

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОАСТРОНОМИИ, РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.96

В. В. ВИНОГРАДОВ, В. А. ВОЛКОВ, Р. В. КОЖИН,
С. В. СОСНИЦКИЙ, Д. М. ВАВРИВ, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ,
Е. В. БУЛАХ, П. В. УСИК, А. И. КУЗИН

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: vavriv@rian.kharkov.ua, vin@rian.kharkov.ua

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ЦИФРОВОЙ ПРИЕМНИК-АНАЛИЗАТОР ИМПУЛЬСОВ

В статье описан опыт разработки цифрового приемника-анализатора импульсов. Измерительный комплекс имеет модульную структуру и состоит из трех функционально независимых подсистем: радиочастотного тюнера, цифрового анализатора импульсов и системы записи и хранения данных. Сверхширокополосный тюнер охватывает диапазон частот от 0.4 до 18 ГГц. Высокопроизводительный анализатор импульсов регистрирует до 2 миллионов импульсов в секунду в реальном времени. Система записи способна записывать в течение 40 мин необработанные данные и результаты обработки на скорости до 3 ГБ/с. Данный комплекс идеально подходит для использования в радиолокации, радиоастрономии, спектроскопии, а так же в системах мониторинга радиоэфира и в измерительно-калибровочной аппаратуре.

Ключевые слова: широкополосный приемник, цифровая обработка сигналов, частотно-временной анализ

1. Введение

Непрерывный прогресс в области цифровой техники и источников высокочастотного излучения на протяжении последнего времени определяет стремительное развитие радиолокационных систем, систем передачи информации, беспроводных коммуникационных комплексов и т. д. Естественно, что этот процесс сопровождается активным внедрением новых технологий в телекоммуникационную индустрию, а также в военную и разведывательную технику. В силу этого требования к радиоконтрольной и измерительной аппаратуре, обеспечивающей мониторинг и анализ состояния радиоэфира, постоянно возрастают. Такие системы используются для радиоконтроля в целях обеспечения безопасности и правомерности использования радиочастотного спектра (одна из важнейших функций государства), в измеритель-

но-калибровочной аппаратуре, а также в военной сфере в различных комплексах радиотехнической разведки [1] для гарантированного обнаружения работы и идентификации типа радиолокационной станции.

Радиоаппаратура для мониторинга радиоэфира должна иметь хорошую чувствительность, большой мгновенный динамический диапазон принимаемых сигналов [2–5] в широкой полосе частот и перекрытия этой полосы с высокой скоростью частотного сканирования [5], обычно до 1 ГГц/с и более. Многоканальная обработка в широкой полосе частот [5–8] требует высокой производительности цифрового сигнального процессора, а локальная система записи и хранения данных должна иметь достаточный объем и обеспечивать пропускную способность по приему и записи до нескольких терабайт в секунду. Всем этим требованиям соответствует, а по некоторым показателям занимает лидирующие позиции приемник-анализатор импульсов, разработанный в Радиоастрономическом институте НАН Украины.

© В. В. Виноградов, В. А. Волков, Р. В. Кожин,
С. В. Сосницкий, Д. М. Ваврив, А. Ю. Васильев,
Е. В. Булах, П. В. Усик, А. И. Кузин, 2015

Поток оцифрованных данных с 4 выходных каналов сверхширокополосного радиочастотного тюнера [9, 10] достигает 30 Гбит/с. Цифровая система обработки способна в реальном времени зарегистрировать до 2 миллионов импульсов с формированием формуляра свойств каждого импульса, сжимая входной поток в 60 и более раз. Объем и пропускная способность системы записи и хранения позволяют в течении 40 мин записывать поток необработанных оцифрованных данных.

Статья организована следующим образом. Во втором разделе описана структура и состав комплекса. Радиочастотный (РЧ) тюнер детально описан в отдельной публикации [10], поэтому настоящей работе дается краткое описание функциональности и характеристик прибора как части комплекса. В этом разделе дается также подробное описание программно-аппаратной части цифрового анализатора импульсов (ЦАИ) и системы записи и хранения данных (СЗХД), рассмотрены конфигурация потоков данных и основные этапы обработки. В третьем разделе обсуждается алгоритм обнаружения и оценки параметров индивидуальных импульсов, лежащий в основе обработки в реальном времени данных в ЦАИ. В заключении приведены результаты работы и рассмотрены основные области применения разработанного приемника-анализатора с учетом достигнутых характеристик и функциональности данного комплекса.

2. Структура и аппаратная часть приемника

В состав описываемого приемника-анализатора входит сверхширокополосный РЧ тюнер, высокопроизводительный ЦАИ и СЗХД. Общая блок-схема широкополосного приемника-анализатора импульсов приведена на рис. 1.

Аналоговые сигналы с четырех выходов, одного широкополосного (ШП), и трех узкополосных (УП 1/2/3), промежуточных частот РЧ тюнера подаются на соответствующие входы блоков аналого-цифровых преобразователей (АЦП) анализатора импульсов. Задачей ЦАИ является обработка всех четырех каналов данных с целью обнаружения и определения параметров импульсов. Оцифрованные сигналы на промежуточной частоте (ПЧ) с выходов тюнера (необра-

ботанные данные) и результаты обработки данных (параметры всех зарегистрированных импульсов) всех четырех каналов передаются в СЗХД. Учитывая, что максимальный суммарный поток данных может составлять до нескольких гигабайт в секунду, достаточно сложной задачей является не только их запись на энергонезависимый носитель информации, но и передача данных от блока ЦАИ в систему записи. Передача такого потока данных (~ 30 Гбит/с) не имеет на данный момент готового программно-аппаратного решения. С другой стороны, канал передачи данных желательно было бы организовать на базе каких-либо стандартных интерфейсов [11], так как это значительно облегчило бы написание программных драйверов устройств интерфейсов ЦАИ и системы записи. Кроме того, такое решение упростило бы техобслуживание приемника-анализатора, поскольку для этого требуется поставка и замена только стандартных аппаратных модулей. Канал передачи данных между ЦАИ и системой записи построен на основе четырех 10-гигабитных Ethernet интерфейсов. Три из них образуют один логический канал связи для передачи необработанных данных ШП канала (~ 22 Гбит/с), четвертый интерфейс используется для создания нескольких логических каналов связи для передачи необработанных данных трех УП каналов, а также для передачи результатов обработки (дескрипторов импульсов (ДИ)) всех четырех каналов (суммарно ~ 8 Гбит/с).

Далее представленный раздел содержит более подробную информацию о каждой из подсистем приемника-анализатора.

2.1. РЧ тюнер

РЧ тюнер подробно описан в отдельной работе [10], здесь же приведем только краткое описание его характеристик, необходимое в дальнейшем изложении материала. Тюнер осуществляет частотную селекцию и преобразование радиочастотных сигналов диапазона $0.4 \div 18$ ГГц в сигналы промежуточной частоты (1650 ± 500) МГц для ШП канала и $(160 \pm 20/10/5)$ МГц для трех УП каналов приема. Центральная частота узкополосных каналов всегда находится в пределах мгновенного входного диапазона частот ШП канала. Тюнер включает встроенные цепи калибровки усиления и чувствительности с точностью 1 дБ.

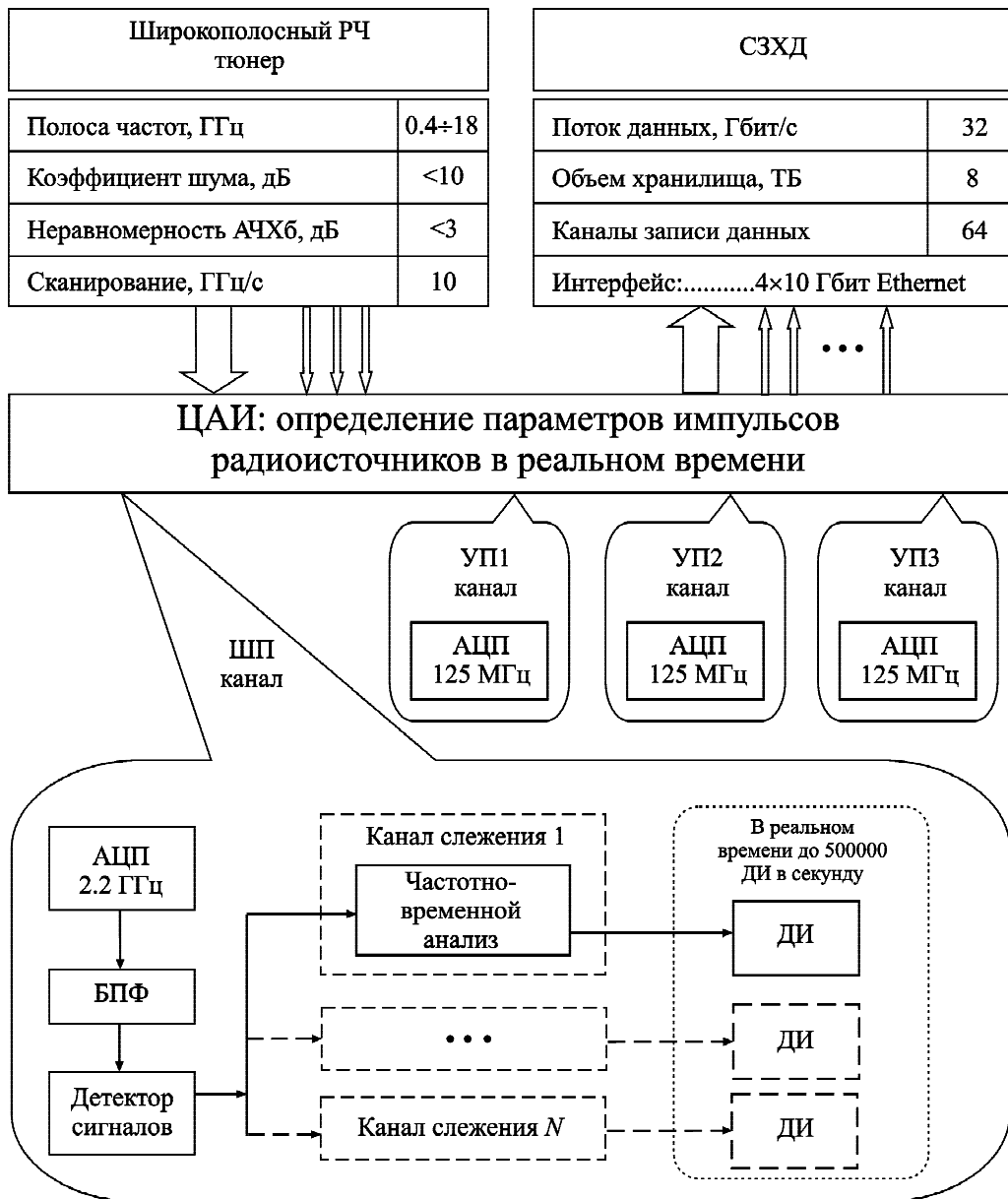


Рис. 1. Структура широкополосного приемника-анализатора импульсов

Применение передовой элементной базы и оригинальные схемотехнические решения позволили решить главную проблему – обеспечение требуемых характеристик РЧ тюнера (см. табл. 1) в достаточно широкой полосе частот 0.4÷18 ГГц.

Тюнер имеет встроенный одноплатный компьютер на основе быстро развивающейся в последнее время платформе Xilinx MicroBlaze soft-core [12], работающей под управлением операционной системы Xilkernel. Программа управления тюнером осуществляет контроль над всеми внутренни-

ми модулями тюнера: гетеродинами, фильтрами, усилителями и пр., а также предоставляет Built-in-Test данные внешнему управляющему устройству. В данной системе тюнер контролируется блоком цифровой обработки сигналов, который описан в следующем разделе, по стандартному интерфейсу 1 Гбит Ethernet. Управление осуществляется с помощью специально разработанного бинарного протокола прикладного уровня, команды которого позволяют настраивать каналы тюнера:

- центральная частота ШП канала (0.65÷16.5 ГГц),

Таблица 1. Характеристики РЧ тюнера

Диапазон входных частот	0,4 ÷ 18 ГГц
Число входов	1
Число выходов ПЧ	4 (1 ШП канал и 3 УП канала)
ПЧ широкополосного выхода	(1650 ± 500) МГц
ПЧ узкополосного выхода (независимо переключаемая в каждом из УП каналов)	(160 ± 20/10/5) МГц
Коэффициент шума	< 10 дБ
Диапазон регулировки усиления в ШП канале	15 ÷ 30 дБ с шагом 1 дБ
Диапазон регулировки усиления в УП канале	15 ÷ 40 дБ с шагом 1 дБ
Точность внутренней калибровки усиления и чувствительности	± 1 дБ
Неравномерность частотной характеристики	< 3 дБ
Диапазон регулировки входного аттенюатора	0 ÷ 70 дБ с шагом 10 дБ
Шаг перестройки центральной частоты в ШП канале	100 МГц
Время перестройки частоты в ШП канале	< 10 мс
Шаг перестройки центральной частоты в УП канале	1 кГц
Время перестройки частоты в УП канале	< 10 мкс
Уровень фазовых шумов, вносимых цепями тюнера при отстройке 10 Гц/10 кГц/1 МГц	< -50 дБн · Гц ⁻¹ / -110 дБн · Гц ⁻¹ / -120 дБн · Гц ⁻¹
Мощность внутренних паразитных сигналов, не связанных с входным сигналом	< -80 дБм
Односигнальный динамический диапазон	> 60 дБ
Уровень негармонических составляющих выходного сигнала	< -60 дБн
Чувствительность встроенных логарифмических видеодетекторов	< -65 дБм

- центральные частоты УП каналов в пределах полосы ШП канала,
- ослабление по общему входу тюнера,
- усиление ПЧ тракта независимо для всех каналов,
- полосы УП каналов (40, 20 и 10 МГц).

2.2. Цифровой анализатор импульсов

ЦАИ предназначен для оцифровки аналоговых сигналов с выходов тюнера и последующей обработки этих данных. ЦАИ осуществляет одновременную оцифровку всех выходных сигналов на промежуточных частотах тюнера: одного ШП канала в полосе 1 ГГц и трех УП каналов с выбираемой полосой – 10, 20, 40 МГц (см. рис. 1). ШП канал оцифровывается на частоте 2.2 ГГц с разрешением 8 бит, УП каналы – на частоте 125 МГц с разрешением 16 бит. Таким образом, суммарный входной поток необработанных данных в ЦАИ составляет ~ 3 ГБ/с.

Оцифрованные временные профили сигналов всех четырех каналов являются входными данными для процедуры обнаружения импульсов

и определения их параметров. В качестве такой процедуры используется специально разработанный конвейерный частотно-временной алгоритм, с помощью которого происходит обработка данных в реальном времени. Набор параметров импульса, определяемых данным алгоритмом, именуется дескриптором импульса (ДИ). ДИ содержит следующую информацию об импульсе:

- несущая частота,
- внутриимпульсная модуляция (да/нет),
- амплитуда импульса,
- время прихода,
- длительность импульса или признак непрерывного излучения.

При обнаружении длительности импульса, которая превышает максимально определяемую длительность, считается, что зарегистрирован источник с непрерывным излучением.

Разработанный алгоритм обнаружения и определения параметров импульсов описан в Разделе 3, там же приведены пределы и точности измерений параметров, составляющих ДИ. Этот алгоритм, реализованный в аппаратной части ЦАИ, решает основную задачу производитель-

ности устройства: регистрация до 2 миллионов импульсов в секунду в реальном времени.

2.2.1. Программно-аппаратная реализация ЦАИ

ЦАИ имеет модульную архитектуру и построен на основе VPX-шины (стандарт VITA 46.0). ЦАИ имеет два модуля производства фирмы Curtiss-Wright Controls, Inc.: одноплатный компьютер (SBC) VPX-185 и вычислительный модуль HPE-720. Оба модуля имеют backplane VPX-типа, используют интерфейс sRIO для межмодульного взаимодействия и оснащены двудерными процессорами MPC8640/1D, работающими под управлением RTOS VxWorks 6.8 в режиме ассиметричной многопроцессорности (AMP).

Упрощенная блок-схема аппаратной составляющей анализатора импульсов приведена на рис. 2. Сигналы с широкополосного выхода ПЧ тюнера поступают на модуль АЦП ADC512-01L-D5H, ко-

торый подключен к одному из FMC разъемов (стандарт VITA 57) расположенных на плате HPE-720. Модуль ADC512-01L-D5H имеет 2 АЦП ADC083000 (3GSPS/8-bit) производства National Semiconductor и оцифровывает ШП сигнал с частотой 2.2 ГГц. Ко второму FMC разъему подключен модуль FMC-516-A0000400 производства Curtiss-Wright Controls, Inc., который содержит 4 АЦП 250MSPS/16-bit. Этот блок АЦП предназначен для оцифровки аналоговых сигналов с трех узкополосных выходов ПЧ тюнера. Максимальная полоса УП сигналов составляет 40 МГц, частота оцифровки – 125 МГц.

Вычислительный модуль HPE-720 имеет две микросхемы FPGA (Field-Programmable Gate Array) Virtex-5 SX240T LX220T/330T фирмы Xilinx: FPGA0 и FPGA1 (рис. 2). Оцифрованный ШП сигнал поступает на обработку на один из модулей на базе ПЛИС (программируемая логичес-

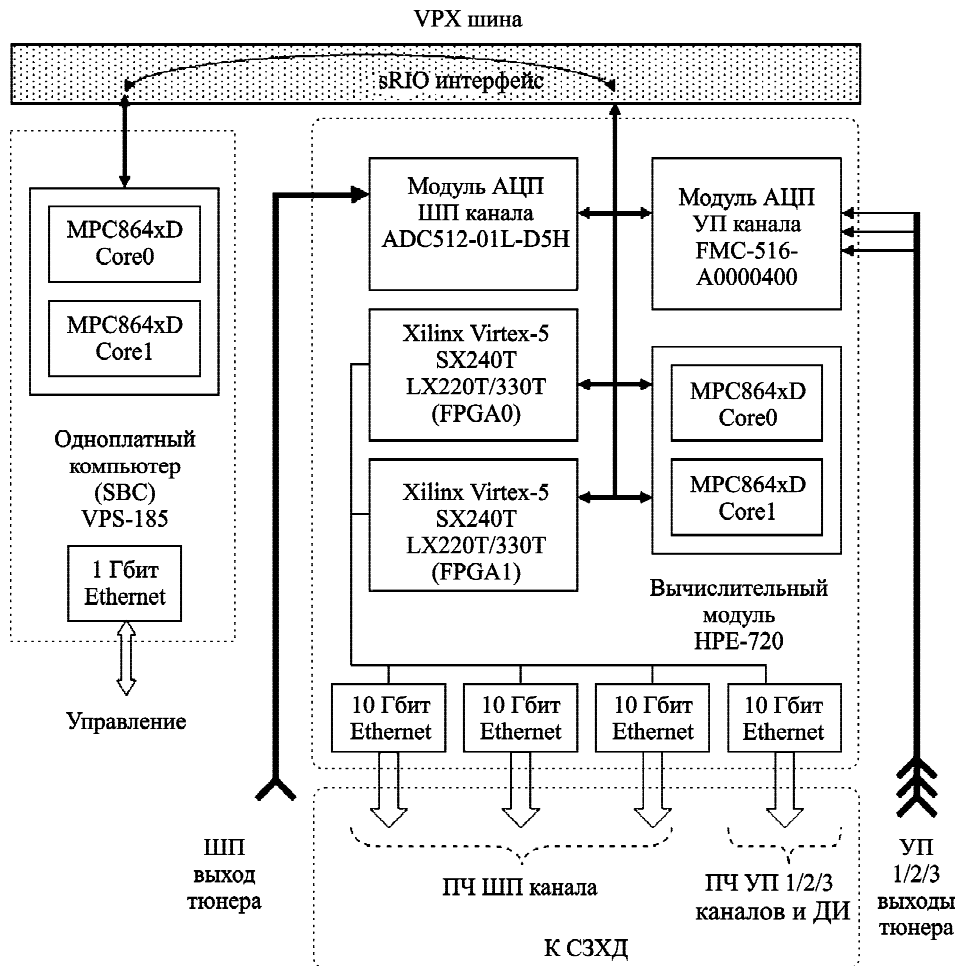


Рис. 2. Блок-схема аппаратной части ЦАИ

кая интегральная схема) – FPGA0. Оцифрованные три УП сигнала обрабатываются во втором модуле ПЛИС – FPGA1.

Два модуля ПЛИС производят обработку оцифрованных данных всех четырех каналов в реальном времени с помощью конвейерного частотно-временного алгоритма, описанного в Разделе 3. В каждом из четырех каналов (ШП и УП1/2/3) вычислительный модуль ЦАИ способен зарегистрировать и определить параметры до 500000 импульсов в секунду. Таким образом, суммарная производительность системы, если измерять ее в ДИ в секунду, составляет 2 миллиона ДИ в секунду.

2.2.2. Передача данных в систему записи

При разработке цифровых систем обработки данных возникает проблема передачи большого объема данных. Как правило, это потоки необработанных данных, представляющих собой оцифрованные аналоговые сигналы и/или результаты обработки. В рассматриваемом случае ЦАИ необходимо передать в СЗХД (см. рис. 1) суммарный поток данных со скоростью ~ 3 ГБ/с. В разработанном приемнике-анализаторе импульсов эта задача была решена следующим образом.

Чтобы передать необработанные данные ШП канала (2.2 ГБ/с) используются три 10 Гбит Ethernet интерфейса. Передача данных от ЦАИ организована на аппаратном уровне в микросхемах программируемой логики (FPGA 0/1, см. рис. 2). Для повышения эффективности передачи данных по Ethernet интерфейсам аппаратно формируются “длинные” (9 кБ) UDP пакеты (так называемые Jumbo-кадры), которые передают нумерованные блоки данных размером 1 МБ. Каждый 1 МБ блок данных со своим специальным заголовком передается в каком-либо из трех 10 Гбит Ethernet интерфейсов, таким образом, происходит расщепление одного потока данных на три сетевых адаптера, каждый из которых передает 1/3 часть потока данных (~ 0.7 ГБ/с). На приемной стороне, в данном случае это СЗХД, производится обратный процесс восстановления исходного потока с проверкой целостности данных (Раздел 2.3). Четвертый 10 Гбит сетевой адаптер осуществляет передачу данных остальных логических каналов: оцифрованные сигналы ПЧ трех УП (1/2/3) каналов (3×250 МБ/с) и ДИ всех четырех каналов (максимум 4×12 МБ/с), что в сумме составляет около 800 МБ/с.

Таким образом, все 8 логических каналов данных, генерируемых ЦАИ, передаются в СЗХД, которая также имеет четыре 10 Гбит Ethernet интерфейса для приема данных от ЦАИ.

2.2.3. Управление ЦАИ

Управление работой микросхем FPGA0/1 модуля НРЕ-720 и конфигурация параметров обработки сигналов, среди которых наиболее важные:

- выбор каналов для обработки (ШП, УП 1/2/3),
- частотно-зависимые пороговые значения амплитуд для детектирования импульсов для каждого из каналов,
- настройка системы подавления помех (установка запрещенных частот для каждого из каналов),
- параметры непрерывного частотного сканирования,
- параметры дискретного частотного сканирования,

осуществляется специальной программой управления аппаратной частью, которая работает на одном из ядер процессора MPC8640/1D модуля НРЕ-720. На втором ядре процессора выполняется программный поток пост-обработки результатов измерений, выполненных в FPGA0/1: нормировка значений измеренных параметров импульса и формирование ДИ заданного формата.

Одноплатный компьютер VPX-185, входящий в состав ЦАИ (см. рис. 2), предоставляет программный интерфейс управления ЦАИ. На одном из ядер процессора MPC8640/1D работает серверная часть программного обеспечения ЦАИ. Сервер обслуживает соединения от удаленных клиентов управления, подключение которых принимается по сетевому протоколу TCP/IP через привязанный к данному ядру процессора один из Ethernet интерфейсов. Управление ЦАИ осуществляется клиентской частью программного обеспечения ЦАИ с помощью специально разработанного протокола прикладного уровня. Низкоуровневые команды управления процессом обработки данных передаются по интерфейсу sRIO в программу управления аппаратной частью, которая выполняется на одном из ядер процессора MPC8640/1D платы НРЕ-720.

sRIO интерфейс используется также для передачи ДИ, сформированных в вычислительном

модуле HPE-720, для обработки их в реальном времени на втором ядре процессора MPC8640/1D платы VPX-185. Это дает возможность отладки и тестирования при разработке различных алгоритмов на основе кластерного анализа [13], которые могут быть использованы для автоматической идентификации типа импульсного радиоисточника (например, идентификация РЛС) в реальном масштабе времени.

2.3. Система записи и хранения данных

Аппаратные решения, применяемые в проектировании СЗХД, должны обеспечить надежность системы, высокую производительность записи и иметь достаточный объем хранилища, чтобы обеспечить как минимум получасовую запись необработанных данных. СЗХД, входящая в разработанный приемник-анализатор импульсов, построена на основе мощного серверного компьютера, аппаратная конфигурация (табл. 2) которого была проработана с учетом всех требований и спецификаций приемного комплекса.

СЗХД собрана в специализированном корпусе типа CSE-417 фирмы SuperMicro. Выбор данного корпуса обусловлен наличием двусторонней

объединительной панели SAS2-216EL, которая имеет 72 посадочных места для накопителей SAS HDD/SSD. Требуемая высокая производительность системы обеспечивается материнской платой Super Micro X8DTH-IF-0 с двумя 4-ядерными процессорами Intel® Xeon® E5620.

Четыре 10 Гбит Ethernet интерфейса двух сетевых адаптеров AOC-UTG-i2 подключены к соответствующим 10 Гбит Ethernet интерфейсам ЦАИ (см. рис. 2 и рис. 3). Прием сетевых данных происходит посредством механизма прерываний центрального процессора СЗХД, поэтому считывание из буфера сетевой карты и обработка потока данных в 3 Гб/с невозможны с использованием Ethernet интерфейса со стандартными параметрами. Существенно снизить нагрузку на центральный процессор и, соответственно, решить проблему приема данных удалось, используя UDP протокол со сверхдлинными Ethernet пакетами (Jumbo-кадры). Как отмечалось в Разделе 2.2.2, в ЦАИ происходит расщепление потока необработанных данных ШП канала на три 10 Гбит сетевых адаптера, каждый из которых передает поток ~ 0.7 Гб/с. Поскольку все сетевые интерфейсы работают асинхронно, нет гарантии ни в правильном поряд-

Таблица 2. Система записи и хранения данных

	Модель/Тип	Дополнительно
Корпус	CSE-417E26-R1400LPB	– имеет две объединительные панели типа SAS2-216EL – обеспечивает 72 места для HDD (24 на задней и 48 на передней панели)
Материнская плата	SuperMicro X8DTH-IF-0	– 2 процессора серии Intel® Xeon® CPU 5600/5500 – 7 PCI-E (x8) 2.0
Процессор	Intel® Xeon® E5620 (x2)	– два 4-ядерных процессора с частотой 2.4 ГГц
Оперативная память	DDR3 1333MHz	– 48 ГБ
Сетевые адаптеры	SuperMicro AOC-UTG-i2 (x2)	– интерфейсная шина: x8 PCI Express 2.0 – два адаптера обеспечивают 4x10 Гбит Ethernet интерфейса
RAID-контроллер	LSI MegaRAID SAS 9266-8i PCI-Express	– интерфейсная шина x8 PCI Express 2.0 – 8x6 Гбит/с внутренних портов SATA+SAS – подключение до 128 SATA- и/или SAS-устройств
SSD накопители данных	OCZ Vertex-3 SATA3	– интерфейс SATA-3 – емкость 240 ГБ – скорость записи до 520 МБ/с
Хранилище данных	RAID0-массив SSD накопителей	– 32 накопителя SSD – емкость 32x240 ГБ = 7.7 ТБ – скорость записи 10 Гб/с – файловая система BtrFS
Операционная система	Linux	– OpenSuse 12.2 64-bit

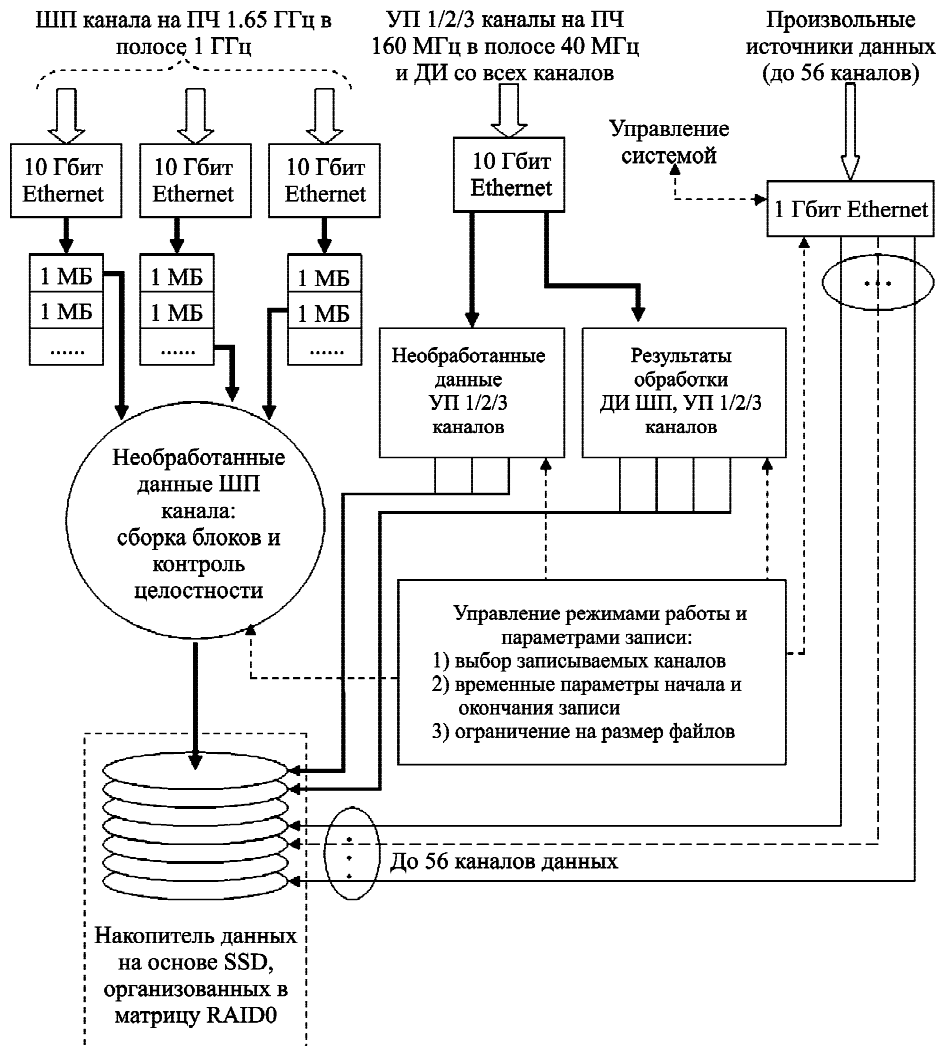


Рис. 3. Поток данных в СЗХД

ке передачи 1 МБ блоков данных в модуле ЦАИ, ни тем более в правильном порядке их приема на системе записи. За сборку блоков и восстановление целостности данных ШП канала полностью отвечает разработанное программное обеспечение СЗХД (рис. 3).

Необходимая производительность по записи достигается за счет объединения нескольких одинаковых накопителей в один логический элемент, так называемый RAID-0. Любые, даже высокопроизводительные, обычные жесткие диски с механическим вращением в данном случае малопригодны. Таких дисков понадобилось бы порядка сотни. Это привело бы к значительному росту энергопотребления, а главное, к катастрофическому снижению надежности системы в смысле среднего времени наработки на отказ,

и, кроме того, RAID-0 массив по своей сути не имеет избыточности для восстановления данных в случае сбоя одного из дисков. Оптимальным решением данной проблемы на сегодняшний день является использование SSD (solid-state-disk) накопителей. 32 накопителя типа OCZ Vertex-3 SATA3 обеспечивают теоретическую скорость записи более 10 ГБ/с. Практическое ограничение потока данных ограничивается уже интерфейсом PCI-Express, к которому подключен RAID-контроллер LSI MegaRAID SAS 9266-8i. В качестве файловой системы на логическом томе размером в $32 \times 240 \text{ ГБ} = 7.7 \text{ ТБ}$ была выбрана файловая система BtrFS, поскольку имеет встроенные алгоритмы для работы с RAID различных типов и режим, оптимизированный для работы с твердотельными накопителями.

В текущей реализации комплекса поддерживается всего 64 логических канала записи данных, из них – 8 “встроенных” логических каналов данных от ЦАИ со специфицированным форматом (ШП, УП 1/2/3, и ДИ для этих каналов). Кроме этих 8 каналов, система записи способна принимать и записывать данные одновременно с 56 различных дополнительных источников данных произвольного формата (см. рис. 3).

Для удобства работы пользователя с СЗХД создана специальная концепция “сессии”, согласно которой выбранная конфигурация записываемых данных отражается в определенной структуризации файлов и каталогов на логическом носителе. Программное обеспечение СЗХД способно открывать, закрывать и удалять уже записанные сессии, конфигурировать сессию записи перед началом работы и т. п. Таким образом, программное обеспечение выступает в роли сервера этой интегрированной в систему “базы данных” измерений. Конфигурирование режимов работы приемника-анализатора импульсов представляет собой достаточно сложный процесс, так как включает в себя согласованную настройку параметров все трех подсистем комплекса: тюнера, ЦАИ и СЗХД. Следующие задаваемые пользователем параметры определяют конфигурацию сессии записи:

- выбор записываемых каналов данных,
- абсолютное время начало записи,
- относительное время начало записи,
- длительность записи,
- ограничение по размеру файла,
- автосоздание файлов после достижения ограничения по размеру.

СЗХД спроектирована таким образом, что может использоваться как отдельное оборудование для записи большого объема данных, в частности, как удаленно управляемый накопитель данных от многочисленных устройств, например, видео- и/или аудио-регистраторов. Использование современных высокопроизводительных стандартных аппаратных модулей, доступных на рынке, вместо какого-либо специализированного оборудования дает системе следующие преимущества:

- использование стандартных интерфейсов,
- простота в обслуживании и ремонте,
- гибкость в изменении конфигурации системы,

- легкое интегрирование в другие системы,
- стандартная файловая система на накопителе данных.

Все это вносит определенный вклад в достижение высокой конкурентоспособности созданной СЗХД.

3. Алгоритм обработки данных в ЦАИ

Основным предназначением ЦАИ в разработанном комплексе является измерение в реальном времени характеристик импульсных сигналов, принимаемых широкополосным приемником. При этом требуется высокоточное измерение характеристик сигналов одновременно в частотной и временной областях. В качестве таких характеристик рассматриваются средняя частота сигнала, ширина спектра, длительность сигнала, амплитуда, наличие внутриимпульсной модуляции и время прихода сигнала. Эта задача является типичной для радиолокации, астрономии, спектроскопии и ряда других приложений, в частности, в военной сфере в различных комплексах радиоразведки для обнаружения работы и идентификации типа РЛС [7, 8, 14, 15].

Основная сложность рассматриваемой задачи заключается в необходимости определения указанных характеристик в реальном времени при больших потоках входных данных. В силу этого становится невозможным применять рекурсивные методы анализа или методы, требующие запоминания длительной предыстории принимаемого сигнала. Решение задачи возможно при использовании конвейерного подхода к обработке информации. Для достижения максимальной производительности в ЦАИ используется специально разработанный конвейерный алгоритм детектирования и определения параметров импульса с высоким частотным и временным разрешением. В ЦАИ этот частотно-временной алгоритм выполняет обработку данных в реальном масштабе времени.

Общая структура алгоритма приведена на рис. 4. Первым этапом обработки данных, поступающих с АЦП, является их разбиение на интервалы (фреймы) и создание для каждого фрейма комплексной спектрограммы.

Создание спектрограмм необходимо для решения следующих задач: определения средней частоты импульса; разделения импульсов, кото-

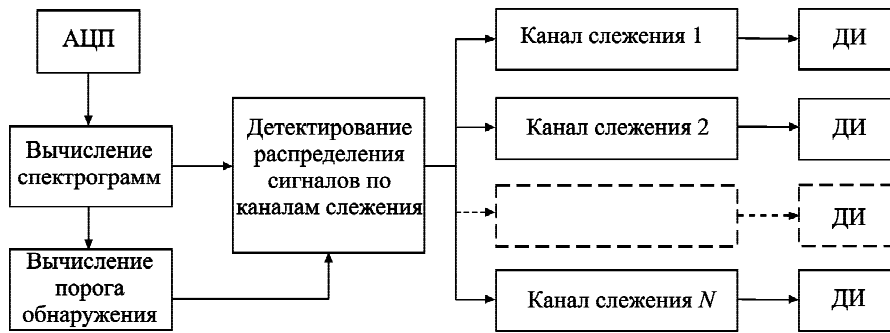


Рис. 4. Структура алгоритма обнаружения и оценки параметров импульса

рые перекрываются во времени, но не перекрываются в частотной области; динамической адаптации анализируемой полосы частот в соответствии с шириной спектра конкретного импульса с целью улучшения отношения сигнал/шум.

Вычисленные спектрограммы используются в двух блоках. В первом из них вычисляются среднее значение, среднее отклонение от среднего значения и максимальное значение мощности в каждой ячейке спектрограммы. На основании этих данных вычисляется порог обнаружения сигналов. Во втором блоке происходит детектирование импульсов – мощность комплексных сигналов сравнивается с порогом обнаружения, и сигналы, превысившие порог, распределяются по каналам слежения за импульсами.

Затем данные поступают на несколько параллельно работающих каналов слежения за импульсами. Каждый канал проводит вычисления в частотной и временной областях.

В частотной области вычисляются три суммы:

$$S = \sum_i \sum_k P_{ik},$$

$$S_F = \sum_i \sum_k f_k P_{ik},$$

$$S_{F2} = \sum_i \sum_k f_k^2 P_{ik},$$

где i – обозначает номер спектрограммы; $P_{i,k}$ – мощность в k -м отсчете i -й спектрограммы; f_k – частота, соответствующая k -му отсчету спектрограммы. По индексу i суммирование осуществляется по всем фреймам, в которых присутствует данный импульс. По индексу k суммирование осуществляется по всем отсчетам, которые в текущей спектрограмме были распределены для этого канала слежения.

Затем для перехода во временную область для наблюдаемого каналом слежения участка спектрограммы осуществляется обратное преобразование Фурье. Во временной области вычисляются следующие суммы:

$$S' = \sum_{n=iN/2}^{iN/2+N/2-1} p_n,$$

$$S_T = \sum_{n=iN/2}^{iN/2+N/2-1} t_n p_n,$$

$$S_{T2} = \sum_{n=iN/2}^{iN/2+N/2-1} t_n^2 p_n,$$

$$S_{P2} = \sum_{n=iN/2}^{iN/2+N/2-1} p_n^2,$$

где t_n – время, соответствующее n -му отсчету временной реализации, диапазон n охватывает все время существования импульса; p_n – мощность сигнала в i -м отсчете.

По завершении импульса вычисляются его параметры:

средняя частота $f_0 = \frac{S_F}{S},$

ширина спектра $\Delta f = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{S_{F2}}{S} - f_0^2},$

срединное время импульса $t_0 = \frac{S_T}{S'},$

длительность импульса $\tau = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{S_{T2}}{S'} - t_0^2},$

средняя мощность импульса $P_{AV} = \frac{S_{P2}}{S'}.$

Набор параметров импульса (или ДИ) передается на запись в СЗХД и/или на программу-обработчик дескрипторов в ЦАИ. В табл. 3 приведены

Таблица 3. Точности и пределы измерений параметров импульса

Диапазон измеряемых длительностей	от 50 нс до 500 мкс
Частотная полоса анализа	1 ГГц
Точность измерения средней частоты импульса	0.5 МГц
Точность измерения длительности импульса	30 нс (при длительности до 3 мкс) 1 % (при длительности больше 3 мкс)
Точность измерения времени начала импульса	30 нс (при длительности до 3 мкс) 1 % (при длительности больше 3 мкс)

пределы и достигаемые точности измерений для каждого из параметров, содержащихся в ДИ.

Размер структуры ДИ составляет 24 Б. Учитывая производительность ЦАИ, до 500000 ДИ в секунду, суммарный максимальный поток обработанных данных (ДИ) по всем четырем каналам обработки (один широкополосный и три узкополосных) составляет порядка 50 МБ/с. Таким образом, поток данных, представляющих собой результаты обработки, в худшем случае в 60 раз меньше потока входных необработанных данных.

4. Заключение

Разработан и изготовлен работающий образец широкополосного приемника-анализатора импульсов. В описанной реализации приемник-анализатор работает как регистратор импульсов. Однако, данный комплекс, состоящий из сверхширокополосного РЧ тюнера, высокопроизводительного блока цифровой обработки сигналов и масштабируемой СЗХД, может быть легко адаптирован в случае необходимости: алгоритмы обработки сигналов в ЦАИ легко модифицировать, а масштабируемость системы записи позволяет оптимизировать функциональность системы под особенности конкретной задачи. Например, если имеется соответствующая база данных радиоисточников, то можно внедрить соответствующие алгоритмы анализа ДИ, способные идентифицировать тип импульсного радиоисточника в реальном масштабе времени. Возможность записи “сырых” данных в полосе 1 ГГц облегчает отладку сложных алгоритмов автоматического распознавания. В частности, разработанный приемник-анализатор может быть очень полезным в изучении и классификации источников транзиентного излучения в радиоастрономии.

В целом приемник-анализатор обладает уникальными характеристиками и производительностью, что открывает широкий спектр применений данного комплекса в радиолокации,

радиоастрономии, спектроскопии и ряде других приложений, в том числе и военных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Russia's Arms and Technologies XXI Encyclopedia: Volume XIII, Control, Communication and Radio Electronic Warfare Systems. – Moscow: Publishing House Arms and Technologies, 2006. – 696 p.
2. Tsui J. B. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications – New York, Wiley-Interscience, 1986. – 460 p.
3. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – id. A16. – DOI: 10.1051/0004-6361/200913335.
4. Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications” // *Proceedings of the 6-th Int. Symp. MSMW'07, June 25-30, 2007.* – Kharkiv (Ukraine). – 2007. – P.736–738.
5. Namgoong W. Channelized Digital Ultrawideband Receive // *IEEE Trans. Wireless Commun.* – 2003. – Vol. 2, No. 3. – P. 502–510.
6. Vasilyev O. Y., Kuzin A. I., Kravtsov A. A., Bulakh E. V., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M. Multifunctional Digital Receiver-Spectrometer // *Radiofizika i Radioastronomia.* – 2014. – Vol. 19, No. 3. – P. 276–289 (in Russian).
7. Zahirniak D. R., Sharpin D. L., and Fields T. W. A Hardware-Efficient, Multirate, Digital Channelized Receiver Architecture // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* – 1998. – Vol. 34, No. 1. – P. 137–152.
8. Lopez-Risueno G., Grajal J., and Sanz-Osorio A. Digital Channelized Receiver Based on Time-Frequency Analysis for Signal Interception // *IEEE Tran. Aerosp. Electron. Syst.* – 2005. – Vol. 41, No. 3. – P. 879–898.
9. Volkov V. A., Vavriv D. M., Bulakh E. V., and Kravtsov A. A. High sensitivity 0.5 to 19.5 GHz receiver with 1.1-GHz instantaneous bandwidth // *Radiofizika i Radioastronomia.* – 2014. – Vol. 19, No. 4. – P. 375–380.
10. Volkov V. A., Vavriv D. M., Bulakh E. V., and Kravtsov A. A. Broadband Low-Noise Receiver Front-End with Ultrawide Bandwidth // *Proceedings of the 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communi-*

- cations (MIKON 2014), June 16-18, 2014. Vol. 2 – Gdansk (Poland). – 2014. – P. 675–678.
11. *Kenyon T.* High Performance Data Network Design: Design Techniques and Tools. – Digital Press, 2002. – 480 p.
 12. *Plavec F., Fort B., Vranesic Z. G., and Brown S. D.* Experiences with Soft-Core Processor Design // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), April 3-8, 2005. – Denver, Co (USA). – 2005. – P. 167b.
 13. *Дюран Б., Одделл П.* Кластерный анализ. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
 14. *Carpentieri E. and Cuomo S.* An adaptive threshold algorithm for detection of pulse radar signals // Radar Conference, RADAR '08, IEEE 26-30, May, 2008. – Rome (Italy). – 2008. – DOI: 10.1109/RADAR.2008.4720754.
 15. *Aly O. A. M. and Omar A. S.* Detection and localization of RF radar pulses in noise environments using wavelet packet transform and higher order statistics // Progress In Electromagnetics Research, PIER – 2006. – Vol. 58 – P. 301–317.
- V. V. Vinogradov, V. A. Volkov, R. V. Kozhyn, S. V. Sosnytskyi, D. M. Vavriv, O. Y. Vasilyev, E. V. Bulakh, P. V. Usik, and A. I. Kuzin*
- Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- WIDEBAND DIGITAL RECEIVER/PULSE ANALYZER

The experience of development of a digital receiver/pulse analyzer is described. The measuring set has a modular structure and consists of three functionally independent systems: Radio Frequency Tuner, Digital Pulse Analyzer, and Data Record and Storage System. The ultra-wideband Tuner operates within 0.4 to 18 GHz. The high performance Pulse Analyzer detects up to 2 million pulses per second in real time. The Data Recording System is capable of recording raw data and results of processing for as long as 40 min at the rate of up to 3 GB/s. This measuring set is perfectly suitable for usage in radiolocation, radioastronomy, spectroscopy, in the systems for radio-emission monitoring and in within the measuring-calibrating equipment.

Статья поступила в редакцию 17.04.2015

*В. В. Виноградов, В. А. Волков, Р. В. Кожин,
С. В. Сосницький, Д. М. Ваврів, О. Ю. Васильєв,
Є. В. Булах, П. В. Усік, А. І. Кузін*

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ШИРОКОСМУГОВИЙ ЦИФРОВИЙ ПРИЙМАЧ-АНАЛІЗАТОР ІМПУЛЬСІВ

Описується досвід розробки цифрового приймача-аналізатора імпульсів. Вимірювальний комплекс має модульну структуру та складається із трьох функціонально незалежних підсистем: радіочастотного тюнера, цифрового аналізатора імпульсів та системи запису і зберігання даних. Надши-