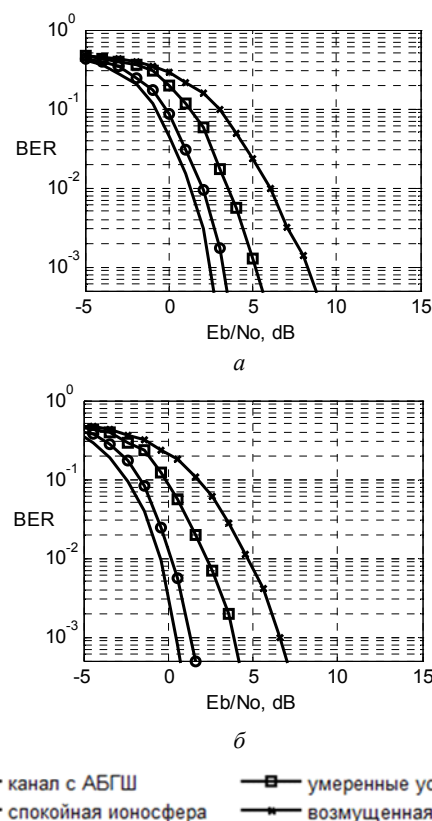


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки от энергии на бит для широкополосного составного ЧВС: а – с М-последовательностями; б – с последовательностями Голда

При построении макета радиомодема блоки 1, 2 и 3 представляют собой блок синхронизации, демодулятор и перемежитель соответственно, легко реализуемые программно на ПЭВМ в среде Matlab 2009b и используемые непосредственно для обработки широкополосной СК. При этом на выходе блока 3, в результате цифровой обработки сигнала, формируется восстановленная информационная последовательность.

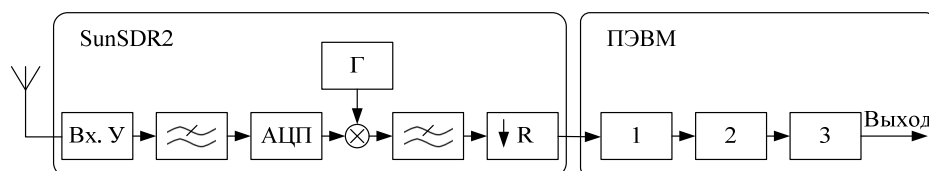


Рис. 2. Приемная часть SDR-радиомодема

Передающая часть радиомодема (рис. 3) должна включать в себя перемежитель 4, модулятор 5, блок формирования преамбулы 6 и блок формирования квадратур 7. Данная часть также может быть выполнена программно в среде Matlab 2009b. После чего необходимо осуществить перенос спектра на радио-

частоту, что может быть сделано при помощи векторного генератора Rohde&Schwarz SMU-200A, который содержит в себе интерполятор, ФНЧ, гетеродин, смеситель, цифроаналоговый преобразователь и усилитель мощности.

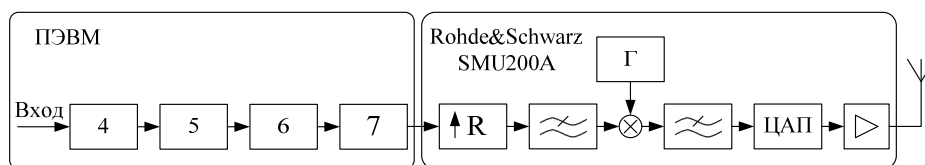


Рис. 3. Передающая часть SDR-радиомодема

Построенный по такой схеме макет был использован для проверки передачи широкополосной СК, построенной на базе составного ЧВС с прямым расширением спектра ПСП в полосе 100 кГц и технической скоростью передачи данных 2755 бит/с.

Проведенные исследования по оценке требуемой производительности показали, что среднее время обработки информационного сообщения длительностью 4,27 с составляет 22,51 с при использовании ПЭВМ с процессором i5-3470 3,2 ГГц и одного задействованного ядра. Результаты показывают, что реализация радиомодема по такой структуре не обеспечивает обработку широкополосной СК с использованием полного алфавита в реальном времени и требует сокращения алфавита или повышения производительности вычислительных средств.

Для решения задачи обеспечения требуемой производительности может быть рассмотрен вариант реализации блока формирования и обработки СК непосредственно на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), в качестве которой использована микросхема Cyclone IV. Структурная схема радиомодема на ПЛИС, осуществляющего формирование и обработку сигнала, рассмотренного в [15], представлена на рис. 4.

Формирование ШПС происходит в следующей последовательности: интерфейс приемника 6 формирует из входной последовательности информационный сигнал, а также синхронизации для перемежителя 7 и генератора преамбулы 10 соответственно. После перемежения информационная последовательность поступает на блок выбора ПСП 9 и блок формирования сигнальной конструкции 8. Мультиплексор осуществляет объедине-

ние преамбулы и сформированной сигнальной конструкции, и впоследствии сигнал переносится в радиочастотную область с использованием квадратурной обработки.

Обработка сигнала происходит по следующему правилу. Данные с АЦП поступают на смеситель, где происходит прямое квадратурное преобразование частоты. После чего сигнал с частотой дискретизации 120 МГц поступает на каскадно-гребенчатый фильтр, выполняющий функцию децимации, при этом частота дискретизации снижается в 150 раз. Полученный сигнал после децимации для корректировки амплитудно-частотной характеристики пропускается через фильтр-корректор с коэффициентом децимации 2.

Принимаемый сигнал, перед тем как попасть на корреляторы, проходит через устройство коррекции временного сдвига 1. Управление временным сдвигом осуществляется устройством определения границ матрицы 2, которое с помощью коррелятора определяет наличие ШПС и вычисляет временной сдвиг, а также формирует сигнал синхронизации для перемежителя 5, необходимый для определения начала информационного сообщения. Блок памяти 3 хранит комплексно сопряженный спектр преамбулы.

Демодуляция принятого сообщения происходит в корреляторах А1–А4, в данном случае используется алфавит из 2 ПСП, комплексно сопряженный спектр которых хранится в блоке 4. После свертки принятой части сообщения и алфавита ПСП принимается решение о приеме логической «1» или «0». Демодулированный сигнал с корреляторов поступает на перемежитель 5, где происходит его восстановление в нужной последовательности.

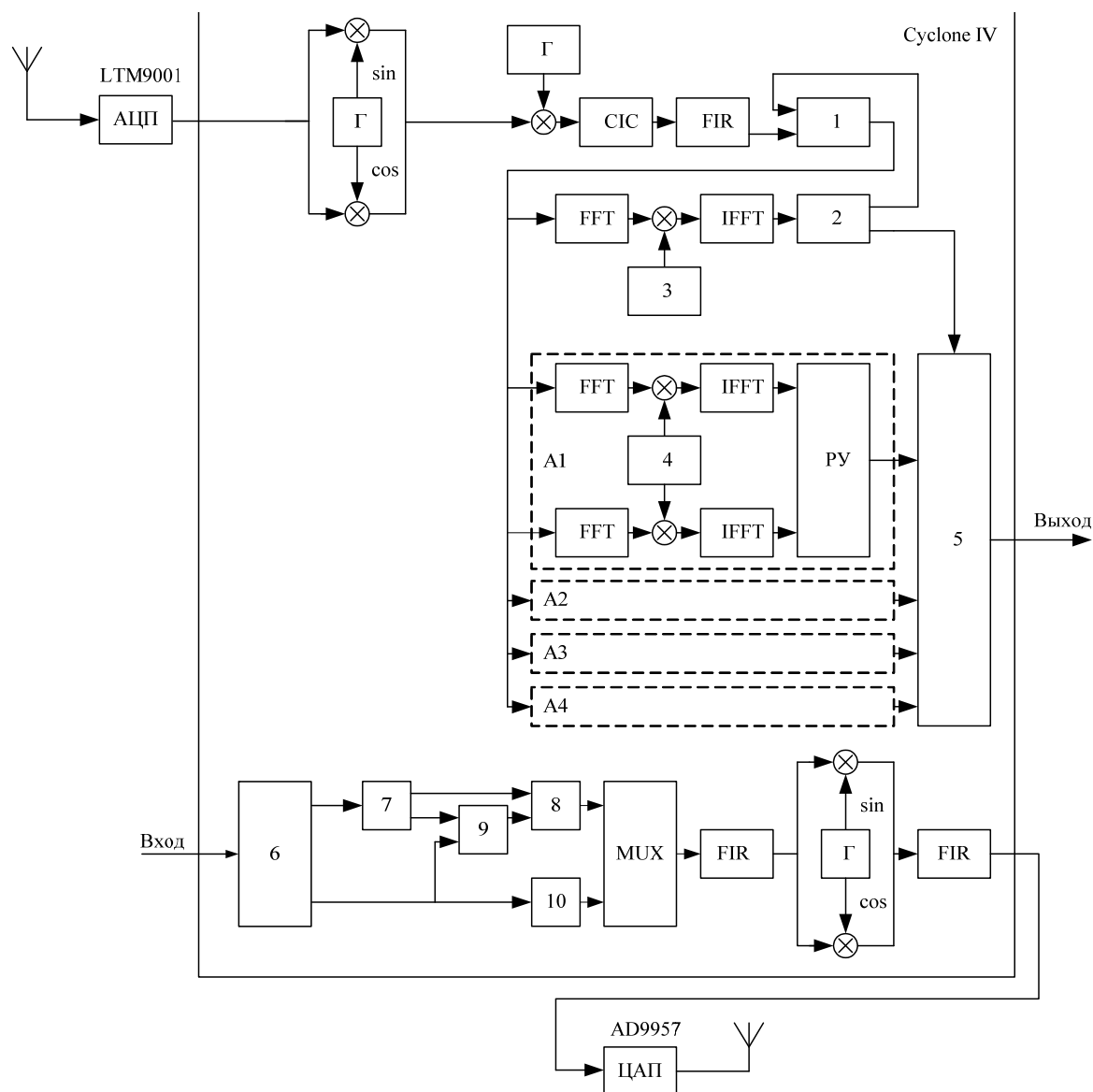


Рис. 4. Реализация SDR-радиомодема на ПЛИС

Радиомодем рассмотренной структуры и реализованный на ПЛИС обеспечивает обработку и формирование сигнала в реальном масштабе времени, при этом используется сокращенный алфавит ПСП, что приводит к снижению скорости передачи информации до 393 бит/с при используемой полосе 100 кГц. Процент ресурсов ПЛИС, задействованных при реализации радиомодема для сигнала, рассмотренного в [16], представлен в таблице.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что проект наиболее требователен к памяти ПЛИС, следовательно, повышение скорости передачи информации за счет расширения алфавита не представляется возможным. Однако большинство ПЛИС допускает подключение внешней памяти, а размещение в ней отсчетов спектра эталонных сигналов позволит расширить алфавит и, соответственно, увеличить скорость передачи информации.

Задействованные ресурсы ПЛИС

Тип ресурса	Занято	Общее количество	Процентное соотношение, %
Объем памяти, кбит	3240	3888	83
Количество умножителей 18x18	148	266	56
Количество логических элементов	85000	114480	74

В заключение можно сформулировать ряд выводов. Во-первых, реализация радиомодема на базе ПЭВМ позволяет обрабатывать выбранную широкополосную СК с полным алфавитом, обеспечивающим скорость до 2755 бит/с в полосе 100 кГц, однако при этом СК не обрабатывается в реальном времени. В этом случае проблема обработки в реальном масштабе времени может быть решена при помощи снижения скорости передачи информации за счет

сокращения алфавита ПСП или повышения производительности вычислительных средств. Во-вторых, применение алгоритмов обработки и формирования на ПЛИС позволяют вести прием и передачу СК в реальном времени, однако за счет ограниченности ресурсов используемой ПЛИС техническая скорость передачи достигает лишь 393 бит/с, что практически на порядок ниже теоретически возможного значения, данная проблема может быть решена подключением внешней памяти к ПЛИС.

Библиографические ссылки

1. Климов И. З., Копысов А. Н., Чувашов А. М. Исследование вариантов построения широкополосных систем связи // Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2012 : труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Доклады 14-й Международной конференции. – М., 2012. – С. 435–439.
2. Бабинцев Е. С., Копысов А. Н., Климов И. З. Структурная скрытность дискретно-частотного и многочастотного широкополосных сигналов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2. – С. 109–13.
3. Климов И. З., Копысов А. Н., Чувашов А. М. Сравнительная оценка вариантов построения широкополосных систем связи // Радиотехника, электроника и связь («РЭС-2011») : сборник докладов Международной научно-технической конференции. – Омск : Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2011. – С. 57–65.
4. Способ обнаружения широкополосных сигналов и устройство для его реализации: пат. 2470459 Российская Федерация: МПК Н04В1/10, Н04Л7/00, Н03К7/08 / И. З. Климов, А. М. Чувашов, А. Н. Копысов, А. А. Богданов; заявитель и патентообладатель «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – № 2011120857/08 ; заявл. 24.05.2011; опубл. 20.12.2012.
5. Способ слежения за задержкой широкополосного сигнала и устройство для его реализации: пат. 2486672 Российская Федерация: МПК Н04В1/10 / И. З. Климов, А. М. Чувашов, А. Н. Копысов, А. А. Богданов; заявитель и патентообладатель «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – № 2012105895/07; заявл. 17.02.2012 ; опубл. 27.06.2013.
6. Никитин М. Л., Копысов А. Н. Широкополосный коротковолновый SDR-модем // Выставка инноваций – 2015 (весенняя сессия) : электронное научное издание : сборник тезисов докладов XIX Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – Ижевск, 2015. – С. 110–113.
7. Никитин М. Л. SDR-DDC-приемник // Выставка инноваций – 2014 : сборник тезисов докладов XVII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – Ижевск, 2014. – С. 44–45.
8. Копысов А. Н. Исследование и разработка средств согласования линейного тракта приема широкополосного сигнала КВ-диапазона с устройствами цифровой обработки : дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2006.
9. Методы синтеза составных частотно-временных сигналов / М. Л. Никитин, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, А. А. Богданов, А. В. Жидяев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С. 93–97.
10. Синтез составного дискретно-частотного сигнала / А. Н. Копысов, И. З. Климов, Ю. Т. Загидуллин, В. А. Мошонкин, А. А. Богданов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2013. – № 1. – С. 95–97.
11. Копысов А. Н., Климов И. З., Тюлькин М. В. К вопросу об исследовании частотно-временного сигнала в многолучевом канале связи // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 4. – Ижевск, 2009. – С. 125–127.
12. Никитин М. Л., Копысов А. Н., Марков М. М. Оценка помехоустойчивости широкополосных сигналов, построенных на базе фазоманипулированных частотно-временных сигналов // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / гл. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск, 2014. – С. 218–223.
13. Исследование энергетических характеристик сигналов, применяемых для передачи данных по декаметровому каналу / А. В. Жидяев, А. Н. Копысов, А. А. Богданов, А. В. Савельев, М. Л. Никитин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С. 85–88.
14. Описание трансивера SunSDR2. – URL: <http://eesdr.com/ru/products-ru/transceiver-ru/sunsdr2-ru> (дата обращения: 28.10.2015).
15. Методы синтеза составных частотно-временных сигналов. – С. 93–97.
16. Там же.

Nikitin M. L., Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Kopysov A. N., PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Markov M. M., PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

Design features of the broadband software-defined radio using hardware opportunities of the field-programmable gate array

Design features of the broadband radio, which is built by software-defined radio technology, are reviewed. The implementation features of the model for effectiveness evaluation of transceiver functioning are presented. The necessity of algorithm implementation for waveform generating and processing on the field-programmable gate array (FPGA) is reviewed.

Keywords: software-defined radio, field-programmable gate array, time-frequency signal, time-frequency matrix, direct-sequencing spread spectrum, pseudorandom sequence, broadband signal.

Получено: 02.11.15