

УДК 621.373

ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ РАДИОСИСТЕМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Рябов И.В., Толмачев С.В., Лебедева А.А.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, e-mail: ryabov22@mail.ru

Статья посвящена рассмотрению принципов создания SDR-приемников для решения задач метеорной радиосвязи. Системы метеорной связи в сравнении с радиолиниями ионосферного рассеяния обладают рядом преимуществ, среди которых возможность обеспечения связи при сравнительно небольших мощностях передатчика (около 1 кВт) и простых антенных системах; повышенная скрытность связи и достаточно широкая полоса частот канала связи. Технология SDR позволяет обрабатывать и передавать сигналы с использованием разных частот и стандартов, выбор которых зависит от самых различных факторов. Представлены структуры аппаратной части SDR-приемника, архитектура программной части SDR, структурная схема ПЛИС семейства ZYNQ, структурная схема отладочной платы Zedboard, структура микросхемы 1288XK1T (MF-01). Проведен сравнительный анализ технических характеристик отладочных плат на основе Zedboard и 1288XK1T. Описаны принципы работы SDR-приемников на основе приведенных выше отладочных плат.

Ключевые слова: программно-определяемое радио, SDR-приемник, отладочные платы, ПЛИС, метеорные следы, метеорная связь, КИХ-фильтры-дециматоры, цифровой гетеродин, цифровая обработка сигналов, система-на-кристалле

PRINCIPLES OF SOFTWARE-BASED RADIOSYSTEMS AND ITS APPLICATION WITHIN THE FRAMEWORK OF METEOR-BURST COMMUNICATION INVESTIGATION

Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Lebedeva A.A.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: ryabov22@mail.ru

The article considers principles of the creation of SDR-receivers for meteor-burst communication problem solving. Meteor Communications Systems compared to radio links ionospheric scattering have a number of advantages, including: the ability to provide communications at relatively low transmitter power (about 1 kW) and a simple antenna systems; Increased communication and stealth rather wide band frequency channel of communication. SDR allows processing and transmitting signals using different frequencies and standards, the choice of which depends on all sorts of factors. The structures of the hardware component of a SDR receiver, the architecture of SDR-software, the block diagram of FPGA of a ZYNQ family, the block diagram of a Zedboard development board, the structure of a microcircuit 1288XK1T (MF-01) are presented. The comparative analysis of technical characteristics of development boards, based on Zedboard and 1288XK1T has been conducted. Principles of SDR-receiver work on the basis of development boards, mentioned above, have been described.

Keywords: software-defined radio, SDR-receiver, development boards, FPGA, meteor trails, meteor-burst communication, FIR decimation filters, digital heterodyne, digital signal processing, system on a chip

Метеорная радиосвязь основана на свойстве отражения радиоволн от ионизированных следов метеоров. В течение суток в атмосферу Земли попадает большое количество метеоров с различной массой (от 10–12 до 104 г) и радиусом 0,2 мкм – 8 см, при этом скорость метеорных частиц составляет от 11 до 73 км/с. По этой причине частицы, попадающие в земную атмосферу, сильно нагреваются и сгорают на высоте 70–120 км, образуя метеорный след. Метеорный след быстро расширяется из-за диффузии. Длина следа, состоящего из свободных электронов и ионов, достигает 25 км при времени существования 5 мс – 20 с.

Метеорные следы с концентрацией электронов меньше, чем 10–14 электронов на 1 м длины называются следами со слабой концентрацией. Мощность принимаемого сигнала при отражении от следов со слабой концентрацией со временем быстро увели-

чивается, достигая максимума при прохождении через центр главной зоны Френеля. Характер изменения мощности принимаемого сигнала для метеорных следов слабой и сильной концентрации различен, это можно видеть на рис. 1.

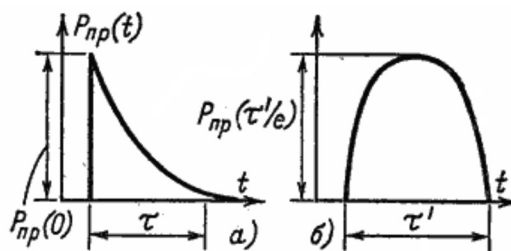


Рис. 1. Характер изменения мощности принимаемого сигнала для следов со слабой (а) и сильной (б) концентрацией

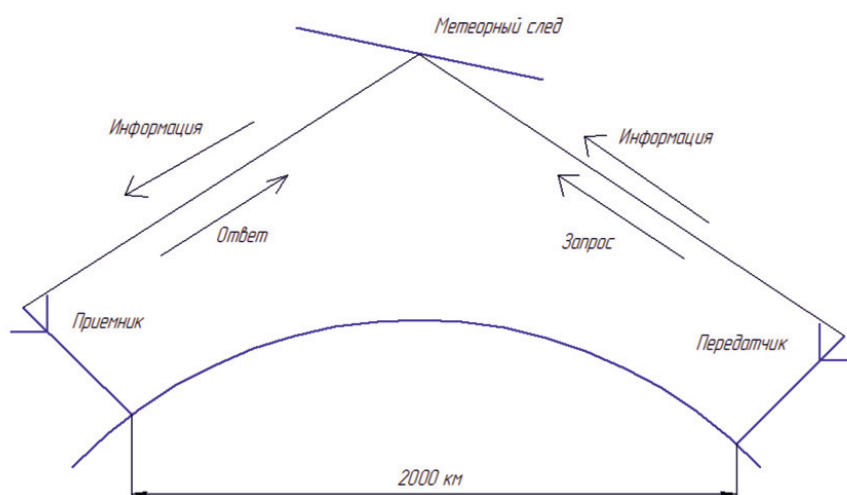


Рис. 2. Принцип метеорной радиосвязи

Основные параметры радиолинии метеорной радиосвязи приблизительно можно рассчитать с помощью формул. Для расчёта пропускной способности линий метеорной радиосвязи, а также для статистической оценки важно знать законы распределения уровней, длительности и числа отражённых сигналов. Данные параметры зависят от географических координат трассы, времени года и суток, от мощности самого передатчика, а также от чувствительности приёмника. Существуют данные экспериментов, согласно которым коэффициент использования каналов меняет от двух до 20% (данный коэффициент равен проценту времени, в течение которого имеется пригодный для связи сигнал). Безусловно, на значение этого коэффициента также влияют вышеперечисленные параметры, однако значения остаются в указанном диапазоне.

Согласно особенностям возникновения подходящих для связи метеорных следов, система связи должна состоять из двух идентичных передатчиков. Передатчики непрерывно излучают энергию без модуляции на частотах, разнесённых на некоторый интервал. Каждый приёмник настроен на частоту передатчика, находящегося на противоположном конце радиолинии.

В случае, если сигнал одного из приёмников превысит некоторое пороговое соотношение «сигнал/шум», сработает стробирующее устройство передатчика и начнётся передача информации. Информация передаётся с высокой скоростью до тех пор, пока отношение «сигнал/шум» не падает ниже порогового уровня. В приёмнике инфор-

мация накапливается, а затем считывается в обычном режиме. Принцип метеорной радиосвязи показан на рис. 2.

В основе рассматриваемой системы – принцип полной обратимости механизма отражения и идентичности уровня шума и оборудования. Информация для этого может быть передана по обратному радиоканалу, который используется или только для этой цели, или также для передачи данных.

Оборудование для метеорных систем связи может передавать информацию на расстояниях до 2200 км между передатчиком и приёмником, при этом системы отличаются сложностью и устойчивостью к помехам, имеющим место в КВ-диапазоне.

Однако испытания одной из систем позволили сделать вывод, что на надёжность связи в полярной области оказывают сильное влияние поглощения на частотах, близких к 40 МГц, и возникает повышенное число ошибок из-за быстрых флуктуаций сигнала, вызванных полярными сияниями.

Системы метеорной связи могут обеспечить и повышенную надёжность в условиях воздействия преднамеренных помех. Действительно, в системе метеорной связи автоматически выбираются те следы, которые создают зону приёма для сигналов, излучаемых с противоположной станции, в точке расположения приёмной станции. Любой другой приёмник должен располагаться в той же зоне приёма, если он служит для перехвата информации. Естественно, что при этом он будет принимать эту информацию лишь тогда, когда выполняются заданные условия приёма. Чем дальше приёмник

будет находиться от станции метеорной связи, тем сложнее будут выполняться условия, например, за сотни километров приниматься будет малая часть информации. С другой стороны, эта особенность представляет собой известную защиту от помех, создаваемых посторонними станциями.

Для передачи информации в системах метеорной связи используются сравнительно простые антенные системы. Удовлетворительные результаты были получены при использовании как для приема, так и для передачи одиночных пятиэлементных директорных антенн типа «волновой канал».

В метеорных линиях весьма желательно иметь идентичные диаграммы излучения передающей и приемной антенн или использования одной и той же антенны как для передачи, так и для приема. Необходимо помнить о хорошей развязке приемной и передающей аппаратуры. Наибольший коэффициент использования канала получается при отклонении диаграмм направленности приемной и передающей антенн в сторону от плоскости большого круга небесной сферы, причем наивыгоднейший угол направления антенн зависит от времени суток и географического расположения линии связи. Эти отклонения достигают 30° , что подтверждает сферически равномерное гелиоцентрическое распределение орбит метеоров. В процессе работы было установлено, что при мощности передатчиков 500–2000 Вт, в диапазоне частот 30–70 МГц, на трассах протяженностью около 1000–1500 км удавалось обеспечить среднюю скорость передачи примерно 30–60 слов/мин при скорости передачи во время существования вспышки, в 10–20 раз превосходящей среднюю.

При увеличении мощности передатчика возможно значительное увеличение скорости передачи во время существования метеорного следа. Так, с помощью передатчика мощностью 20 кВт при несущей частоте 40 МГц удалось достигнуть скорости передачи информации в 200 000 Бод во время существования метеорной вспышки.

Следует упомянуть о таком существенном недостатке этого вида связи, как прерывистость. Интервалы между вспышками могут доходить до нескольких минут, что не всегда является допустимым. Среди других недостатков можно отметить также относительную сложность аппаратуры. Обычно используемый частотный диапазон – от 20 МГц до 500 МГц.

С середины 1960-х годов метеорная радиосвязь ограничено использовалась военными организациями. Так, в 1965 году была создана система «СОМЕТ» (COmmunication by MEteor Trails), для связи штабов НАТО

в Нидерландах, Франции, Италии, ФРГ, Великобритании, Норвегии. Скорость передачи сигнала по метеорному каналу зависела от плотности метеорных следов и составляла 115–310 бит в секунду. С появлением спутниковой связи метеорная радиосвязь практически утратила значение.

В настоящее время используется в основном в научных целях и любительской радиосвязи. Следует, однако, отметить, что некоторое количество специализированных радиосетей и в настоящее время использует метеорную радиосвязь: так, в западной части США действует сеть автоматических метеостанций SNOTEL (около 500 автономных станций), связанных с главными центрами обработки данных в штатах Айдахо и Юта. Аналогичная сеть существует на Аляске.

1. Программно-определяемая радиосистема (англ. Software-defined radio, SDR) – радиотелекоммуникационная система, которая может быть настроена на произвольную полосу частот и принимать различные виды модулированного сигнала, состоящая из программируемого оборудования с программным управлением.

В настоящее время система SDR представляет большой интерес как в теоретической, так и в практической сфере: SDR выполняет значительную часть цифровой обработки сигналов на обычном персональном компьютере или на ПЛИС. Цель такой схемы – радиоприемник или радиопередатчик произвольных радиосистем, изменяемый путем программной переконфигурации.

Программное радио применяется в военной сфере и сфере беспроводных услуг, так как позволяет обслуживать большое количество абонентов одновременно. В SDR-оборудовании форма модулированного радиосигнала задается в программном обеспечении (ПО). Формируется цифровой сигнал, который затем с помощью широкополосного ЦАП преобразуется в аналоговый на промежуточной частоте (ПЧ).

В приемнике все происходит в обратном порядке. Широкополосный АЦП преобразует в цифровой вид множество узкополосных сигналов, попадающих во входной тракт приемника. В соответствии с встроенным ПО приемник извлекает, преобразует вниз и демодулирует сигналы каждого канала, т.е. технология SDR позволяет изменять эксплуатационные параметры радиооборудования на уровне ПО.

Технология SDR включает в себя комбинацию методов, затрагивающих аппаратную и программную части. Аппаратная часть включает многодиапазонные антенны и радиочастотные преобразователи; широкополосные ЦАП и АЦП; а обработка сигналов

ПЧ демодулированных сигналов и результирующего цифрового потока происходит с помощью программируемых процессоров общего назначения.

Традиционный аналоговый приемник, где АЦП преобразует сигнал с выхода аналоговых квадратурных каналов, имеет следующие недостатки: необходимость точной настройки; чувствительность к температуре и разбросу параметров компонентов; нелинейные искажения; сложность построения перестраиваемых фильтров и фильтров с подавлением более 60 дБ.

Но благодаря развитию современной полупроводниковой элементной базы, в первую очередь – АЦП и ЦАП, теперь можно преобразовывать сигнал непосредственно с выхода промежуточной частоты.

Достоинства SDR-приемника:

- не требует настройки;
- низкая чувствительность к температуре и разбросу параметров компонентов;
- простота реализации перестраиваемых фильтров с подавлением более 80 дБ;
- высокая точность и широкий диапазон перестройки фазы и частоты гетеродина.

Архитектура аппаратной части SDR представлена на рис. 3.

«RF-секция, IF-секция и секция базовой станции. RF-секция (называемая также RF front-end) включает только аналоговые аппаратные модули (в то время как две другие целиком содержат цифровую аппаратуру) и отвечает за передачу/прием радиосигнала. IF-секция отвечает за цифро-аналоговое преобразование и модуляцию/демодуляцию сигнала».

Архитектура программной части SDR представлена на рис. 4.

Функция программной части SDR сводится к распределению ресурсов аппаратных средств для их использования различными приложениями связи и трансляции протокола второго уровня вышестоящим протоколам (WAP, TCP/IP).

Устройства нулевого уровня поддержки (свидетельствующего о полном отсутствии поддержки SDR) представляют собой чисто аппаратные решения, отсюда и название – Hardware Radio.

«Первый уровень образован программно-управляемым оборудованием (Software Controlled Radio). Функции программного управления у этих устройств ограничены, тип модуляции или рабочий диапазон остаются постоянными. Использование нескольких программно-управляемых приемопередатчиков в одном устройстве позволяет организовать поддержку многостандартности: двухстандартные (GSM/CDMA) мобильные телефоны, а также двухдиапазонные точки доступа Wi-Fi».

«Второй уровень (Software Defined Radio) составляют собственно SDR-устройства. В них с помощью ПО можно управлять такими параметрами, как ширина полосы пропускания, тип модуляции, безопасность (например, хоппинг) в широком диапазоне частот. В настоящее время отдельные элементы, относящиеся к этому уровню, используются в базовых станциях операторов беспроводной связи. Ожидается, что ведущие производители оборудования широкополосного беспроводного доступа реализуют SDR в своих WiMAX-системах. В результате не возникнет проблем, например, с использованием оборудования, сертифицированного для диапазона 5,8 ГГц и даже, возможно, свыше 6 ГГц. В более отдаленные планы входит реализация SDR в абонентских терминалах».

«SDR Forum описал также и третий уровень, названный Ideal Software Radio – идеально программируемые радиоустройства. В этом оборудовании все процессы цифровые, за исключением (в случае мобильного телефона) таких аналоговых элементов, как антенна, микрофон и громкоговоритель. Подобные устройства пока не присутствуют на рынке, но именно с ними SDR Forum связывает качественный скачок в развитии технологии SDR».

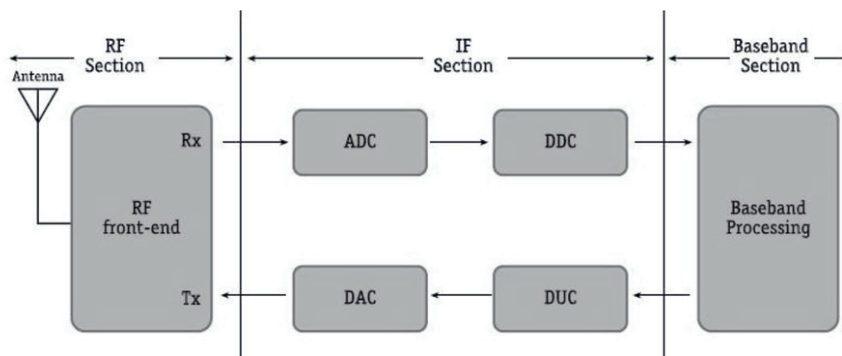


Рис. 3. Архитектура аппаратной части SDR

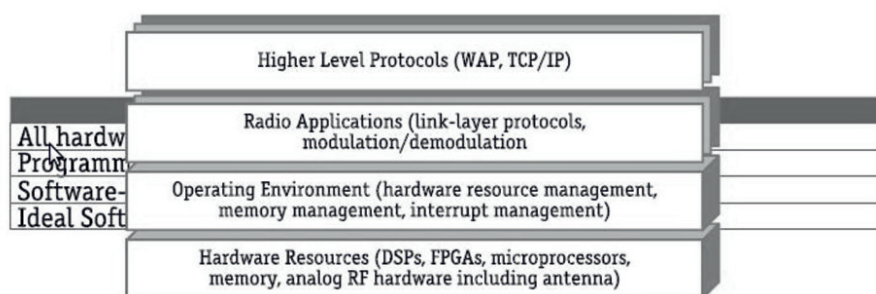


Рис. 4. Архитектура программной части SDR

«Четвертый уровень – Ultimate Software Radio (полностью программируемые радиоприемники). По определению SDR Forum, оборудование, соответствующее данному уровню, допускает полный контроль и управление трафиком, поддерживает широкий диапазон частот, радиоинтерфейсов и приложений. Способно мгновенно переключаться с одного радиоинтерфейса на другой, использовать систему GPS для отслеживания местоположения пользователя, обеспечивать трансляцию видео на мобильный терминал с ближайшей вещательной станцией, передавать спутниковый сигнал и т.д.»

В приемной аппаратуре построение дешевого и малощумящего аналогового тракта возможно только за счет ослабления требований по фильтрации и обеспечения всей необходимой избирательности в цифровом тракте. С учетом мультистандартного характера проектируемого устройства, которое к тому же может быть многоканальным, использование цифровой ПЧ представляется единственно возможным вариантом обработки принимаемого сигнала.

С передатчиком ситуация обстоит еще интереснее. Поскольку современные системы используют самые разнообразные схемы модуляции, требующие зачастую сложных и высокоточных схем формирования квадратурных компонент сигнала (зачастую многоканальных), сформировать их на нулевой частоте просто не представляется возможным.

Таким образом, использование технологии SDR обусловлено тем, что она позволяет обрабатывать и передавать сигналы с использованием разных частот и стандартов, выбор которых зависит от самых различных факторов.

Одна из первых систем Software-defined radio разрабатывалась американскими военными под названием SpeakEasy. Целью проекта было использование программной обработки для эмуляции более

10 существующих военных радиосистем, функционирующих в диапазоне от 2 до 20 МГц. Другой целью была возможность поддержки любых новых схем кодирования и модуляции, чтобы военные могли использовать более совершенные модуляции и кодирования.

Данная технология позволяет заменить огромное разнообразие существующих и разрабатываемых конструкций радиоприемников и трансиверов, как серийных, так и, прежде всего, любительских, построенных по сложной супергетеродинной схеме, на ограниченное число доступных аппаратных блоков, работающих под управлением разрабатываемого сообществом ПО. Это приведет к упрощению и удешевлению конструкций, существенному улучшению характеристик, поддержке любых видов модуляции, появлению большого количества сервисных функций, а также ускорит разработку, поскольку ПО может совершенствоваться одновременно всем сообществом. Такое стало возможно с появлением доступных быстрых ЦАП и АЦП и удешевлением ПЭВМ и DSP-процессоров.

Структурная схема приемника имеет вид, представленный на рис. 5.

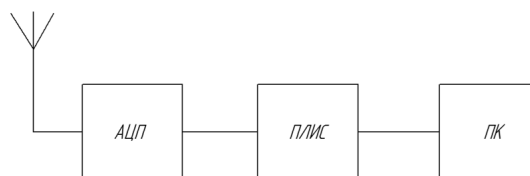


Рис. 5. Упрощенная структурная схема приемника на ПЛИС

В ПЛИС ведется вся обработка сигнала, на персональном компьютере осуществляется визуализация полученных результатов. За основу берется ПЛИС семейства ZYNQ фирмы Xilinx.

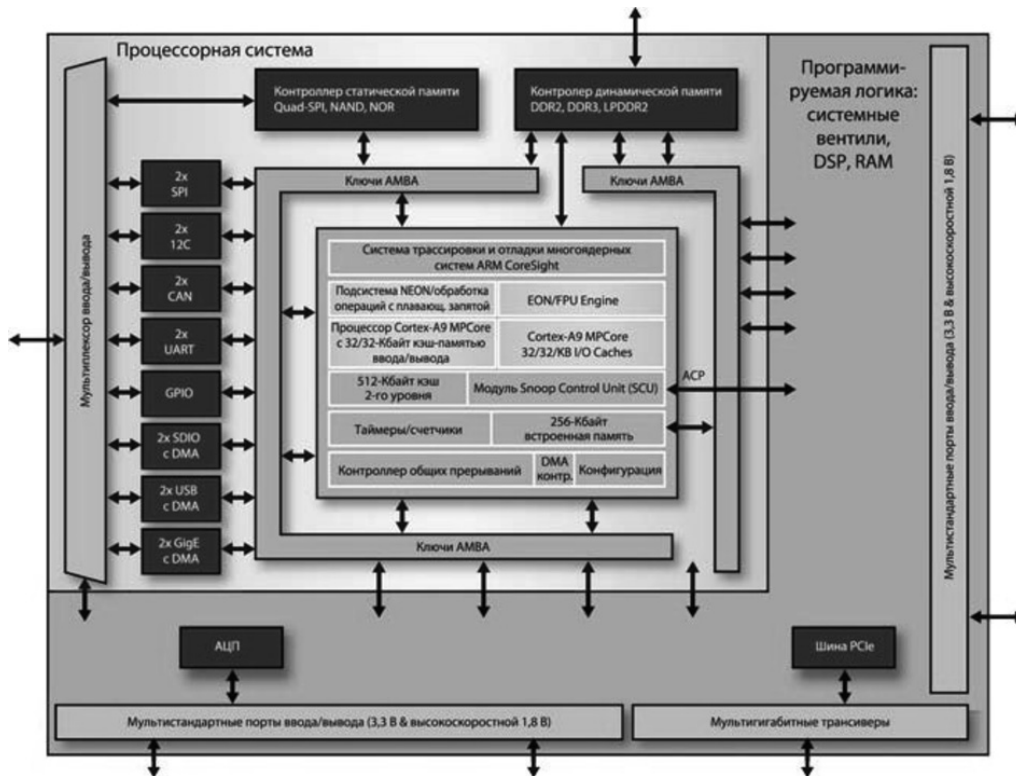


Рис. 6. Структурная схема ПЛИС семейства ZYNQ

Структурная схема ПЛИС семейства ZYNQ представлена на рис. 6.

Хотя поставщики ПЛИС и прежде предлагали устройства со встроенными аппаратными или программными процессорами, платформа Zynq-7000 EPP уникальна тем, что главной в ней является процессорная система ARM, а не программируемая логика. Это значит, что созданная компанией Xilinx система обеспечивает загрузку процессора по включению питания (до старта логики ПЛИС) и запускает необходимые операционные системы независимо от коммутирующей матрицы программируемой логики. После загрузки разработчики могут запрограммировать процессорную систему, чтобы при необходимости сконфигурировать программируемую логику.

Благодаря такому подходу в устройстве используется та же модель программирования, что и в стандартных полнофункциональных системах-на-кристалле (СНК) на базе процессора ARM.

2. Отладочная плата Zedboard и 1288K1T

Структурная схема отладочной платы Zedboard представлена на рис. 7.

Кроме того, возможна реализация в условиях импортозамещения на отечественной элементной базе: на интегральной 1288K1T(MF-01) фирмы ОАО НПЦ «ЭЛ-

ВИС». Структура микросхемы приведена на рис. 8.

Цифровой приемник MF-01 содержит 4 идентичных канала, реализующих функции гетеродинирования, децимации и канальной фильтрации входного сигнала.

Каждый из четырех каналов цифровой обработки включает цифровой гетеродин (NCO,X), два каскада фильтров-дециматоров с постоянными коэффициентами (CIC2, CICN), два каскада программируемых КИХ-фильтров-дециматоров 64-го порядка (DFIR64) и комплексный умножитель входного сигнала (FGAIN).

Цифровой квадратурный гетеродин обеспечивает перенос спектра входного действительного сигнала с промежуточной частоты на низкую частоту, умножая отсчеты входного сигнала на отсчеты опорного сигнала. В гетеродине реализовано управление частотой и фазой опорного сигнала.

Фильтры-дециматоры с фиксированными коэффициентами предназначены для предварительной децимации сигнала. Фильтры построены как фильтры с единичными коэффициентами (CIC – cascadedintegrator/comb). Применение этих фильтров эффективно при больших значениях коэффициента децимации. При необходимости эти фильтры могут быть выключены.

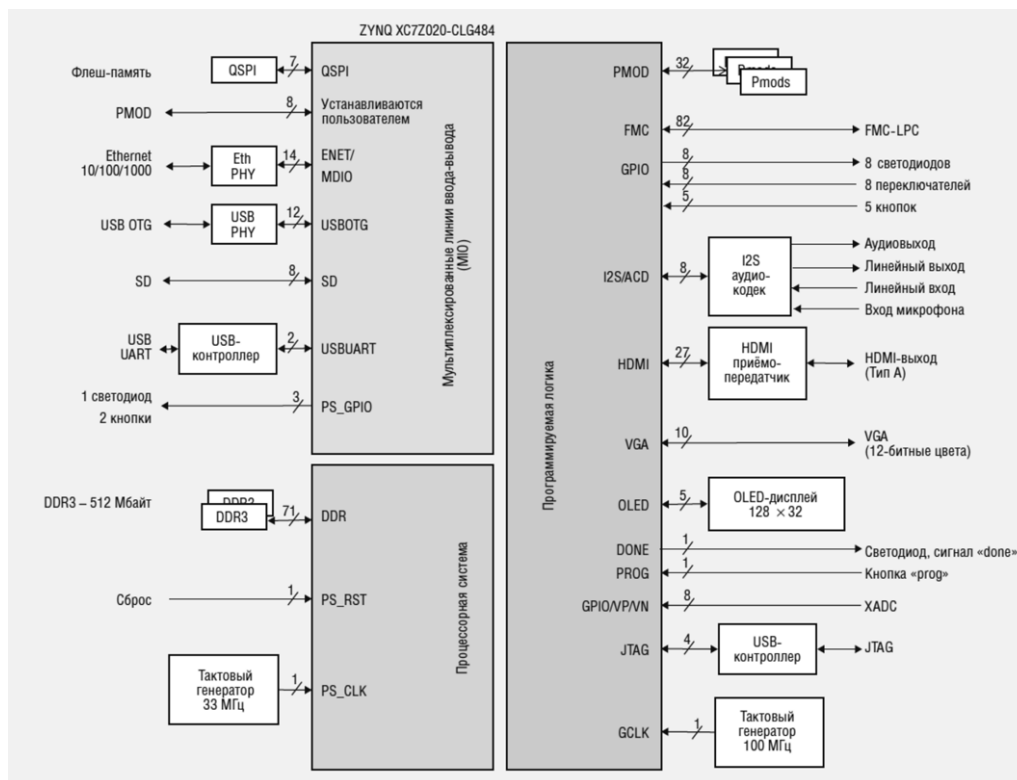


Рис. 7. Структурная схема отладочной платы Zedboard

Два каскада программируемых КИХ фильтров-дециматоров могут быть использованы для последующей децимации с небольшими коэффициентами децимации, коррекции искажений АЧХ, вызванных СИС-фильтрами-дециматорами и канальной фильтрации.

Каждый из каскадов КИХ-фильтров позволяет понизить частоту дискретизации от 1 до 16 раз. Максимальный порядок каждого фильтра – 64, тип фильтра – симметричный или антисимметричный. Фильтры способны обрабатывать два отвода за один период тактовой частоты СБИС. Фильтры имеют 32 программируемых коэффициента разрядностью 16 бит и реализованы как RCF фильтры (RAM CoefficientFilter). При тактовой частоте 100МГц частота дискретизации сигнала на выходе КИХ-фильтра 64-го порядка составляет более 3 МГц, и может быть увеличена за счет уменьшения порядка фильтра.

Комплексный умножитель выходного сигнала позволяет осуществлять плавную регулировку усиления канала и управление фазой выходного сигнала, что может быть использовано для улучшения динамического диапазона тракта обработки, построения АРУ или систем ФАР и ААР.

Маршрутизаторы потоков данных (МХ) позволяют объединять вычислительные ресурсы нескольких каналов в один для повышения производительности FIR-фильтров. Например, при объединении всех четырех каналов частота дискретизации сигнала на выходе FIR-фильтра 64-го порядка при тактовой частоте 100МГц составляет более 12 МГц.

В MF-01 предусмотрена синхронизация работы нескольких микросхем, включая синхронный пуск, останов, очистку блоков обработки, установку параметров гетеродина и комплексного выходного умножителя. Синхронизация нескольких микросхем позволяет использовать MF01 в системах ФАР и ААР. Кроме этого, реализована функция параллельной конфигурации нескольких микросхем.

Вывод обработанного сигнала осуществляется через 16 или 32 бит параллельного порта, или 4 или 8 бит линк-порта, управление осуществляется с помощью последовательного или параллельного порта. Разнообразие интерфейсов и режимов их работы, а также наличие встроенного буфера на 512 выходных отсчетов позволяют подключать MF01 к различным микропроцессорам и микроконтроллерам без использования дополнительной логики.

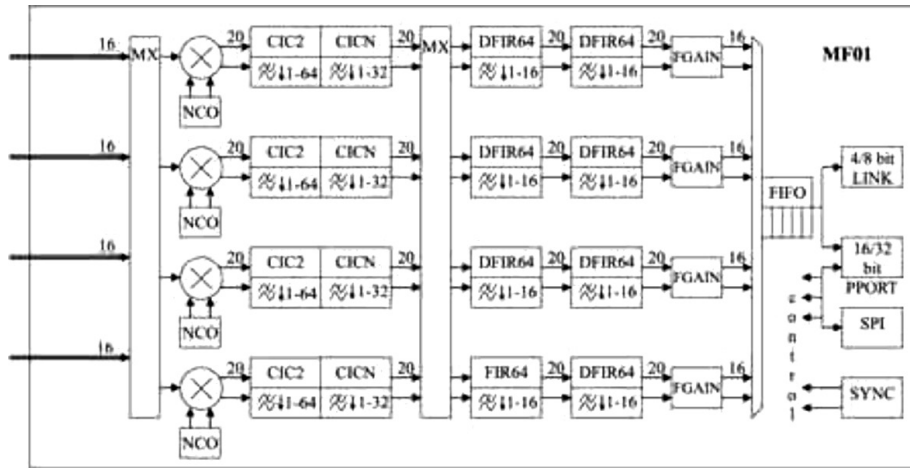


Рис. 8. Структура микросхемы 1288XK1T (MF-01)

Упрощенная структурная схема приемника для метеорной радиосвязи приведена на рис. 9.

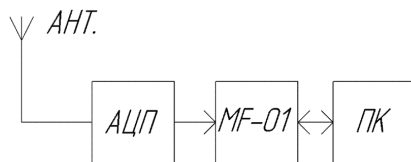


Рис. 9. Упрощенная структурная схема приемника на базе микросхемы 1288XK1T (MF-01) фирмы ОАО НПП «ЭЛВИС»

Программируемые цифровые фильтры и возможность объединения 4 каналов дают возможность построения широкополосных трактов. Используемое программное обеспечение на персональном компьютере, помимо возможностей приема информации и диагностики метеорного радиоканала, дает возможность построения спектрограмм принимаемых сигналов, что дает возможность изучения метеорных потоков и наблюдения за ними.

Заключение

Таким образом, системы метеорной связи в сравнении с радиолиниями ионосферного рассеяния обладают рядом преимуществ, среди которых:

- возможность обеспечения связи при сравнительно небольших мощностях передатчика (около 1 кВт) и простых антенных системах,
- повышенная скрытность связи и достаточно широкая полоса частот канала связи.

Технология SDR позволяет обрабатывать и передавать сигналы с использованием разных частот и стандартов, выбор которых зависит от самых различных факторов.

Список литературы

1. Казанцев Н. Метеорная радиосвязь на ультракоротких волнах. Сборник статей. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 287 с.
2. Калачёв А. Многоядерная конфигурируемая вычислительная платформа Zynq 7000. // Современная электроника. – 2013. – № 1. – С. 12–15.
3. Кашеев Б.Л., Бондарь Б.Г. Метеорная связь: [Учеб. пособие для спец. «Радиотехника»] // М-во высш. и сред. спец. образования УССР, учеб.-метод. каб. по высш. образованию, Харьк. ин-т радиоэлектроники им. М.К. Янгеля, 73 с. ил. 20 см, Киев: УМКВО, 1989.
4. Платформа Zynq 7000 URL: <http://www.russielelectronics.ru/developer-r/review/2189/doc/57818/> (дата обращения: 25.10.2015).
5. Рябов И.В., Толмачев С.В. Использование MatLab и Simulink для программирования ПЛИС семейства ZYNQ фирмы Xilinx в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи. // В сб. тр. 17 международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», DSPA-2015, Москва.
6. Рябов И.В., Толмачев С.В. SDR-приемник для метеорной радиосвязи // В сб. тр. 15 международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», DSPA-2013, Москва. 2013. – С. 13–17.
7. Рябов И.В., Толмачев С.В. SDR-приемник на FPGA для исследования радиолокационных отражений от полярных сияний. // В сб. тр. 16 международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», DSPA-2014, Москва.
8. Рябов И.В., Толмачев С.В. Применение программно-определяемого радио в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи. // В сб. тр. 21 международной научно-технической конференции «радиолокация, навигация, связь», RLNC-2015, Воронеж.
9. Четырехканальный цифровой SDR-приемник 1288XK1T URL: <http://multicore.ru/index.php?id=50> (дата обращения: 10.10.2015).
10. APA Style URL: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (дата обращения 25.10.2015).
11. GNU Radio URL: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki> (дата обращения: 21.10.2015).
12. PravilaTsitirovaniyaIstochnikov(Rules for the Citing of Sources) URL: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (дата обращения: 25.10.2015).
13. SDR-Forum URL: <http://www.wirelessinnovation.org> (дата обращения: 20.10.2015).
14. Software-defined radio URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio (дата обращения: 21.10.2015).