

Аналого-цифровой модуль приема и передачи данных. Разработка алгоритмов и программного обеспечения

10, октябрь 2014

Еременков А. И., Жураковский В. Н., Силин С. И.

УДК: 621.396.621

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

sm2-2@inbox.ru

Введение

Существуют различные способы получения информации об источниках радиоизлучения. Одним из таких методов является пассивная радиопеленгация. Для решения различных задач может быть необходимо знать источники радиоизлучения во время полета летательного аппарата. Для этого в летательный аппарат устанавливается бортовая система, выполняющая поставленную задачу. Частью этой системы является рассматриваемый аналого-цифровой модуль приема и передачи (далее, АЦМПП).

В настоящий момент большинство нестандартных задач выполняется на двух типах микроэлектронных устройств: на ПЛИС и на микроконтроллерах. Когда необходимо параллельное исполнение многих задач на высокой частоте используется ПЛИС. Именно этим обуславливается использование ПЛИС в АЦМПП, поскольку необходимо осуществлять управление всеми периферийными устройствами, принимать данные с АЦП, осуществлять обнаружение сигналов, выполнять обмен данными по usb с ПК, по скоростному интерфейсу с Центральным модулем обработки и т.д. И все эти задачи должны выполняться параллельно на высокой частоте.

Дополнительные трудности вносит значительная сложность алгоритмов цифровой обработки сигналов и алгоритмов взаимодействия с окружением ПЛИС. Реализация этих алгоритмов требует большого количества ресурсов ПЛИС, а также тщательной разработки алгоритмов в целях экономии тех самых ресурсов, а, следовательно, и экономических средств.

1. Назначение бортовой системы

Летательный аппарат с помощью антенной системы принимает сигналы от источников радиоизлучения. Задача бортовой системы состоит в следующем:

- обнаруживать сигналы источников;
- определять радиотехнические параметры принятых сигналов;
- сортировать их, то есть выделять радиосигналы, принадлежащие одним и источникам.

2. Состав бортовой системы

Бортовая система состоит из антенной системы (АС), высокочастотной части (ВЧ), АЦМПП и Центрального модуля обработки. Рассмотрим место разрабатываемого модуля в бортовой системе.

АЦМПП обеспечивает поимпульсную запись оцифрованного радиосигнала с трех разнесенных приемных модулей и передачу пакетов квадратурных 16-разрядных отсчетов записанных импульсов в Центральный модуль обработки (МЦО).

В составе АЦМПП имеется несколько приемных модулей. Первый приемный модуль считается ведущим, он выдает себе и остальным модулям команды на начало и окончание записи сигнала на основании данных работы входящей в состав его ПО подпрограммы-обнаружителя. Остальные приемные модули являются ведомыми и обеспечивают запись отсчетов входного сигнала соответствующего поста, формирование и передачу пакетов с отсчетами в Центральный модуль обработки.

В состав программного обеспечения, реализуемого в ПЛИС ведущего приемного модуля, входят подпрограммы цифровой фильтрации, обнаружителя, диспетчера и формирователя пакета данных и их передачи. В состав ПО ведомых приемных модулей входит только диспетчер и формирователь пакета данных. Во всех приемных модулях входной цифровой поток буферизируется на время, необходимое на фильтрацию, принятие решения о возникновении сигнала (определяется алгоритмом обнаружения ведущего модуля), а также на время прохождения команды о начале записи между модулями и другие временные задержки, связанные с реализацией.

Обобщенная структурная схема системы приведена на рисунке 1.

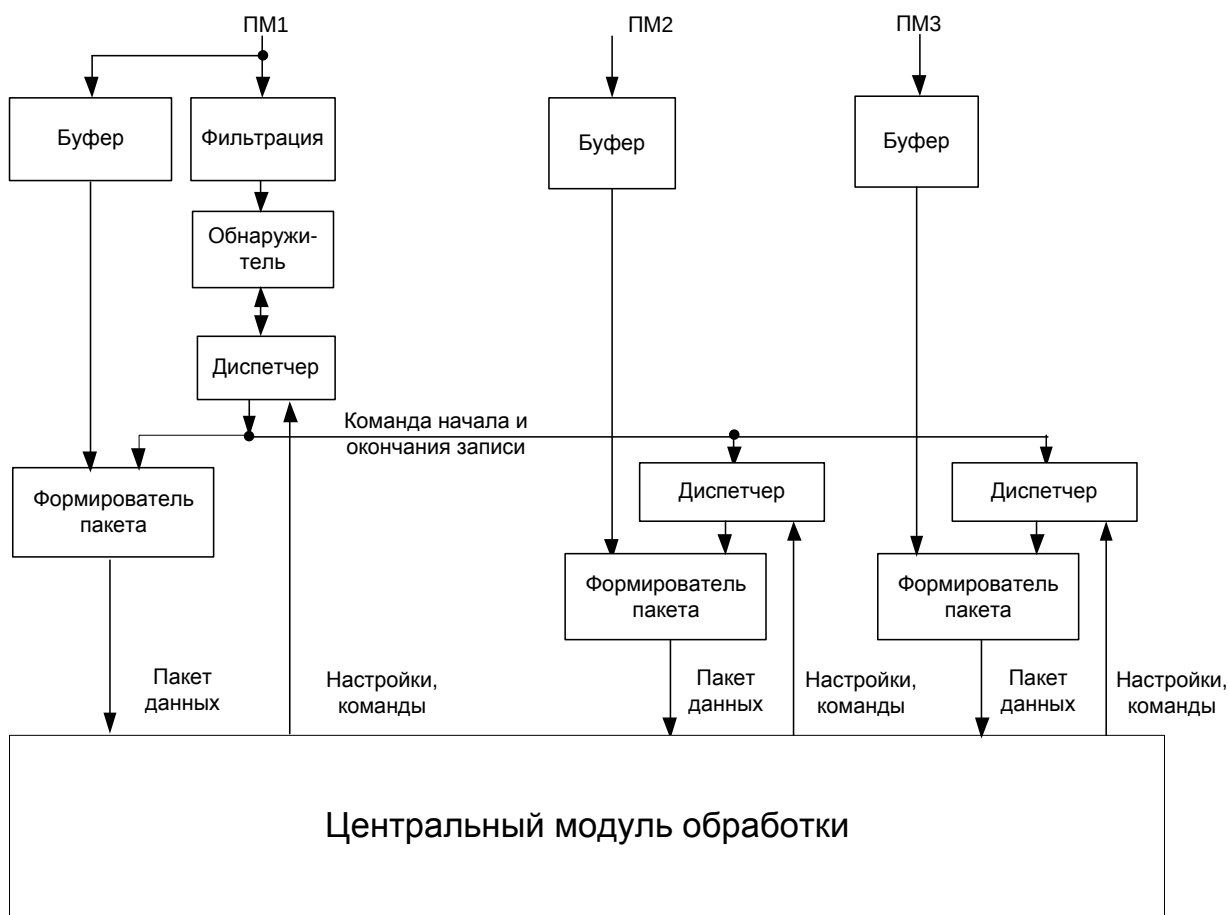


Рис.1. Обобщенная структурная схема системы

3. Обобщенная структура программного обеспечения

Программное обеспечение, загружаемое в ПЛИС, можно разделить на блоки, выполняющие определенный набор связанных операций. Например, программирование микросхемы синтезатора частот или организация обмена информацией через интерфейс usb.

Таким образом, обобщенную структурную схему можно представить в виде отдельных блоков, выполняющих данный набор операций, и связей между этими блоками.

Обобщенная структурная схема приведена на рисунке 2.

Для отладки аппаратуры используется связь с ПК по шине usb. На ПК стоит драйвер, обеспечивающий связь с другими компьютерами по протоколу Ethernet. Данный драйвер является своего рода сервером для программ, которые связываются с модулем АЦМПП. Драйвер осуществляет прием запросов от программ-клиентов, кодировку по соответствующем протоколу и передачу по каналу usb на аппаратуру.

В аналого-цифровом модуле блок обмена информацией по usb декодирует данные запросы и выставляет результат на выход, где любой модуль может прочитать запрос и, если данные переданные по usb предназначены данному модулю, выполнить соответствующие действия.

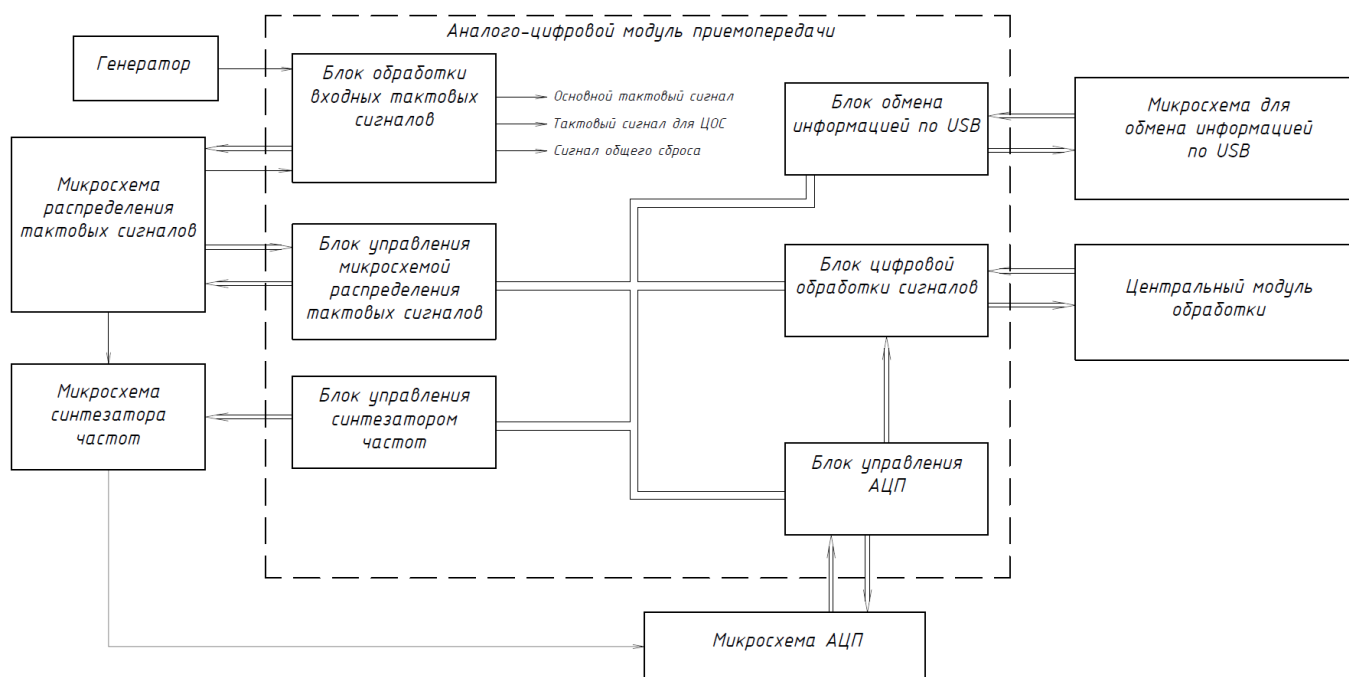


Рис. 2. Обобщенная структурная схема программного обеспечения

Похожим образом реализована обратная связь с АЦМПП на ПК.

Таким образом, реализация такого блока в ПО позволила достичь высокой модульности, повысить скорость разработки и сделать возможность независимой и параллельной разработки модулей и всех программ, связывающихся с этими модулями.

В разрабатываемом модуле использовались следующие данные, передаваемые по usb:

Таблица 1. Протокол обмена по каналу USB

Название	Примечание
Source Port	Порт отправителя
Dest Port	Порт получателя
ID	Уникальный идентификатор пакета
Last message	Флаг последнего сообщения в пакете
Length	Длина сообщения в байтах
Number	Номер сообщения в пакете
Data	Данные

Данный протокол можно успешно «встроить» в протокол обмена UDP; и с помощью последнего осуществлять обмен информации с разных устройств.

4. Временной обнаружитель

Одной из задач АЦМПП является задача обнаружения сигналов. Ниже будут рассмотрены варианты реализации временного обнаружителя в данном модуле.

Обнаружитель предназначен для принятия решения о наличии сигналов от целей и фиксации в этом случае номера отсчета по времени. Порог обнаружителя устанавливается либо экспериментально, либо путем вычислений, либо формируется адаптивно. Если текущий отсчет будет больше установленного порога, то принимается решение о наличии цели в данном отсчете, если наоборот, то цель отсутствует.

Обнаружитель основан на поиске группирующихся по времени обнаружений. На его вход заводится квадрат огибающей принятого сигнала по всем антенным каналам и формируется массив обнаружений, элементы которого принимают значение единица, при наличии обнаружений в соседних моментах времени в одном антенном канале. Результат о наличии обнаружения принимается в случае, когда суммарное количество обнаружений по всем каналам превышает установленное значение (или по мажоритарной логике), в ином случае выдается сигнал об отсутствии обнаружения.

Ниже рассмотрены четыре варианта схем обнаружителей.

4.1. Обнаружитель сигналов с независимой обработкой в каналах

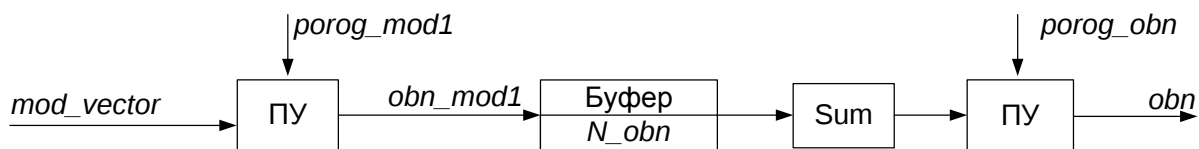


Рис. 3. Схема обработки в одном канале

На рисунке 3 приведена схема обработки в одном из каналов обнаружителя. В данной схеме мы сравниваем полученное значение квадрата огибающей сигнала S' с пороговым значением U_p . В случае, если полученное значение принимает значение большее, чем порог, то мы записываем в буфер обнаружителя единичный сигнал, в противном случае - 0. Обнаружитель построен по принципу наличия в принятой реализации сигнала M превышений модуля амплитуды сигнала над порогом из N возможных. Таким образом, сумму по всему буферу с конечной глубиной сравниваем с пороговым значением обнаружителя, и в случае превышения суммы над порогом выносим решение о наличии сигнала на входе данного канала.

На следующем шаге суммируем выход обнаружителей по каждому из каналов, и если в заданном числе каналов сигнал обнаружителей равен 1, то принимается решение о наличии сигнала.

На рисунке 4 представлены результаты обнаружений сигнала от целей, получившиеся после применения обнаружителя с одним порогом. Обнаружения представлены в виде протяженных по времени каркасов.

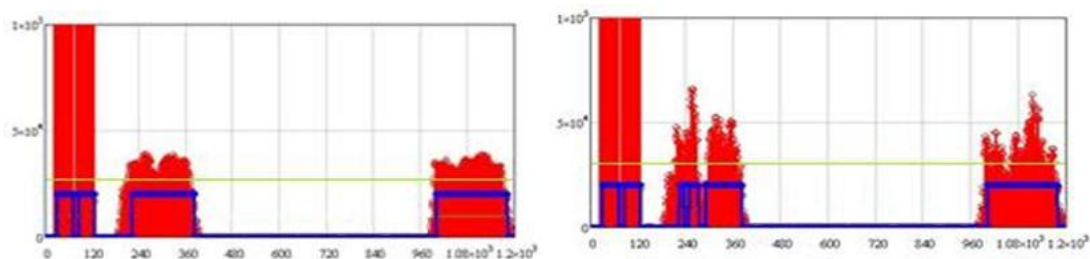


Рис. 4. Работа обнаружителя: а) СКО шума – 0.2; б) СКО шума – 0.8

4.2. Обнаружитель по нескольким каналам с общей обработкой

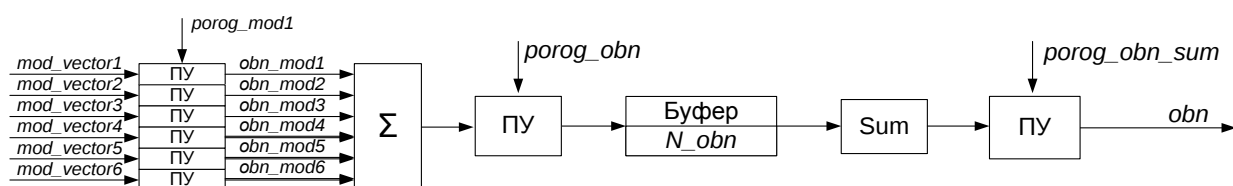


Рис. 5. Структурная схема обнаружителя по нескольким каналам с общей обработкой

На рисунке 5 видна структурная схема данного обнаружителя. Алгоритм работы отличается от предыдущего тем, что мы отдельно сравниваем с порогом каждый из каналов, а затем по мажоритарной логике принимаем решение о наличии сигнала в эфире, и после этого сигнал об обнаружении пропускается через временной фильтр.

4.3. Обнаружитель с адаптивным порогом

Все описанные выше алгоритмы обнаружения предполагают наличие выбранного постоянного порога (например, по критерию Неймана – Пирсона или эмпирически). Однако это может приводить к ошибкам различного рода – разрыву импульсов, амплитуда которых близка к порогу, пропуску малых импульсов или ложным срабатываниям по шумам.

Для улучшения характеристик обнаружения можно применять адаптивный порог, который автоматически вычисляется по уровню шумов в конкретном канале. При правильном алгоритме формирования порога можно получить существенное улучшение характеристик обнаружения в условиях нестационарных шумов.

Рассмотрим обнаружитель другого класса, в котором порог ставится не на мощность сигнала, а на разность фаз.

4.4 Обнаружение по набегу фазы

В отличие от вышеописанных алгоритмов на вход обнаружителя заводятся квадратуры сигнала.

При наличии сигнала на входе обнаружителя фаза сигнала представляет собой случайный процесс с распределением, близким к Гауссовскому. Соответственно разность фаз в соседних каналах имеет мат. ожидание, близкое к нулю, и малую дисперсию. При отсутствии сигнала фаза распределена равномерно, то есть могут происходить существенные скачки фазы. На слайде представлена зависимость фазы от времени и результат работы обнаружителя.

На рисунке 6 показан результат работы данного обнаружителя.

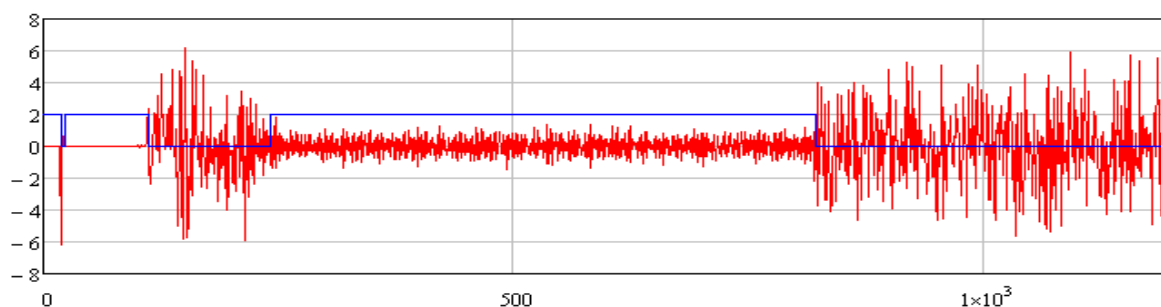


Рис. 6. Результат работы обнаружителя по набегу фазы

5. Блок цифровой обработки сигналов

Основной частью аналого-цифрового модуля приема и передачи данных является блок цифровой обработки сигналов. Все остальные блоки предназначены для обеспечения рассматриваемого блока всем необходимым: тактовой частотой, оцифрованными данными. Внутри него реализованы все алгоритмы обработки сигналов, в частности один из описанных выше. Также помимо обнаружения во временной области блок ЦОС может осуществлять обнаружение по спектру. Внутри блока предусмотрено управление различными режимами. Блок также соединен с блоком обмена информацией по usb для его отладки и настройки.

Блок ЦОС выполняет большинство функций, возложенных на весь модуль. А конкретно, блок цифровой обработки сигналов обеспечивает запись оцифрованного сигнала в буфер, обнаружение принятых сигналов, генерацию управляющих сигналов, формирование информационных сообщений в соответствии с установленным протоколом обмена и передачи сформированных сообщений в центральный модуль обработки. Управляется блок ЦОС командами от МЦО.

Также блок цифровой обработки сигналов является ключевым для бортовой системы в целом, поскольку именно он вырабатывает сигнал обнаружения, который является стар-

товым импульсом для всей системы: по нему фиксируется время начала сигнала, а затем передача всех записанных сигналов в МЦО и последующей их обработки.

1. Блок ЦОС состоит из следующих модулей:
2. Буфер принятых отсчетов;
3. Модуль БПФ;
4. Модуль контроля обнаружителя;
5. Модуль обнаружителя по спектру;
6. Модуль обнаружителя во временной области;
7. Модуль осциллографа.

Обобщенная структурная схема блока ЦОС приведена на рисунке 7.

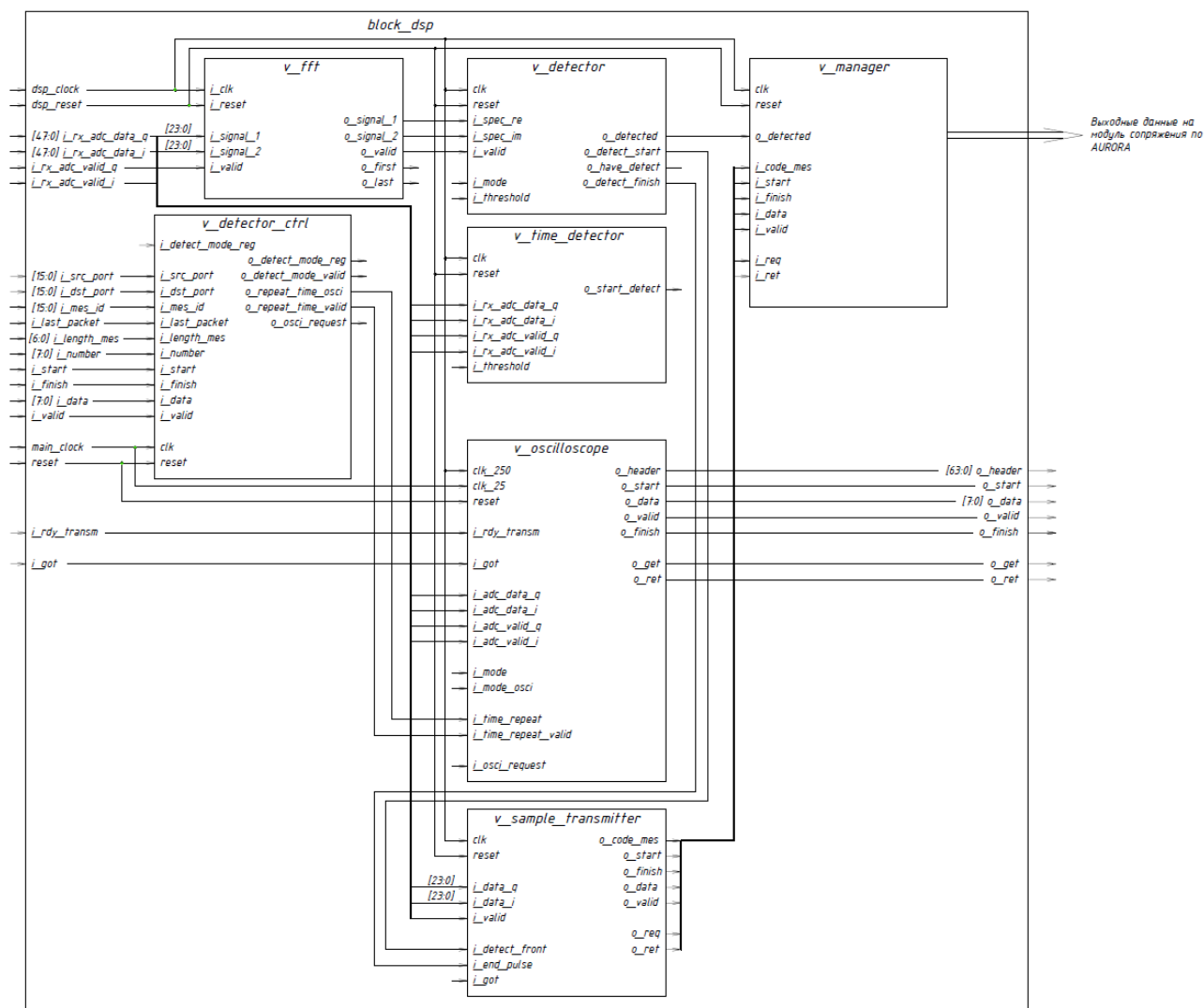


Рис. 7. Структурная схема блока ЦОС

Рассмотрим отдельно каждый модуль блока.

5.1. Модуль БПФ

Модуль `v_fft` представляет собой реализацию быстрого преобразования Фурье, выполняемого непрерывно по всем приходящим отсчетам с размером ядра преобразования, равным целой степени двойки. Модуль обладает следующими параметрами:

`p_fft_depth` – степень двойки для указания размера ядра;

`p_signal_width` – разрядность одной квадратуры входного сигнала;

`p_coef_width` – разрядность одной квадратуры коэффициента преобразования Фурье.

Модуль обладает следующими портами:

`i_signal_1` – первый сигнальный вход для подачи комплексного сигнала с шириной шины в два раза больше, чем `p_signal_width`;

`i_signal_2` – второй сигнальный вход для подачи комплексного сигнала с шириной шины в два раза больше, чем `p_signal_width`;

`i_valid` – признак готовности данных на входе;

`i_clk` – вход тактового сигнала;

`i_reset` – вход сброса;

`o_signal_1` – первый выход комплексного отсчета спектра с шириной шины в два раза больше, чем `p_signal_width`;

`o_signal_2` – второй выход комплексного отсчета спектра с шириной шины в два раза больше, чем `p_signal_width`;

`o_valid` – признак готовности отсчетов спектра;

`o_first` – признак первой пары спектральных отсчетов в выходном пакете;

`o_last` – признак последней пары спектральных отсчетов в выходном пакете.

Работа модуля начинается после подачи на вход `i_clk` тактового сигнала. Первым после поступления тактового сигнала подается сигнал синхронного сброса `i_reset`. Минимальная длительность импульса сигнала сброса равна одному периоду `i_clk`.

На входы `i_signal_1` и `i_signal_2` подаются два комплексных отсчета входного сигнала, взятых в соседние моменты времени. Оба сигнала сопровождаются единичным уровнем сигнала `i_valid`.

После записи $2^{p_fft_depth}$ отсчетов ($2^{p_fft_depth-1}$ пар сигналов `i_signal_1` и `i_signal_2`) модуль начинает производить оценку спектра записанной реализации. Оценка спектра происходит конвейерным методом, поэтому сразу же после окончания записи первой реализации в $2^{p_fft_depth}$ отсчетов можно сразу же начинать записывать следующую реализацию. По факту модуль позволяет производить преобразование входного сигнала, имеющего тактовую частоту оцифровки в два раза превышающую тактовую частоту модуля БПФ, без разрывов сигнала `i_valid`.

Через $p_fft_depth \cdot 2^{p_fft_depth}$ тактов модуль БПФ выставляет результаты расчета спектра на выходные шины `o_signal_1` и `o_signal_2`, сопровождая их признаком готовности данных на выходе `o_valid`.

Отсчеты спектра выставляются попарно, начиная с нулевого и первого, заканчивая $2^{p-fft_depth} - 2$ и $2^{p-fft_depth} - 1$. Первая пара отсчетов сопровождается единичным уровнем сигнала `o_first`, последняя пара единичным уровнем сигнала `o_last`. Длительность единичных уровней составляет один период тактовой частоты.

5.2. Модуль контроля обнаружителя

Данный модуль предназначен для управления работой обнаружителя, а конкретно для изменения режима работы обнаружителя, режима работы осциллографа, установки порога, изменения времени срабатывания осциллографа по таймеру, запуска осциллографа (в режиме работы по запросу).

Управление обнаружителем осуществляется с помощью регистра состояния, имеющим следующую структуру (таблица 2).

Таблица 2. Структура регистра состояния обнаружителя

Байты	Биты	Название
0	1..0	Режим работы
0	3..2	Режим работы осциллографа
1	5..4	Тип порога
1	6	Бит запуска для осциллографа
2..7	31..8	Порог

Также есть регистр таймера осциллографа (8 байт), в котором хранится максимальное значение счетчика в осциллографе.

Все порты модуля можно разделить на группы:

- системные (тактовый сигнал основного домена `main_clock`, сброс для этого же домена `reset`);
- шина принятых по `usb` данных (глава 6);
- порты для изменения регистра состояния;
- порты управления осциллографом.

Для изменения состояния регистра управления по пришедшему пакету данных от `usb` необходимо считать регистр (`i_detect_mode_reg`), изменить соответствующие данные (не обязательно полностью перезаписывать регистр) и выдать его наружу с признаком корректности (`o_detect_mode_reg`, `o_detect_mode_valid`).

Порты управления осциллографом включают порты изменения регистра таймера осциллографа (`o_repeat_time_osci`, `o_repeat_time_valid`), а также запрос на запуск осциллографа в режиме работы по запросу (`o_osci_request`).

5.3. Модуль обнаружителя по спектру

На входе модуля находится импульсный зашумленный сигнал с неизвестными параметрами, а также с неизвестным законом распределения. Считается, что флуктуация частоты сигнала незначительна за время принятия решения.

Данный модуль реализует анализ текущего спектра входного сигнала и на основе его изменения принимает решение о начале нового или окончании текущего импульса.

Обнаружитель по спектру может работать в двух режимах:

1. Обнаружение по локальным максимумам;
2. Обнаружение по всем спектральным линиям.

Обнаружение по локальным максимумам

На каждом такте работы (в соответствии с тактом поступления входных данных) в обнаружителе анализируется массив из 64 входных значений на наличие локальных максимумов, превышающих заданный порог обнаружения (порог может быть изменен по команде от Центрального модуля обработки). Условие локального максимума — значение огибающей превышает 4 соседних значения слева и справа.

По результатам анализа формируется массив текущего состояния, где номер элемента массива, в котором определен локальный максимум, равен 1, а остальные — 0. Далее происходит сравнение с запомненным массивом предыдущего состояния спектра, и происходит накопление количества последовательных обнаружений локального максимума в каждом элементе массива спектра в массиве счетчиков. Решение о возникновении нового импульса в полосе, соответствующей данному элементу массива, принимается в случае, если локальный максимум в этом элементе обнаруживался 8 раз подряд.

Аналогично принимается решение о пропадании (завершении) импульса — 8 раз подряд локальный максимум не определяется в элементе массива, где он раньше был.

Кроме того, массив счетчиков анализируется на достижение максимального значения длительности импульса, задаваемого константой. В этом случае вырабатывается команда принудительного сброса импульса.

Для возможности управления полосами обнаружения реализуется возможность запрета анализа выхода с определенных фильтров с помощью маски запретов — массива, передаваемого с Центрального модуля обработки.

При одновременном наличии во входном потоке нескольких импульсов на запись ставится импульс из полосы (номер в массиве спектральных составляющих) с большим приоритетом. Маска приоритетов в виде битового массива передается с МЦО. Поскольку в данной версии системы записывается нефильтрованный входной поток, то использование приоритетов представляется целесообразным для случая, когда необходимо выделить определенную полосу для обнаружения, не исключая возможности в свободное время обнаруживать сигналы с других полос.

Обнаружение по всем спектральным линиям

Представляет собой сравнение амплитуды каждой из гармоник с порогом. Если хотя бы одна превышает — обнаружение. Режим является испытательным.

Все порты модуля подразделяются на группы:

- системные (тактовый сигнал домена ЦОС `dsp_clock`, сброс для этого домена `dsp_reset`);

- порты приема спектра;
- порты управления обнаружителем;
- порты выдачи информации.

Спектр сигнала принимается от модуля БПФ посредством соответствующих сигналов (см. п. 7.1) `i_spec_re`, `i_spec_im`, `i_valid`.

На вход портов управления обнаружителем подаются соответствующие разряды регистра состояния (`i_mode`) и уровень порога (`i_threshold`).

Выдача информации — массив обнаружений (`o_detected`), импульс старта (`o_detect_start`) и окончания (`o_detect_finish`) хотя бы одного обнаружения, флаг наличия обнаружения (`o_have_detect`).

5.4. Модуль обнаружителя во временной области

Модуль реализуется в соответствии с рассмотренной схемой обнаружителя с независимой обработкой в каналах.

На вход подаются:

- системные (тактовый сигнал домена ЦОС `dsp_clock`, сброс для этого домена `dsp_reset`);
- порты приема отсчетов сигнала (`i_rx_adc_data_q`, `i_rx_adc_data_i`, `i_rx_adc_valid_q`, `i_rx_adc_valid_i`);
- порог (`i_threshold`);
- сигнал об обнаружении (`o_start_detect`).

5.5. Модуль осциллографа

Данный модуль предназначен для разовой записи 4096 отсчетов принятых сигналов в оперативную память и последующего формирования пакета сообщений, предназначенного для выдачи на ПК посредством модуля `usb`. В модуле предусмотрена возможность периодического повторения описанной операции. Данный модуль предназначен для испытательных целей.

Входы/выходы модуля можно разбить на 4 группы:

- системные (сигнал общего сброса `reset`, тактовый основной домена `clk_25`, тактовый сигнал домена ЦОС `clk_250`);
- порты приема оцифрованного сигнала (содержат сами данные `i_adc_data_q`, `i_adc_data_i` и признаки готовности `i_adc_valid_q`, `i_adc_valid_i`);
- порты управления работой осциллографа;
- порты для передачи информации в модуль сопряжения;
- управление мьютексом.

Триггером для записи сигнала осциллографом может являться, как старт обнаружения любого из режимов работы обнаружителя, так и срабатывание таймера или сигнал принятый по `usb` (зависит от режима работы как обнаружителя, так и осциллографа). Поэтому на вход подаются режимы работы обнаружителя `i_mode` и режим работы осцилло-

графа `i_mode_osci`. Также к портам управления работой осциллографа относятся запрос на запись `i_osci_request`, объединяющий в себе все варианты запросов под определенным условием, время таймера `i_time_repeat` и корректность выставленного времени `i_time_repeat_valid`.

Передача информации в модуль сопряжения с `usb` осуществляется по протоколу, единообразному для всех устройств, которым необходимо передавать информацию через канал `usb`.

Управление мьютексом осуществляется с помощью трех портов:

1. Захват мьютекса `o_get` – импульс, выставляемый модулем для захвата мьютекса.
2. Освобождение мьютекса `o_get` – импульс, выставляемый модулем для освобождения мьютекса.
3. Флаг выданного управления `i_got` – входной сигнал от мьютекса, высокий уровень показывает, что данному модулю выдано управление модулем сопряжения.

Заключение

В рамках данной темы были разработаны алгоритмы для реализации программного обеспечения аналого-цифрового модуля приемопередачи, отвечающего заданным параметрам. В процессе разработки были произведены исследования о различных возможностях реализации компонентов разрабатываемого ПО, выявлены соответствующие достоинства и недостатки. Были разработаны алгоритмы для управления всеми периферийными устройствами, входящими в АЦМПП, а также алгоритмы цифровой обработки сигналов, было проведено моделирование разработанных алгоритмов.

Разработанное и реализованное ПО прошло проверку на аппаратуре, в процессе которой были устранены некоторые неточности в работе модуля.

В будущем планируется осуществить оптимизацию алгоритмического обеспечения, внедрить новые режимы работы системы, улучшить программного обеспечения, исходя из результатов испытаний.

Список литературы

1. Айфичер, Эммануил С., Джервис, Барри У.: Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.-992 с.: ил. –Парал. Тит. Англ.
2. Saeed V. Vaseghi Advanced Signal Processing and Noise Reduction. 2nd Edition // Wiley. 2000. Vol.456. DOI: 10.1002/0470841621.
3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ.— М.: Мир, 1989.— 448 с, ил.

4. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. — М.: Техносфера, 2006. 856 с.
5. White S. Digital Signal Processing. A Filtering Approach // Delmar. 2000. Vol. 229.