

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЛС НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

А.А. Кузин, А.В. Миронов, А.Г. Рындык, С.Б. Сидоров, В.Д. Ястребов

Введение

Развитие технологий цифровой обработки сигналов (ЦОС) существенным образом изменило подход разработчиков к проектированию систем ЦОС радиолокационных систем. В настоящее время такие системы выполняются в виде аппаратно-программных комплексов, включающих управляющий компьютер, систему внутри и межпериодной цифровой обработки сигналов, а также рабочие места операторов и устройства сопряжения с внешними системами. Система внутри и межпериодной ЦОС строится на основе использования быстродействующих аналого-цифровых преобразователей, программируемых логических интегральных микросхем и цифровых сигнальных процессоров.

В данной работе приведен опыт практической разработки такой системы коллективом сотрудников с участием авторов статьи. Работа выполнялась в рамках работ по модернизации действующего парка РЛС. Требовалось реализовать обработку сигналов в двухчастотной трехкоординатной РЛС кругового обзора. Для измерения угла места использовался фазовый метод измерения, что потребовало реализовать два канала приема на каждой частоте. Кроме того, системы защиты должны были обеспечивать традиционную для обзорных РЛС защиту от активных шумовых (АШП) импульсных и пассивных помех. Для защиты от АШП использовались две компенсационные антенны. Всего система содержала восемь основных и восемь компенсационных каналов приема.

Общая Архитектура системы

При выборе архитектуры системы авторы руководствовались необходимостью разработать аппаратно-программный комплекс, который может быть легко адаптирован для широкого класса радиолокационных применений. Разработанную систему (рис.1) можно классифицировать как централизованную архитектуру, управляемую от центрального компьютера, на котором реализуется вторичная обработка радиолокационной информации (РЛИ), взаимодействие с рабочими местами операторов, получение данных и управление режимами функционирования блока цифровой обработки сигналов, управление и контроль радиолокатора, а также сопряжение с внешними системами.

Обобщен практический опыт разработки системы цифровой многоканальной обработки радиолокационных сигналов. Система выполнена в виде аппаратно-программного комплекса, который может быть легко адаптирован для широкого класса радиолокационных применений и имеет централизованную архитектуру, управляемую от центрального компьютера, на котором реализуется вторичная обработка радиолокационной информации и управление режимами функционирования блока ЦОС, а также сопряжение с внешними системами. Блок внутри и межпериодной ЦОС выполнен в стандарте compact PCI на FPGA и DSP процессорах и обеспечивает аналого-цифровое преобразование, согласованную фильтрацию, защиту от импульсных, активных шумовых и пассивных помех, обнаружение и вычисление параметров принимаемых сигналов в четырех когерентных каналах обработки.

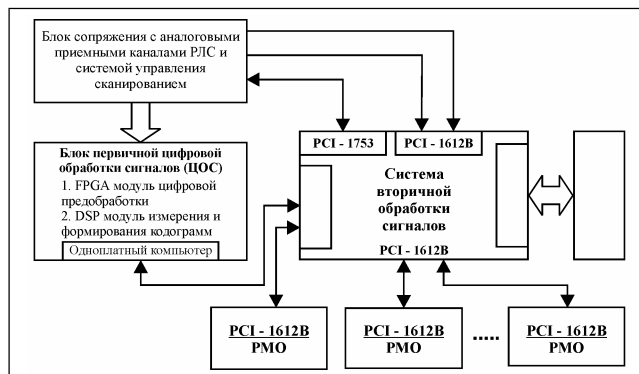


Рис.1 Архитектура системы обработки

В качестве линий связи использовался последовательный интерфейс RS-422 для обмена данными и RS-485 для обмена с датчиками системы сканирования. В качестве компьютеров вычислительной системы и рабочих мест операторов использовались промышленные компьютеры класса Pentium 4 под управлением операционной системы Linux. При необходимости они могут быть заменены на любые аналогичные, обладающие требуемой производительностью и имеющие в своём составе адаптеры последовательных портов для сопряжения между собой.

Блок ЦОС был реализован в крейте Compact PCI и включал: одноплатный компьютер (ОК) с электронным флеш-дискон под управлением ОС Linux; четыре платы цифровой обработки на FPGA-процессорах (использовались ПЛИС семейства Stratix фирмы Altera); две платы цифровой обработки на DSP процессорах L1879BM1 (использовались платы МЦ 4.04 производства НТЦ «Модуль»). Выбор такой архитектуры позволил получить высокую производительность коммуникаций за счёт использования шины PCI для обмена между ОК и МЦ 4.04

и дополнительной шины для объединения между собой плат цифровых приемников и DSP модулей МЦ 4.04. Кроме того, выбранный конструктив имеет высокую механическую и электрическую надёжность и имеет аналогии в разрабатываемой отечественной аппаратуре для жёстких условий эксплуатации. Использование трех различных типов вычислительных элементов позволяет сочетать высокую производительность FPGA-процессоров, хорошую программируемость сигнальных процессоров с возможностями отладки и лёгкостью сопряжения одноплатного управляющего компьютера крейта.

Вся обработка была условно разделена на три этапа. Первый включал быстрое аналого-цифровое преобразование на промежуточной частоте, цифровую обработку принимаемых сигналов в соответствии с алгоритмами обработки (цифровую согласованную фильтрацию, защиту от импульсных, активных шумовых и пассивных помех, амплитудное детектирование и межпериодное накопление). Эта обработка выполнялась на специально разработанных четырехканальных платах цифрового приема и заканчивалась формированием кодограмм, содержащих отсчеты модулей и фаз комплексных огибающих сигналов во всех каналах обработки.

На втором этапе производилось нормирование вероятности ложных тревог, формирование кодограмм сигналов, превысивших порог обнаружения, и по этим кодограммам производилось вычисление параметров принимаемых сигналов, включая дальность, азимут и угол места цели. Для измерения угла места использовался

фазовый метод измерения, в соответствии с которым угол места измерялся по фазовому сдвигу сигналов в двух каналах обработки, имеющих смещенные фазовые центры в вертикальной плоскости.

Для реализации второго этапа обработки были использованы 4-х процессорные платы МЦ4.04 на процессорах Л1879ВМ1. В результате второго этапа обработки формировались кодограммы обнаруженных отметок, которые являлись исходными для третьего этапа (траекторной обработки), реализованного на компьютере класса Pentium 4.

Модуль ЦОС на FPGA-процессорах

Модули цифрового приема на FPGA процессорах были изготовлены ЗАО «Инструментальные системы». На каждой плате было реализовано 4 когерентных канала приема для обработки сигналов двух частотных и двух фазовых приемных каналов. Аналогичная плата использовалась для обработки сигналов 4-х компенсационных каналов (по два компенсационных канала на каждой частоте). Таким образом, для обработки сигналов одной антенны (во всем комплексе их могло быть две) требовалось две платы на FPGA-процессорах.

На рис.2 показана структура обработки, реализованной на платах с FPGA-процессорами. В цифровом приемнике после дискретизации на промежуточной частоте (30МГц) осуществляется формирование отсчетов комплексной огибающей принимаемого сигнала и понижение частоты дискретизации до значения, определяемого шириной спектра сигнала (300кГц).

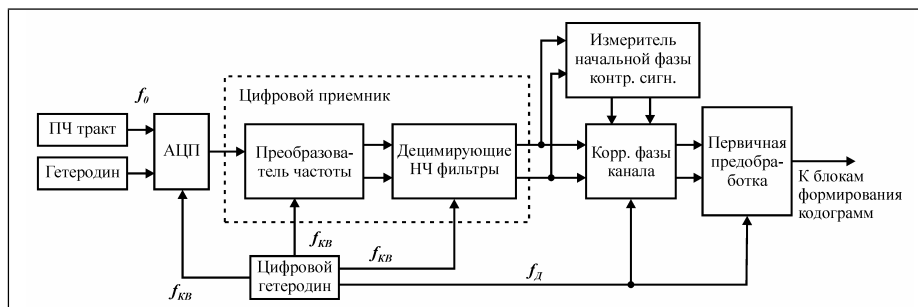


Рис. 2. Структура канала цифрового приема многоканальной РЛС.

В каждом из основных каналов после аналого-цифрового преобразования и амплитудно-фазовой коррекции (АФК) каналов с использованием контрольного сигнала осуществляется: бланкирование боковых лепестков диаграммы направленности антенны (ПСБЛ); адаптивная двухканальная компенсация шумовых помех

(АКШП) с бланкированием несинхронных импульсных помех (НИП); адаптивная череспериодная компенсация пассивных помех, амплитудное детектирование (АД) и некогерентное накопление (НН) сигнальных пакетов.

Структура системы защиты от комбинированных помех в одном частотном канале приведена на рис.3.

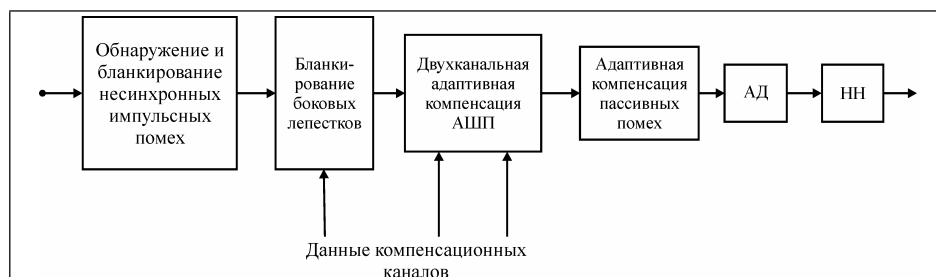
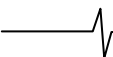


Рис.3. Структура системы защиты от комбинированных помех.



Кроме рассмотренной обработки на платах с FPGA-процессорами была реализована межканальная ЦОС, включающая: вычисление взаимных корреляционных моментов комплексных огибающих в фазовых каналах, соответствующих двум частотам приема и несущим информацию об угле места цели; межпериодного корреляционного момента комплексных огибающих в каждом частотном канале, несущего информацию о частоте Доплера цели; взаимных корреляционных моментов, несущих информацию об угле места источника АШП и оценок дисперсии АШП и межканальных корреляционных моментов АШП, необходимых для работы пеленгационного канала.

В результате обработки на платах с FPGA-процессорами формировались данные всех каналов дальности с частотой дискретизации, определяемой шириной спектра сигнала. Эти данные передавались для последующей обработки на платы с DSP процессорами.

Процессорный модуль на DSP процессорах

На платах с DSP процессорами (МЦ 4.04) были реализованы алгоритмы нормирования вероятности ложных тревог и измерения параметров обнаруженных целей. В результате обработки формировались кодограммы для каждой обнаруженной цели, содержащие следующие параметры: время задержки сигнала (дальность до цели); азимут цели; угол места цели (угломестный фазовый сдвиг); амплитуду сигнала; длину сигнального пакета; доплеровский набег фазы за период зондирования.

Обработка на DSP процессорах заканчивались передачей кодограмм на систему вторичной обработки РЛИ.

Модуль вторичной обработки РЛИ

Модуль вторичной обработки предназначен для решения задач вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ) в реальном времени. Основными из них являются следующие задачи:

- траекторная обработка РЛИ о воздушных объектах;
- определение государственной принадлежности;
- распознавание воздушных объектов;
- регистрация РЛИ, результатов вторичной обработки и действий операторов на рабочих местах;
- сопряжение с внестанционными потребителями вторичной информации;
- взаимодействие с другими модулями системы (рабочими местами операторов, модулем ЦОС);
- контроль состояния системы.

Конструктивно модуль «Обработка» был выполнен на промышленном компьютере класса Pentium 4. Взаимодействие с модулем ЦОС осуществляется по последовательному интерфейсу RS-422 с использованием платы последовательного интерфейса PCI-1612B. Взаимодействие с набором рабочих мест операторов осуществляется по последовательным интерфейсам RS-422 и RS-485 (для выносных РМО) с использованием двух плат последовательного интерфейса PCI-1612B. Взаимодействие с блоком сопряжения с антен-

ными устройствами осуществляется по последовательному интерфейсу RS-485 с использованием платы последовательного интерфейса PCI-1612B, а также платы PCI-1753. Сопряжения с внестанционными потребителями осуществляется посредством программируемого канального модуля ПКМ386-4 с шиной ISA.

Модуль «Обработка» может работать как в штатном режиме, так и автономном, при отсутствии какой-либо аппаратной связи с другими компонентами системы. В автономном режиме РЛИ формируется подсистемой имитации, входящей в состав модуля. Кроме этого предусмотрена возможность имитации одного РМО с помощью специальной встроенной подсистемы. При этом моделируется поступление с РМО различных команд управления.

При выборе архитектуры программного обеспечения модуля «Обработка» принимались в расчет следующие факторы:

- значительное число решаемых модулем задач с различными степенями критичности выполнения;
- большое количество потребителей и источников информации с ее асинхронным поступлением;
- требование функционирования в реальном времени.

С учетом перечисленного выше программное обеспечение модуля «Обработка» представлено в виде многопоточного приложения (рис. 4).

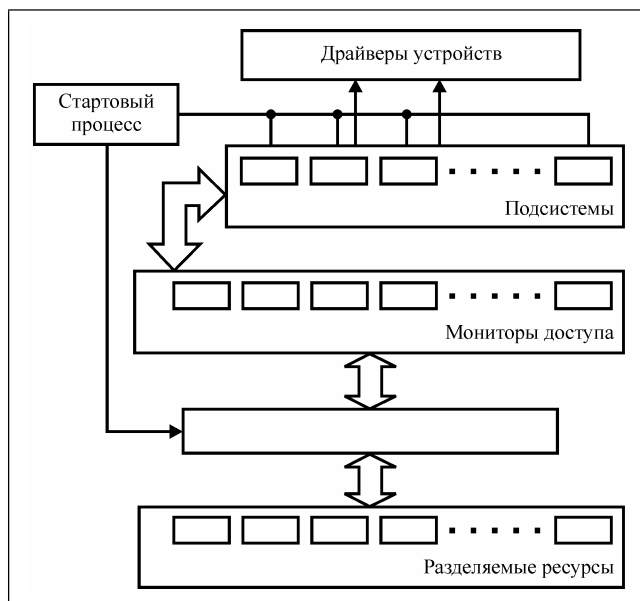


Рис.4. Архитектура ПО модуля «Обработка»

При разработке таких приложений ключевым этапом является распределение задач между потоками и организация их взаимодействия. В основу ПО модуля «Обработка» положена одна из основных моделей подобного рода приложений – модель «без лидера». Эта модель находит свое применение, когда набор источников поступления информации строго определен, и управляющая подсистема отсутствует. В рамках данной модели каждая подсистема отвечает за свой ввод (обнаружение наступления события), обеспечивает требуемую обработку события и инициирует наступление событий для других подсистем приложения.

Программное обеспечение модуля «Обработка» выполнено под управлением операционной системы Linux, с ядром версии 2.4.25. При этом каждая подсистема представлена отдельным потоком управления thread («облегченным процессом»). Важнейшим из требований, предъявляемых к системам реального времени, является быстрая реакция на наступление события. В тоже время общеизвестно, что операционная система Linux не является системой реального времени, поскольку обычные пользовательские процессы могут выполняться без вытеснения ядром до 10 миллисекунд в силу принятой в операционной системе схемы диспетчеризации. Вместе с тем наряду с «обычными» процессами могут быть созданы специальные процессы с ненулевыми статическими приоритетами. Эти приоритеты назначаются в соответствии с требованиями, предъявляемыми к конкретной задаче. Планировщик операционной системы Linux осуществляет планирование таких процессов другими дисциплинами, в частности дисциплиной «циклическое RR-планирование». Данная дисциплина применяется для процессов реального времени и обеспечивает более быстрый отклик высокоприоритетных процессов по сравнению с обычными процессами. В ПО модуля «Обработка» для потоков управления была использована рассмотренная дисциплина планирования, которая для задачи модуля обеспечивает приемлемые времена отклика на события.

Взаимодействие подсистем по управлению и обмену данными осуществляется через «разделяемые ресурсы», представленные общими для потоков областями памяти. Каждый ресурс имеет свой идентификатор, структуру и предназначен для хранения определенной информации. Для доступа к ресурсам подсистемы используют мониторы Хоара, по одному на каждый вид ресурса. Эти интерфейсные элементы предоставляют безопасный и надежный доступ к операциям над ресурсами через свои методы. Специальный программный контроллер обеспечивает централизованное управление всеми ресурсами и операциями над ними. При этом контроллер позволяет одновременный доступ к нему через мониторы Хоара со стороны нескольких подсистем.

Модуль РМО

Модуль «Рабочее место оператора» предназначен для решения задач отображения различной радиолокационной информации и управления функционированием системы со стороны оператора в реальном времени. Основными из них являются следующие задачи:

- отображение первичной и вторичной РЛИ о воздушных объектах (ВО);
- поддержка режимов отображения – масштабирование, смещенный центр, центр по ВО;
- взаимодействие с модулем «Обработка»;
- управление работой модуля ЦОС;
- управление встроенным имитатором радиолокационной обстановки модуля «Обработка»;
- управление подсистемой вторичной обработки модуля «Обработка»;

– отображение диагностической информации по состоянию системы.

Конструктивно каждый модуль «РМО» реализован на ПЭВМ Pentium 4. Взаимодействие с модулем «Обработка» осуществляется по последовательному интерфейсу RS-422 для локальных РМО и RS-485 для выносных РМО с использованием платы последовательного интерфейса PCI-1612B (рис.1).

Модуль «РМО» работает в режиме взаимодействия с модулем «Обработка». Программное обеспечение модуля «РМО» представлено комплексом взаимодействующих процессов (рис.5). В модулях «РМО» и «Обработка» задействован широкий спектр один и тех же компонент, таких как математические преобразования и кодограммы обмена. Это позволило с одной стороны существенно сократить общее время разработки, а с другой упростить внесение изменений в систему. Программное обеспечение модуля «РМО» выполняется под управлением операционной системы Linux, с ядром версии 2.4.25. В качестве графической среды используется X Window System и библиотека OpenMotif.

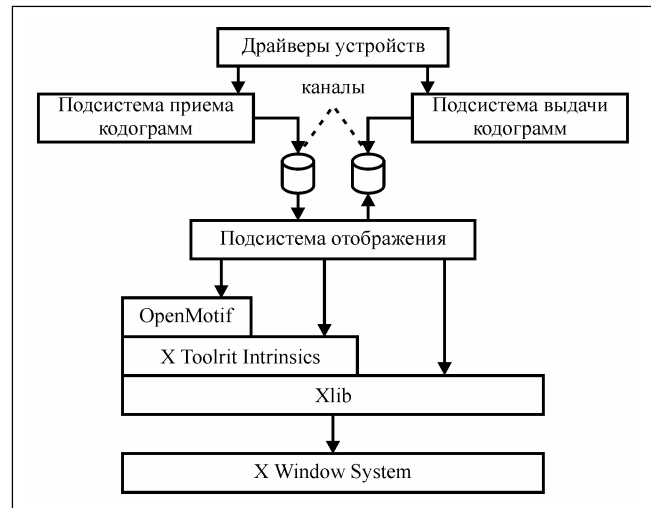


Рис. 5. Архитектура ПО модуля «РМО».

Заключение

Опыт выполненной разработки показал, что на основе современных технологий ЦОС возможно создание эффективной и относительно недорогой системы цифровой обработки и отображения радиолокационной информации обзорной РЛС.

Использование ПЛИС семейства Stratix фирмы Altera позволило реализовать на одной плате 4-х каналный цифровой приемник со всем комплексом традиционных систем защиты от активных шумовых, импульсных и пассивных помех.

Система стабилизации вероятности ложных тревог (СУЛТ) и измерение параметров целей были реализованы на DSP процессорах Л11879ВМ1. Их производительности в составе 4-х процессорной платы МЦ4.04 оказалось достаточно для сопряжения цифровых приемников с системой вторичной обработки и обеспечения траекторной обработки и отображения информации на рабочих местах комплекса в реальном времени.