

Реализация цифровой системы приёма и обработки радиосигналов пассивной моноимпульсной радиолокационной станции

Дмитрий Иванников, Николай Потапов, Павел Тупиков

В данной статье представлена реализация цифровой системы приёма и обработки радиосигналов на базе модулей фирмы Signatес для работы в составе комплекса пассивной моноимпульсной радиолокационной станции, предназначенной для обнаружения, определения местоположения и параметров движения источников радиоизлучения.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных качеств современных комплексов обнаружения источников радиоизлучения (ИРИ) воздушного, наземного и морского базирования, обеспечивающих скрытность работы и повышение живучести, является отсутствие их главного демаскирующего признака – собственного излучения. В связи с этим разработка пассивных комплексов обнаружения ИРИ, работающих исключительно по излучению бортовых РЭС, является актуальной задачей.

В данной статье предлагается реализация системы цифрового приёма и обработки радиосигналов для работы в составе комплекса пассивной моноимпульсной радиолокационной станции.

НАЗНАЧЕНИЕ И ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ

Система предназначена для работы в составе комплекса пассивной моноимпульсной радиолокационной станции с целью обнаружения и определения местоположения, курса и параметров движения источников радиоизлучения воздушного, наземного и морского базирования.

Система имеет централизованную архитектуру, управляемую от центрального компьютера, на котором реализуются обработка радиолокационной информации, взаимодействие с рабочим

местом оператора, получение данных и управление режимами функционирования комплекса, а также сопряжение с внешними системами.

Разработанная система обеспечивает:

- обнаружение непрерывных и квазинепрерывных радиосигналов на промежуточной частоте (до четырёх одновременно с неперекрывающимися полосами в полосе 40 МГц) с уровнем от минус 15 дБ до плюс 40 дБ относительно уровня собственных шумов;
- определение параметров обнаруженных радиосигналов (центральной частоты, эффективной полосы, мощности, спектра, длительности, времени обнаружения, периода следования импульсов, закона внутриимпульсной модуляции);
- определение координат источников обнаруженных радиосигналов;

- документирование и архивацию информации;

- самоконтроль.

Выполнение указанных задач производится в режиме реального времени.

СОСТАВ СИСТЕМЫ И ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

Технические характеристики сигнала на выходе модуля промежуточной частоты, являющегося составной частью комплекса, приведены в табл. 1. Эти характеристики позволили сформировать критерии для выбора модулей цифрового приёма и обработки сигналов.

Исходя из основной задачи реализации данной системы с целью проверки разработанных технических решений (алгоритмов и программного обеспечения), выбор устройств для построения её

Таблица 1

Технические характеристики сигнала на выходе модуля промежуточной частоты комплекса

ХАРАКТЕРИСТИКА	ЗНАЧЕНИЕ
Центральная частота тракта (или промежуточная частота – ПЧ)	70 МГц
Ширина полосы пропускания тракта по уровню минус 3 дБ по отношению к центральной частоте	Не менее ±20 МГц
Максимальный уровень выходного сигнала приёмно-усилительного тракта при компрессии коэффициента усиления 1 дБ	Не более 0,25 В
Предельно допустимый уровень мгновенного значения входного сигнала	±0,75 В
Амплитудный динамический диапазон	Не менее 90 дБ
Уровень интермодуляционных составляющих третьего порядка при подаче сигналов на двух частотах с уровнем каждого на выходе тракта 0,125 В (минус 5 дБм) относительно уровней сигналов	Не более минус 30 дБ

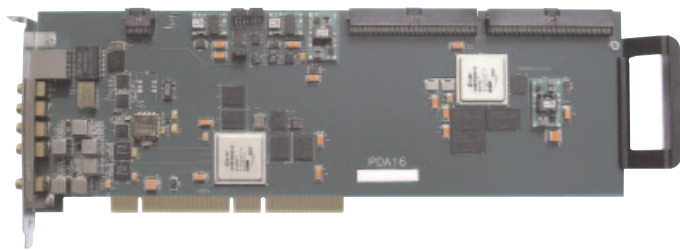


Рис. 1. Плата аналого-цифрового преобразования PDA16-60-120-MS

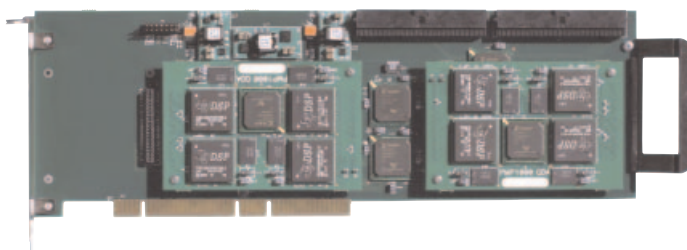


Рис. 2. Плата цифровой обработки сигналов RMP1000-2

аппаратной части был произведен среди готовых модулей, представленных на рынке такими фирмами, как Nallatech, Xilinx, «Инструментальные системы», Signatec. Наилучшее соотношение технических характеристик и стоимости было представлено компанией Signatec.

Компания Signatec специализируется на разработке IBM PC совместимых плат и систем высокоскоростного ввода-вывода для таких приложений, как радарные системы, неразрушающий контроль, спектроскопия и других, требующих обработки большого объема данных в реальном времени. Согласно анонсированному компанией Signatec данным, пропускная способность плат серии PDA достигает 500 Мбайт/с и рассматривается возможность достижения значения 1 Гбайт/с, а параллельное применение нескольких таких плат позволяет получить ещё более впечатляющие значения интегральной производительности. Кроме плат, которые могут быть установлены в любой IBM PC совместимый компьютер, компания Signatec поставляет измерительные комплексы IC1000D с массивом памяти для хранения до 18 терабайт данных. Основанные на специализированной шине SAB, эти системы могут в реальном времени обрабатывать потоки данных и телеметрии объемом до 2 гигабайт в секунду.

На основе проведенного анализа модулей цифрового приёма и обработки компании Signatec был скомпонован блок (крейт), ключевыми компонентами которого стали:

- корпус IPC-611 MB-00X/PS-400 ATX-ZB фирмы Advantech;
- кросс-плата PCE-7B13-64B1E (4×PCI, 6×PCI-X 64 бит/66 МГц) фирмы Advantech – 1 шт.;
- одноплатный компьютер PCE-5120 (PICMG 1.3, Intel 945G) фирмы Advantech с центральным процессором Intel® Core™ 2 Duo E6400 (2,13 ГГц) – 1 шт.;
- платы ввода данных (аналого-цифрового преобразования) PDA16-60-120-MS компании Signatec – 2 шт.;

● платы цифровой обработки сигналов RMP1000-2 компании Signatec – 2 шт. Приведенный состав аппаратной части разрабатываемой системы по оценкам разработчиков позволял реализовать масштабируемую, гибкую и стабильную систему обработки.

Далее представлены основные технические характеристики платы аналого-цифрового преобразования PDA16-60-120-MS (рис. 1) и платы цифровой обработки сигналов RMP1000-2 (рис. 2).

PDA16-60-120-MS

- Тип разъёмов входных сигналов, сигналов запуска, тактового и выходного сигналов: SMA.
- Шкала напряжений входных сигналов: 2,50 В; 1,67 В; 1,00 В; 667 мВ; 400 мВ; 267 мВ.
- Входное сопротивление: 50 Ом.
- Разрядность: 16 бит.
- Частота оцифровки: до 160 МГц.
- Пользовательская ПЛИС: Virtex-4 FX60 или FX35 (зависит от модификации платы).
- Ширина полосы входного сигнала: 50 МГц.
- Частота сигнала внешнего тактирования: 10–160 МГц.
- Высокоскоростная параллельная шина SAB: 500 Мбайт/с, в зависимости от области применения возможно до 1 Гбайт/с (64 бит/125 МГц).
- Внешняя шина: 64-разрядная шина PCI-X (до 100 МГц).
- Потребляемая мощность: +12 В, 400 мА; +5 В, 1,5 А; +3,3 В, 2,3 А.

RMP1000-2

- Количество процессоров: 9 Texas Instruments 320C6414.
- Тактовая частота процессоров: 1 ГГц.
- Объём внутренней памяти: 576 Мбайт (64 Мбайт SDRAM на каждый процессор).
- Пропускная способность шины SAB: 500 Мбайт/с, в зависимости от области применения возможно до 1 Гбайт/с (64 бит/125 МГц).
- Внешняя шина: 64-разрядная шина PCI-X (до 100 МГц).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АППАРАТНЫХ РЕСУРСОВ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

Исходя из поставленных при разработке системы задач, распределение аппаратных ресурсов целесообразно выполнить следующим образом:

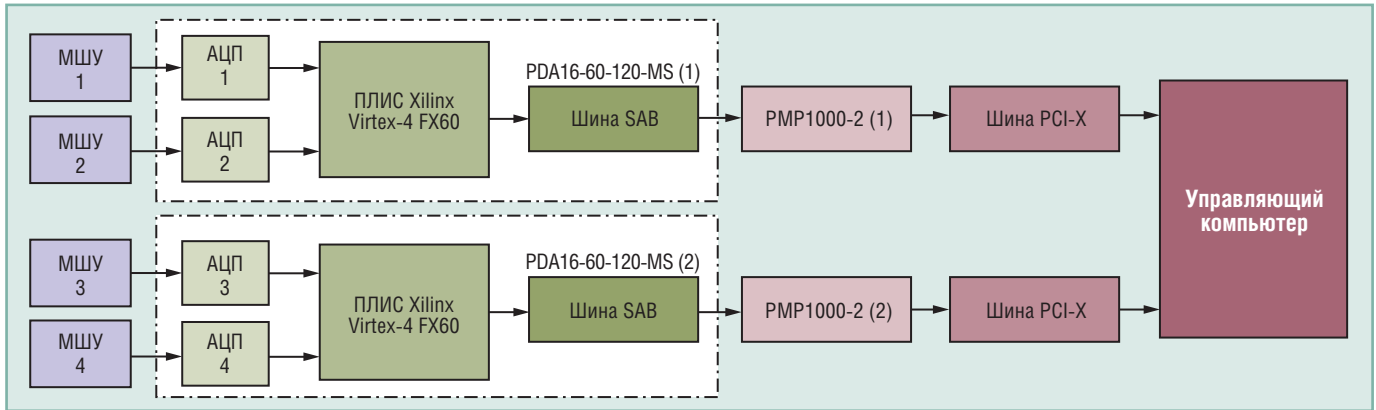
- PDA16-60-120-MS (2 шт.) – формирование цифрового потока данных с четырёх каналов моноимпульсной РЛС, спектральный анализ, преобразование частоты, фильтрация, измерение амплитуды во временной области, определение закона модуляции сигналов;
- RMP1000-2 (2 шт.) – измерение параметров сигналов во временной области, буферизация данных, формирование кодограмм обнаруженных сигналов;
- управляющий компьютер на базе платы PCE-5120 (1 шт.) – управление модулями обработки сигналов PDA16-60-120-MS и RMP1000-2, решение задачи местоопределения источников сигналов, запись формуляров обнаруженных сигналов, интерфейс с оператором, передача/приём данных между блоками комплекса.

Структурная схема рассматриваемой системы представлена на рис. 3.

Приведённое распределение аппаратных ресурсов позволяет получить высокопроизводительную систему обработки сигналов и чёткую синхронизацию работы всех её модулей.

С целью предварительной оценки возможностей выполнения системой функциональных задач проведено моделирование с использованием пакетов MatLab 6.5, Microsoft Visual C++ 6.0, Code Composer Studio 6000 следующих алгоритмов цифровой обработки сигналов:

- калибровки АЧХ приёмно-усилительного тракта (для обеспечения требуемой точности определения координат ИРИ);
- измерения параметров сигналов (центральной частоты, ширины спектра, времени прихода, амплитуды сигнала, длительности импульсов,



Условное обозначение:

МШУ – маломощный усилитель.

Рис. 3. Структурная схема системы

периода следования импульсов, законов модуляции и параметров внутриимпульсной модуляции, числа скачков фазы) – на основании полученных данных выполняется расчёт местоположения, курса и скорости ИРИ;

- регистрации, документирования и архивации информации, а также алгоритмов сопряжения с внешним потребителем (приём команд управления и выдачи формуляров, определяющих ИРИ).

СТРУКТУРА И ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Структурная схема цифровой обработки приведена на рис. 4.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов, реализованные в рассматриваемой системе, можно разделить на две части.

- 1. Линейная обработка.** В этой части производится преобразование частоты, а также определение спектральных характеристик, закона модуляции, уровня сигнала, временных характеристик поступающих сигналов. Для корректной линейной обработки уровень сигнала должен быть

не менее плюс 15 дБ относительно собственного шума.

- 2. Корреляционная обработка.** Используется для обнаружения, измерения уровня и временных характеристик сигналов. Уровень сигнала должен быть до минус 15 дБ относительно собственного шума.

Линейная обработка. Первоначальное обнаружение сигналов производится в спектральной области. БПФ на 1024 точки в связке со сложным адаптивным порогом позволяет получить динамический диапазон обнаружения до 60 дБ. Также по БПФ производится оценка частоты настройки цифрового преобразователя частоты и оценка необходимой

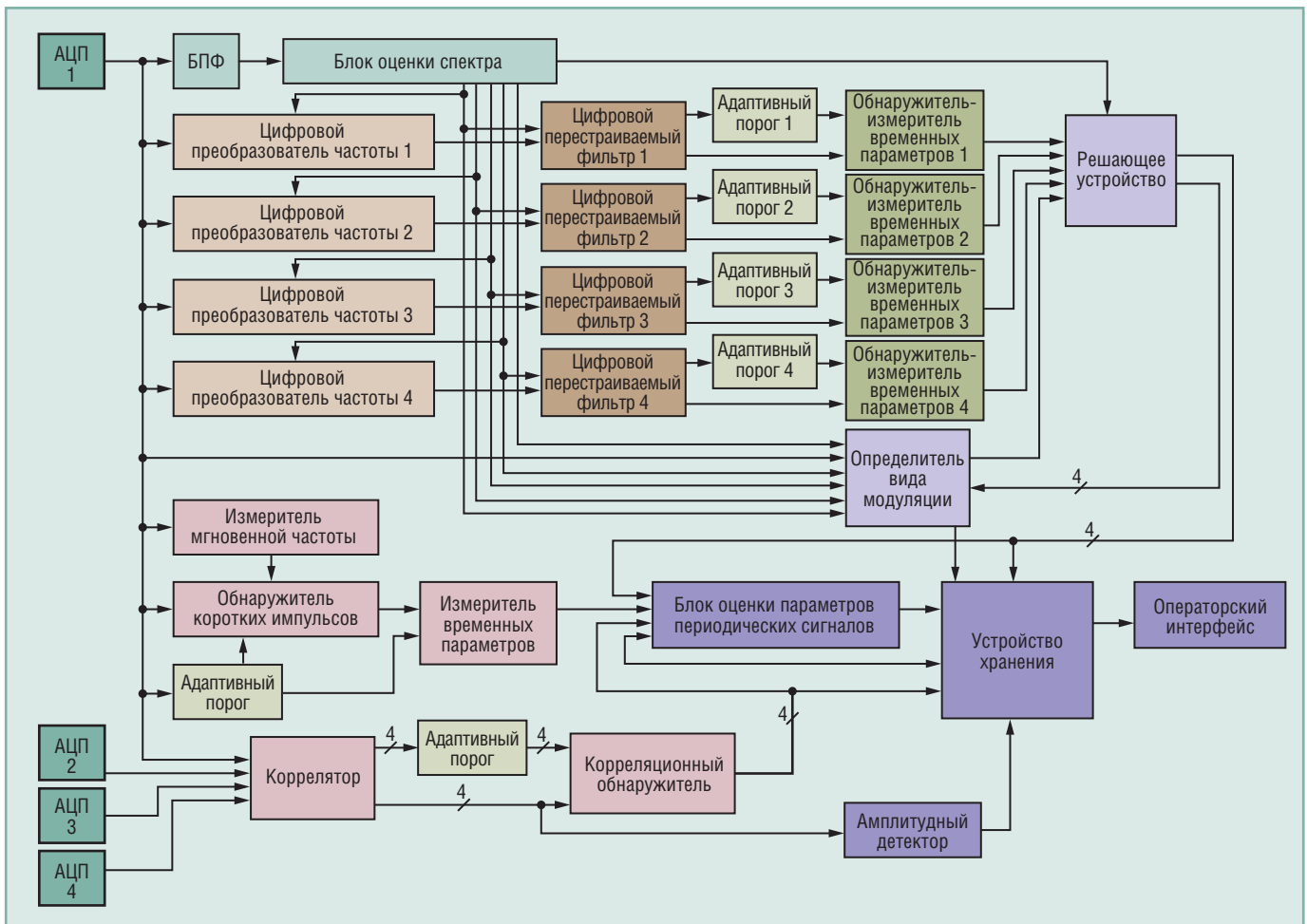


Рис. 4. Структурная схема цифровой обработки сигналов



Рис. 5. Оборудование рабочего места в процессе проведения испытаний системы

полосы пропускания цифрового пере-страиваемого фильтра. Далее для сигнала, полученного с выхода преобразователя частоты и цифрового фильтра, производятся необходимые измерения. Измеряемыми параметрами сигнала являются уровень, эффективная ширина спектра, центральная частота спектра, длительность, период повторения импульсов, закон модуляции и связанные с ним параметры – девиация фазы (при фазовой модуляции), глубина амплитудной модуляции, девиация частоты (при частотной модуляции), скважность и длительность импульсов при импульсной модуляции. Для более надёжного обнаружения сигналов, а также более точного определения временных параметров в схему введён адаптивный порог во временной области.

Корреляционная обработка. Обнаружение сигналов корреляционным методом имеет значительные преимущества, так как позволяет скомпенсировать часть внутренних шумов каждого из каналов, а также использовать длительное накопление сигнала, что в конечном итоге создаёт условия для расширения динамического диапазона обнаруживаемых сигналов. Динамический диапазон зависит непосредственно от размера временного окна, в котором производится накопление сигнала, при этом верхний предел размера окна устанавливается, исходя из требований к полосе пропускания корреляционного обнаружителя, и может динамически изменяться в процессе работы.

Программные коды для двух каналов приёмника размещены в ПЛИС, занимая при этом около 70% общей логики и 100% умножителей (XtremeDSP Slices).

Результаты обработки сигналов (формуляры, содержащие полную информацию об обнаруженных сигналах)

передаются из плат PDA16-60-120-MS по шине на процессорные платы RMP1000-2, где реализованы алгоритмы, извлекающие информацию о периодических сигналах, вторичная обработка радиолокационной информации, а также хранение и буферизация выходной информации перед передачей на рабочую станцию.

Для отладки программного обеспечения (ПО) ПЛИС использовался пакет Xilinx ISE совместно с ChipScore Pro, позволяющий вести диагностику ПО непосредственно в процессе работы устройства. Создание блоков БПФ, а также тригонометрических преобразований выполнено с помощью встроенной в Xilinx ISE утилиты Core Generator.

Оборудование рабочего места в процессе проведения испытаний системы показано на рис. 5.

Внешний вид аппаратной части разработанной системы цифрового приёма и обработки радиосигналов пассивной моноимпульсной радиолокационной станции приведён на рис. 6.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАТ PDA16-60-120-MS И RMP1000-2 И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

В процессе устранения проблем совместимости различных частей аппаратного комплекса и достижения требуемой производительности системы были выявлены некоторые особенности плат PDA16-60-120-MS и RMP1000-2 и выработаны соответствующие технические решения, оптимизирующие их применение.

1. При первом включении комплекса обнаружилось, что совместная работа плат ввода данных PDA16-60-120-MS и плат обработки данных RMP1000-2 не



Рис. 6. Внешний вид аппаратной части системы цифрового приёма и обработки радиосигналов пассивной моноимпульсной радиолокационной станции

обеспечивалась на одном контроллере PCI-X. Смена режимов работы PCI-X, частот, прерываний к положительному результату не привела. Для решения данной проблемы разделили платы PDA16-60-120-MS и PMP1000-2, подключив платы ввода данных на один контроллер, а платы обработки данных — на два других контроллера.

2. Серьёзные трудности возникли при расчёте взаимных корреляционных функций (ВКФ) сигналов в каналах, находящихся на разных платах ввода данных. Для реализации ВКФ необходимо объединение в одном вычислительном модуле сигналов со всех четырёх каналов АЦП. Однако реализовать это не удалось. Основная причина этого в том, что в настоящее время в платах PMP1000-2 не реализована возможность приёма данных по высокоскоростной шине SAB одновременно от двух плат ввода данных. Целесообразность обеспечения такой возможности в ближайшем будущем разработчиками Signatec не вызывает сомнений. Нам же пришлось искать своё решение, и оно было найдено на основе использования непосредственно шины SAB и физических уровней сигналов на ней с разработанным нашей фирмой протоколом передачи данных.

3. Ряд особенностей рассматриваемых модулей связан с их быстродействием и пропускной способностью шин передачи данных. В условиях нашего применения значения 1 Гбайт/с для скорости обмена данными по шине SAB достичь не удалось и на практике было получено только паспортное значение порядка 500 Мбайт/с. Кроме того, при приёме и обработке сигналов в реальном времени было выявлено, что

плата PMP1000-2 не справляется с приёмом и обработкой потока отсчётов входного сигнала на уровне 380 Мбайт/с. Архитектура этой платы подразумевает, что управляющий процессор коммутирует потоки данных и распределяет задачи между остальными 8 процессорами, однако именно управляющий процессор и является слабым звеном данной архитектуры. С целью снижения потока данных, то есть передачи готовых формуляров, а не временных отсчётов сигнала, часть обработки перенесена в ПЛИС.

4. Интересным решением при разработке системы стала реализация синхронного непрерывного запуска АЦП на плате PDA16-60-120-MS.

Следует отметить, что запуск АЦП на плате PDA16-60-120-MS реализован тремя способами: по внешнему сигналу запуска, от импульса компаратора, настраиваемого по уровню входного сигнала, или программно (установкой бита запуска в регистре). В связи с отсутствием источника внешнего сигнала запуска рассматривались второй и третий способы синхронного запуска АЦП на двух платах PDA16-60-120-MS.

При решении задач обнаружения сигналов при отношении сигнал/шум $\ll 1$ и необходимости обеспечения широкого амплитудного динамического диапазона (то есть в условиях, когда усиление входного тракта нельзя устанавливать высоким для исключения его перегрузки) в случае реализации второго способа осуществить синхронный запуск АЦП на двух платах PDA16-60-120-MS не представляется возможным по причине преобладания шумовой компоненты в сигналах различных каналов.

Использование программного запуска АЦП (третий способ) в чистом виде на двух платах PDA16-60-120-MS не позволяло добиться единовременного начала их работы, что определялось временной задержкой выполнения программного кода. Кроме того, программный запуск АЦП реализован для получения ограниченного пакета данных и не позволяет получать данные непрерывно.

Для решения данной проблемы была разработана следующая схема запуска. Сигнал внешнего запуска первой платы соединён с цифровым выходом триггера запуска второй платы. Первая плата ввода после инициализации входит в режим ожидания сигнала внешнего запуска. После инициализации второй платы на ввод данных и получения импульса запуска от компаратора, настроенного на

нулевой уровень входного сигнала, вторая плата переключается в режим приёма и одновременно по внешнему сигналу переключает в режим приёма первую. Для повышения надёжности принимаемых данных тактовые сигналы всех АЦП засинхронизированы, для чего у плат PDA16-60-120-MS присутствуют внутренние и внешние входы/выходы синхронизации.

При анализе работы АЦП также отмечен повышенный уровень помех (сигналов с частотами 33,3; 25 МГц и уровнем до минус 65 дБ относительно максимума шкалы), изменяющийся при переключении шкалы АЦП.

5. Особенностью рассматриваемых плат является и то, что в них не предусмотрена возможность прошивки через шину PCI. Реализация такой возможности позволила бы отказаться от использования внешних программаторов и частых переключений программатора от одной платы к другой, что значительно сократило бы время прошивки и сделало бы отладку системы более удобной.

Также хотелось бы отметить целесообразность реализации на всех платах высокоскоростной цифровой шины, например Ethernet, и универсальной низкоскоростной шины, например EIA-485 или EIA-422, что позволило бы управлять внешней аппаратурой с плат цифровой обработки сигналов, минуя все проблемы и задержки, связанные с операционной системой компьютера.

В целом стоит отметить высокую производительность и универсальность рассмотренных плат компании Signatec, а также хорошо продуманные, с точки зрения программиста, драйверы. На основе подобных высокоинтегрированных плат легко наращивать мощность вычислительной системы для достижения более высоких результатов.

Вывод

Итак, при реализации системы цифрового приёма и обработки радиосигналов и в процессе её работы в составе комплекса пассивной моноимпульсной радиолокационной станции подтверждены корректность и высокая эффективность разработанных технических решений и алгоритмов, а также целесообразность применения серийных цифровых модулей на этапе разработки макетов сложных радиотехнических систем для минимизации временных и финансовых затрат. ●

E-mail: dsp@inbox.ru