

УДК 004.421:004.383

## ОСОБЕННОСТИ И АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРАХ

*Молодяков С.А., к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, e-mail: molod@cef.spbstu.ru.*

**Ключевые слова:** оптоэлектронный процессор, цифровой сигнальный процессор, алгоритмы обработки сигналов, виртуальные элементы, калибровка.

### Введение

Вопросы цифровой обработки сигналов возникают на разных этапах приема, обработки и измерения сигналов. В оптоэлектронных (ОЭ) процессорах, которые включают оптический и цифровой вычислители, методы цифровой обработки применяются на этапе обработки оптических сигналов с выхода фотоприемника [1]. Алгоритмы обработки таких сигналов существенно отличаются от алгоритмов обработки изображений и зависят от решаемых задач. В настоящее время в приемных комплексах радиотелескопов широко используют ОЭ-процессоры, которые выполняют функции спектрометров, корреляторов, пульсарных процессоров [1-3]. В качестве оптического вычислителя используются акустооптические (АО) устройства. Обычно на радиотелескопе применяется целый набор таких устройств, работающих в различных частотных диапазонах. Особенность ОЭ-процессоров связана с возможностью спектрального анализа сигналов в широкой полосе частот при минимальных массогабаритных параметрах и энергопотреблении. В университете Кельна разработан АО-анализатор спектра с полосой до 4 ГГц (4 канала по 1 ГГц) [4] и там же создается 8 канальный АО-спектрометр с общей полосой 12 ГГц [5].

В качестве цифровой части ОЭ-процессоров в первую очередь рассматривают и применяют цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) [1, 6]. Основная задача, которую решает ЦСП, связана с потоковой обработкой сигналов, кроме того ЦСП выполняет функции управления фотоприемником, калибровки, передачи данных на систему сбора. Следует отметить трудности создания цифрового узла. Они связаны с высокой скоростью поступления отсчетов из фотоприемника. Так, при использовании максимальной частоты вывода зарядовых пакетов из ПЗС-фотоприемника (50 МГц) тактовая частота ЦСП для решения задачи спектрального анализа сигналов в радиоастрономии должна составлять около 5 ГГц.

Преодоление указанной сложности лежит в направлении распределенной обработки сигналов между элементами системы. В качестве элементов, которые можно использовать для обработки данных, применяют фотоприемник, ЦСП с программируемой логикой и последующий компьютер. Главной задачей первых элементов является выполнение сжатия потоков данных, а по-

*Цифровая обработка сигналов в оптоэлектронных процессорах применяется на стадии обработки оптических сигналов с выхода фотоприемника. Рассмотрены алгоритмы потоковой цифровой обработки данных применительно к задачам радиоастрономических наблюдений.*

следних – окончательная их обработка, представление и регистрация [7].

Для комплексного решения вопросов разработки ОЭ-процессоров необходимо применение системного подхода к их проектированию. Системный подход предполагает совместное проектирование отдельных узлов, а также методов и способов их работы [1, 7]. Понятно, что алгоритмы цифровой обработки, которые реализуются в ЦСП и ЭВМ, будут зависеть от выбранной модели работы ОЭ-процессора в целом, в том числе от тех операций, которые вынесены на фотоприемник.

Фотоприемники выполняют особую роль в ОЭ-процессорах – они являются связующим элементом между оптической и цифровой частями. Благодаря им параллельное представление информации преобразуется в последовательное. Кроме того, в фотоприемниках возможно обрабатывать информацию [1]. Современные фотоприемники на КМОП-матрицах являются практически гибридным процессором, включающим сенсорное поле, набор АЦП и цифровую логику, определяющую тот или иной алгоритм обработки. ПЗС-фотоприемники (ФПЗС) также можно рассматривать в качестве процессоров обработки сигналов, алгоритм работы которых легко перестраивать, в отличие от КМОП-фотоприемников [8]. Отсюда появляется еще одна функция ЦСП, связанная с управлением фотоприемником или выбором алгоритма его работы. Кроме того, ЦСП выполняет другие операции, прежде всего, связанные с синхронизацией приема и передачи данных. Для детального рассмотрения вопросов цифровой обработки сигналов в ОЭ-процессорах опишем их применение в приемном комплексе радиотелескопа.

### Оптоэлектронный процессор в приемном комплексе радиотелескопа

Местоположение ОЭ-процессора в приемном комплексе радиотелескопа и схема его оптического узла показаны на рис. 1. Входным сигналом является сигнал с антенны после преобразования его в СВЧ-приемнике к частоте работы АО-анализатора спектра. Выходной сигнал в зависимости от использования ОЭ-процессора – это спектр радиоизлучения [2] или профиль импульса пульсара [9]. Служба времени радиотелескопа обеспечивает временную привязку и формирует тактовые импульсы.

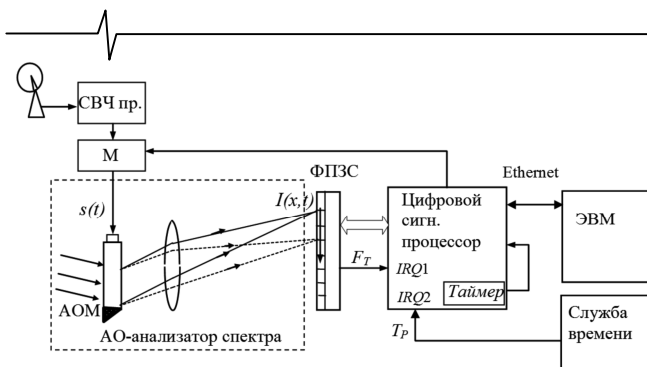


Рис. 1. ОЭ-процессор в приемном комплексе радиотелескопа

Подлежащий обработке радиосигнал  $s(t)$  после усиления подается на промежуточной частоте на акустооптический модулятор (АОМ). АОМ и Фурье-линза выполняют преобразование Фурье входного сигнала, формируя в выходной плоскости оптическое распределение с интенсивностью  $I(x, t)$ . Пространственная координата  $x$  линейно связана с частотой  $f$  анализируемых радиосигналов. Распределение  $I(x, t)$  отражает спектр мощности  $S(f)$  анализируемого сигнала  $s(t)$  в скользящем окне длительностью  $T_A$ , где  $T_A$  – временная апертура АОМ. В радиоспектрометрах распределение  $I(x, t)$  детектируется и накапливается  $N$ -элементным ПЗС-фотоприемником. По истечении заданного времени накопления  $T_I$  распределение считывается в виде последовательности отсчетов  $s_n \sim S(fn)$ , и кадры в цифровом виде регистрируются в ЦСП. В сигнальном процессоре происходит дальнейшее накопление/суммирование  $M$  кадров. При работе ОЭ-процессора в режиме радиоспектрометра используется метод модуляционного приема, при котором за счет переключения модулятора  $M$  сигнал поступает то с антенны, то с эквивалента с периодом модуляции 50–1000 Гц ( $T_I = 20 - 0,5$  мс). ЦСП должен проводить операцию по детектированию – вычитанию сигналов с антенны и эквивалента.

При работе ОЭ-процессора в режиме пульсарного процессора сигнал с выхода АО-анализатора спектра перемещается по полю фотоприемника с постоянной скоростью, связанной с мерой дисперсии наблюдаемого пульсара. Для восстановления этого сигнала в ЦСП время интегрирования  $T_I$  в фотоприемнике должно не превышать время перехода оптического сигнала на соседний элемент. Для пульсарного процессора, описанного в [9], время интегрирования  $T_I$  соответствовало 1–16 мкс. За это время необходимо считать кадр отсчетов с фотоприемника, что требует трудно реализуемых частот вывода и ввода отсчетов в ЦСП. В [10] предложено использовать способ временной задержки и накопления (ВЗН) для вывода данных с ПЗС-фотоприемника. Этот способ позволяет суммировать отдельные кадры не в ЦСП, а в ФПЗС, за счет чего период вывода отсчетов будет соответствовать  $T_I$ . Можно выделить следующие особенности использования ЦСП в пульсарном процессоре. Из-за отсутствия модуляционного приема, необходимо задать и поддерживать постоянный уровень сигнала внутри ОЭ-процессора, для этой цели предложено использовать способ цифровой двой-

ной коррелированной выборки (ДКВ) [11]. Каждый пульсар обладает своими параметрами: яркостью, мерой дисперсии и периодом излучения, поэтому ОЭ-процессор в зависимости от пульсара должен менять параметры обработки. В этом случае для взаимной синхронизации работы ЦСП с ФПЗС и Службой времени нами применяются механизмы прерываний.

Для задачи поляризационных измерений радиоизлучения пульсаров в [2] предложено использовать 2D оптический вычислитель, построенный с использованием двухканального АОМ. Он осуществляет совместное Фурье-преобразование сигналов правой и левой круговой поляризации с антенны радиотелескопа. Двумерное распределение дифрагированного света в выходной плоскости АО-вычислителя отражает амплитудные, спектральные и фазовые соотношения в радиосигналах, формируя в выходной плоскости помимо спектров еще и интерферограмму вдоль «фазовой» оси, ортогональной направлению распространения акустических волн в АОМ. Для регистрации и обработки выходного оптического сигнала (динамической интерферограммы) в этом случае требуется матричный ФПЗС, работающий по способу ВЗН. Требования к быстродействию ЦСП и его объему памяти существенно возрастают по сравнению с предыдущим использованием ОЭ-процессора. Основные операции, которые должен выполнять ЦСП, те же, но при временных резервах на ЦСП желательно возложить операции по обработке интерферограммы с целью вычисления параметров поляризации Стокса [2].

#### Алгоритмы потоковой обработки и их классификация

Алгоритмы потоковой обработки сигналов для ОЭ-процессоров другие, чем алгоритмы, применяемые для обработки изображений, используемые в частности в цифровых видеокамерах [11]. В табл.1 представлены некоторые алгоритмы. Они разделены на пять стадий (уровней) исполнения. Каждую стадию может исполнять свой поток команд на своем процессоре.

Таблица. 1.  
Алгоритмы потоковой обработки

Стадия применения	Название алгоритмов
Управление режимом	Переключение режимов работы ОЭ-процессора. Управление внешними устройствами. Тестовые режимы.
Покадровая обработка	Слежение за сигналом: амплитуда, номер пикселя. Выделение помех.
Построковая обработка	Объединение отсчетов в широких пределах. Смещение сигнала по строке. Калибровка шкалы.
Попиксельная обработка	Накопление кадров. Детектирование. Цифровая ДКВ. Калибровка неравномерности чувствительности.
Управление фотоприемником	Управление работой ФПЗС при алгоритмах: ВСЭ, фрагментирование, синхронное накопление и др.

Опишем основные низкоуровневые алгоритмы обработки (попиксельная и построковая обработка). Они

применяются автором и его коллегами в ОЭ-процессорах и не требуют больших вычислительных затрат. Вопросы управления фотоприемником следует рассматривать отдельно.

**1. Цифровая двойная коррелированная выборка.**

Известна схема аналоговой ДКВ [11]. Цифровая ДКВ аналогична. В этом случае процесс получения сигнала с одного пиксела разделён на две части – взятие отсчета с информационного уровня  $A_V = k \cdot U_V$  (рис. 2) и с уровня привязки (соответствует отсутствию сигнала в диффузионной области выходного узла ФПЗС)  $A_R = k \cdot U_R$  с последующим получением разности:  $A_{DCV} = A_V - A_R$ .

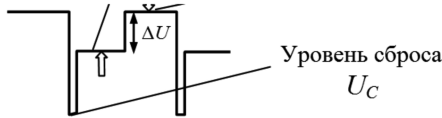


Рис. 2. Структура выходного сигнала с ФПЗС

Блок-схема алгоритма цифровой ДКВ и набор основных команд приведены на рис. 3. Отсчеты с АЦП по прерыванию (импульс  $F_T$  рис.1) постоянно заносятся в переменную  $Temp$ . Значение выходного отсчета  $A_{DCV}$  формируется за два этапа: при первом запоминается значение отсчета уровня привязки  $A_R$  в  $First\_DKV$ , а при втором происходит вычитание привязки из нового информационного отсчета  $A_V$ . Последовательность и привязка – информационный отсчет и/или наоборот может меняться, но за счет вычисления абсолютного значения разности указанное изменение порядка не сказывается на результате.

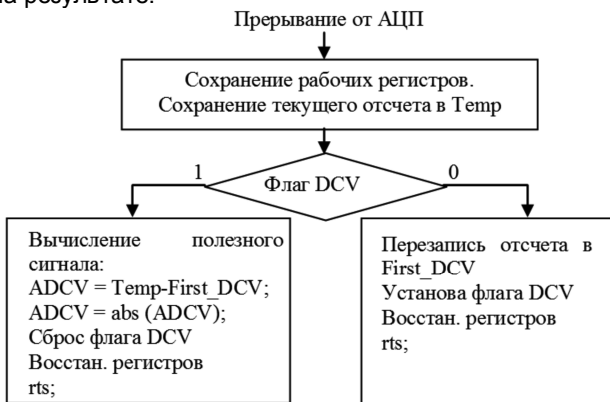


Рис. 3. Блок-схема алгоритма цифровой ДКВ

**2. Потокное накопление кадров.**

Суммируется заданное число  $M$  кадров, каждый из которых состоит из  $N$  элементов:

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} (s_{n,i}), n = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (1)$$

Обычное суммирование (1) при построении алгоритма потоковой обработки в ЦСП имеет некоторые особенности. Во-первых, необходимо использовать расширенную арифметику. При 16-ти разрядном процессоре накопление отсчетов происходит в 32-битных словах. Реализация расширенной (32-х битной) арифметики традиционна. В первом (младшем) слове постоянно происходит накопление приходящих отсчетов. Когда очередная сумма превышает предел 16 бит, о чем сообщает флаг переноса АС (if ac ...), старшее слово уве-

личивается на 1. Во-вторых, первый кадр из  $N$  записывается без суммирования, что исключает затраты времени на обнуление массивов, не увеличивая тем самым время потока, выделенное на суммирование.

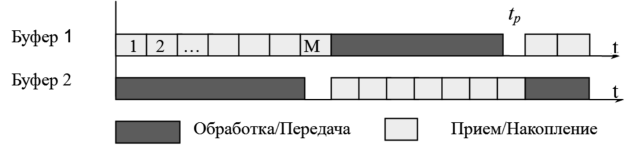


Рис. 4. Диаграмма работы ЦСП с двумя буферами

Третьей особенностью потокового накопления является использование двух буферов, каждый размером на кадр. В одном буфере происходит накопление, а из другого берутся элементы для обработки или передачи в последующие устройства (рис. 4). Использование двух буферов обеспечивает возможность параллельного выполнения двух операций – накопления и обработки. Началом нового кадра служит внешний импульс  $T_p$ , по которому сбрасываются в начальное состояние индексы массивов и производится подсчет просуммированных кадров. На рис. 4 отмечен тот факт, что при расчете затрат процессорного времени необходимо оставить резерв  $t_p$  времени при обработке накопленного кадра для того, чтобы исключить наложение нового кадра на не обработанный до конца кадр.

Если используется одноплатный процессор (у нас ADSP 2181 или BF537), то следует обратить внимание на два существенных момента. Процессорное время на обработку и передачу накопленных кадров появляется только в том случае, если частота появления отсчетов существенно ниже частоты работы процессора. Для используемых в пульсарном ОЭ-процессоре алгоритмов попиксельной обработки на один отчет тратится около 100 команд процессора ADSP 2181. Отсюда при тактовой частоте 33 МГц, максимальная частота взятия отсчетов из ФПЗС соответствует 300 кГц. Вторым моментом является наличие возможности вложенной обработки прерываний. Вложенность прерываний возникает в тот момент, когда во время обработки кадровых прерываний по импульсу  $T_p$  приходит прерывание конца преобразования АЦП по импульсу  $F_T$ . Наличие вложенных прерываний вызывает сложности при использовании теневого регистров процессора.

**3. Синхронное накопление кадров.**

В режиме синхронного интегрирования в течение  $M$  периодов модуляции накапливаются два или более массивов, соответствующих разным фазам модуляции. Так в модуляционных спектрометрах [2] обычно используется двухфазная модуляция, и накапливаются массивы, соответствующие сигналам антенны  $S$  и эквивалента  $E$ :

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} (s_{ni}), n = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (2)$$

$$E = \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} (e_{ni}), n = 1, 2, \dots, N \right\}.$$

Массив  $S$  будет находиться в ОЗУ с адреса 0 по  $N-1$ , а массив  $E$  – с адреса  $N$  по  $2N-1$ , занимая в итоге  $2N$  ячеек памяти. При непрерывном потоковом синхронном накоплении необходимо иметь двойной буфер. Объем памяти на буферирование кадров будет составлять:

$N_{BUF} = N \cdot p_M$ , где  $p_M$  – число фаз модуляции. Объем буферов  $N_{BUF}$  определяет минимальный размер памяти данных в ЦСП.

**4. Детектирование.** Под детектированием в ОЭ-процессорах обработки модулированных сигналов понимается вычитание сигнала, соответствующего одной фазе модуляции (четной), из сигнала, соответствующего другой фазе модуляции (нечетной). Детектирование можно проводить или после синхронного накопления отдельно всех четных и нечетных кадров, или в процессе потокового накопления. В случае симметричной двухфазной модуляции детектирование проводится в темпе поступления отсчетов с фотоприемника, путем суммирования, например, четных и вычитания нечетных кадров из общей суммы (3). В этом случае ДКВ не осуществляется, а алгоритм будет соответствовать рис. 3. Флаг суммирования/вычитания  $Det$  (Флаг DCV) необходимо переключать с «+1» на «-1» не на каждом отсчете, а в начале нового кадра

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} (Det \cdot s_{ni}), n = 1, 2, \dots, N \right\}. \quad (3)$$

В режиме синхронного детектирования вдвое сокращается объем используемого ОЗУ по сравнению с режимом синхронного накопления. Вдвое сокращается время, затрачиваемое на передачу данных в последующие устройства. Можно уменьшить разрядность массива, в котором накапливается сумма сигналов.

**5. Объединение отсчетов – формирование цифровых виртуальных светочувствительных элементов (ВСЭ).** Известен алгоритм объединения отсчетов, который применяется в цифровых камерах – Binning [11]. Отличительной особенностью рассматриваемого алгоритма формирования ВСЭ [12] является формирование произвольной конфигурации виртуального элемента при суммировании произвольного числа отсчетов (4), а не квадратных элементов с размерами 2, 4, 8 отсчетов.

$$S_{\Sigma} = \left\{ \sum_{l=0}^{L-1} (s_l) \right\}. \quad (4)$$

Так в пульсарном ОЭ-процессоре объединялось до 1000 отсчетов [13]. Реализация данного алгоритма предполагает увеличенной разрядности накапливаемой суммы  $S_{\Sigma}$  с последующим сокращением разрядов до базовой разрядности или разрядности АЦП (12 разрядов).

**6. Калибровка неравномерности чувствительности.** Данная калибровка предназначена для учета неодинаковости коэффициентов передачи  $\gamma_n$  элементов фотоприемника. Методика ее организации требует использования двух этапов: на первом этапе измеряются коэффициенты передачи  $\gamma_n$  элементов, а на втором этапе проводится сама калибровка каждого из  $n$  элементов массива кадра (5). Для выполнения операции (5) в ЦСП выделяется дополнительный буфер, хранящий значения коэффициентов передачи  $\gamma_n$ .

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} \gamma_n \cdot s_{n,i} \right\} \quad (5)$$

**7. Регистрация фазы сигнала с передискретизацией отсчетов.** Описанные выше алгоритмы в раз-

ной степени известны и достаточно просто реализуются. Данный же алгоритм для ОЭ-процессоров является новым. Он позволяет регистрировать фазу перемещающегося по ФПЗС сигнала точнее, чем период частоты перемещения зарядовых пакетов по способу ВЗН – точнее, чем частота дискретизации, реализуемая фотоприемником. Данный алгоритм позволяет решить вопрос повышения на порядок точности измерения момента прихода импульса в пульсарном ОЭ-процессоре [14].

Схема, поясняющая алгоритм приведена на рис.5. В верхней части показан сигнал с выхода ФПЗС, работающего по способу ВЗН. Отсчеты с фотоприемника идут непрерывно с периодом TCCD. Оптический сигнал перемещается по фотоприемнику с периодом TPSR и со скоростью, которой соответствует скорость перемещения зарядовых пакетов. Кадры сигналов с ФПЗС накапливаются в ЦСП. Количество просуммированных кадров в зависимости от наблюдаемого пульсара меняется от 100 до 106. Период TPSR импульсов пульсаров меняется от 1 мс до 1 с, так для пульсара PSR1937+21 TPSR = 1,5 мс (около 90 отсчетов) и постепенно дрейфует в процессе наблюдения. Временное разрешение сигнала определяется периодом TCCD и для пульсара PSR1937+21 соответствует 16 мкс. Необходимое временное разрешение – 2 мкс. Для увеличения разрешения для каждого суммируемого кадра сигналов предлагается:

1. Проведение измерений задержек  $\Delta t_m$  между импульсами взятия отсчета FT и импульсами периода сигнала TP.
2. Десятикратное (для получения требуемого временного разрешения) разномножение отсчетов с использованием линейной интерполяции [15].
3. Сдвиг сигнала на несколько отсчетов с целью компенсации задержки  $\Delta t_m$ .
4. Восстановление исходного количества отсчетов (десятикратная децимация).
5. Суммирование кадров.

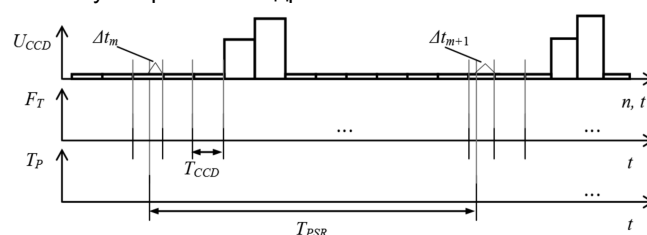


Рис. 5. Временные диаграммы сигнала с выхода ФПЗС и синхроимпульсов

Основная сложность реализации алгоритма заключается в измерении задержки  $\Delta t_m$ . Для этой цели можно использовать внутренний таймер ЦСП (рис. 1), частота работы которого должна быть не меньше десятикратной максимальной частоты переноса зарядов в ФПЗС. Таймер включается по импульсу TP, а выключается по импульсу FT. Данный алгоритм можно организовать, например в ЦСП BF537.

**8. Цифровая калибровка частотной шкалы.** Необходимость данной калибровки связана с задачей учета дрейфов параметров частотной шкалы  $f(T, n)$  АО-анализаторов спектра. В процессе получения одного интегрального (накопленного во времени) спектра радиосигнала (в спектрометрах) или профиля импульса (в пуль-

сарных процессорах) следует многократно учитывать смещение частотной шкалы. При этом, полное время интегрирования сигналов в радиоастрономии может достигать нескольких часов. Оценка параметров шкалы осуществляется по регулярно подаваемым частотным реперам, по которым определяются максимумы. Затем строится аппроксимирующая зависимость  $f_a(n)$  первого или второго порядков. При линейной оценке по зависимости  $f_a(n)$  определяются два параметра: общее смещение шкалы  $\Delta n_0$  и изменение масштаба  $\Delta nM$ . Общее смещение  $\Delta n_0$  определяется по смещению в  $f_a(n)$  центрального элемента частотной шкалы  $f_0$ . По указанным параметрам вычисляется смещение каждого элемента в кадре. Затем с использованием приема передискретизации (пункты 2, 3, 4) проводится смещение элементов кадра. Коэффициент размножения отсчетов в кадре KR выбирается исходя из необходимой точности измерений и имеющейся памяти в ЦСП. В нашем случае KR = 10. Указанной калибровке подвергается интегральный спектр сигнала, состоящий из множества кадров (10-1000) и накопленный в течение, например 10 минут. Общие вопросы и особенности метода калибровки описаны в работе [16]. Более подробно метод и алгоритм его реализации будут описаны в последующей публикации.

**Особенности реализации алгоритмов в ЦСП**

Реализация алгоритмов потоковой обработки обычно ограничена возможностями ЦСП, это, прежде всего, недостаточное быстродействие. Поэтому на этапе проектирования обычно рассматриваются два вопроса. Во-первых, вопрос параллельного выполнения операций. Во-вторых, выделение уровня алгоритмов обработки, которые будет выполнять ЦСП [1].

На рис. 6 показано разделение алгоритмов на относительно независимые потоки команд. Разделение команд проведено с учетом особенностей синхронизации потоков. Отдельно на низких уровнях алгоритмов, выполняющихся на максимальных тактовых частотах, указана возможность мягкой синхронизации. Под мягкой синхронизацией понимается возможность отложить или отсрочить на какое-то время обработку события (прерывания), в отличие от жесткой синхронизации, где такое откладывание сделать нельзя. Время отсрочки может меняться, но, понятно, что вместе со временем обработки, не должно превышать периода событий.

Отдельные потоки могут исполняться параллельно на разных устройствах. Выбор программно-аппаратного решения связан не только с необходимостью обеспечить регистрацию потока отсчетов с фотоприемника с частотой  $f_{T\_ФП}$ , но и с задачей обработки отсчетов на разных уровнях алгоритмов. Наиболее приемлемый путь при минимальных затратах на разработку – это использование возможностей ЦСП. Тактовая частота процессора  $f_{T\_ПРОЦ}$  должна превосходить частоту работы ФП:

$$f_{T\_ПРОЦ} \geq f_{T\_ФП} \left( N_{УПР} + m \cdot N_{ВВ} + \sum_i N_{АЛГ1\_i} + N_{АЛГ2} \right), \quad (6)$$

где  $N_{УПР}$ ,  $N_{ВВ}$ ,  $N_{АЛГ1}$ ,  $N_{АЛГ2}$  – количество тактов, затрачиваемых на управление; считывание в буфер отсчета

(при ДКВ  $m = 2$ ); обработку попиксельную и более высоких уровней алгоритмов. Указанное требование в большинстве задач обработки сигналов реализуется за счет построения многоуровневой аппаратуры.



Рис. 6. Схема многоуровневых алгоритмов, потоков команд и их реализации

Трёхуровневая реализация спецпроцессора является основным путем построения устройства. В этом случае обеспечивается как высокое быстродействие, так и реализация большинства алгоритмов. На уровне ПЛИС проводится управление фотоприемником и возможно регистрация потоков отсчетов. На уровне ЦСП организуется попиксельная и построковая обработка, некоторые алгоритмы которой описаны выше. На уровне компьютера завершается обработка и отображается процесс наблюдений.

Разработанный ОЭ-процессор (рис. 1) был использован на радиотелескопе РТ-64 для построения одиночных и интегральных профилей радиоизлучения как секундных, так и миллисекундных пульсаров [8]. Фотоприемник в ОЭ-процессоре работал по способу ВЗН. В цифровой части применен ЦСП типа ADSP 2181. В ЦСП выполнялись описанные выше алгоритмы №1-5. Для реализации остальных алгоритмов требуется ЦСП большей, чем на порядок производительности. На рис. 7а показан одиночный импульс радиоизлучения пульсара PSR 0329+54. На рис. 7б. приведен интегральный профиль, полученный за счет суммирования 200 одиночных импульсов.

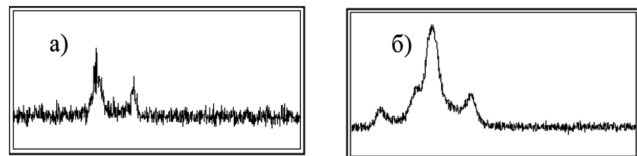
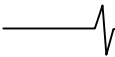


Рис. 7. Профиль одного импульса (а) пульсара PSR 0329+54 и средний интегральный профиль (б), полученные на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин)

Особенности обработки сигналов пульсара PSR 0329+54 следующие. Импульсы появляются с периодом  $T_p = 0,714$  с. Скорость частотного дрейфа импульсов такова, что требует установки частоты продвижения зарядов в регистре ФПЗС 180 кГц, с такой же частотой выводятся отсчеты из ФПЗС. Используется алгоритм цифровой ДКВ, поэтому на каждый отсчет с фотоприемника вводится два отсчета в ЦСП. Амплитуда сигнала от



импульса к импульсу меняется в десятки раз, поэтому уровень амплитуды сигнала устанавливается на уровне десятой части полного диапазона АЦП. Использовался алгоритм потокового накопления кадров в двух буферах. Размер каждого кадра составлял 1000 виртуальных элементов, причем каждый ВСЭ включал 114 отсчетов.

### Заключение

Особенностью ОЭ-процессоров является то, что ЦСП используются не для обработки изображений, а для обработки одномерных или двумерных оптических сигналов, которые могут иметь период единицы микросекунд. Отсюда, как частот бывает, для других систем ощущается недостаточное быстродействие ЦСП. Это же служит ограничением на применение сложных потоковых алгоритмов. Решение этой проблемы, прежде всего, лежит на пути распределенной между элементами (фотоприемником, ЦСП с программируемой логикой и ЭВМ) обработки сигналов. При этом ЦСП выполняет только рутинные низкоуровневые алгоритмы. Даже в этом случае для обработки двумерных оптических сигналов быстродействие ЦСП должно превышать 500 МГц. Поэтому для цифровой обработки сигналов в 2D процессорах [2] мы начинаем использовать ЦСП класса BlackFin (BF537) [17]. В случае применения этих ЦСП для обработки сигналов в 1D процессорах, можно существенно расширить набор используемых алгоритмов, в частности выполнять алгоритмы №7,8.

Автор выражает благодарность сотрудникам Центра оптоэлектронных проблем информатики СПбГПУ (проф., д.ф.-м.н. Лаврову А.П., к.ф.-м.н. Иванову С.И., к.т.н. Круглову С.К., к.ф.-м.н. Саенко И.И.) за совместные разработки ОЭ-процессоров и их применение, сотрудникам АКЦ ФИАН (в первую очередь к.т.н. Орешко В.В.) за проведение совместных наблюдений на радиотелескопе.

### Литература

1. Молодяков С.А. Системное проектирование оптоэлектронных процессоров обработки сигналов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.- 226 с., ISBN 978-5-7422-3016-8.
2. Лавров А.П., Молодяков С.А., Саенко И.И. Акустооптоэлектронные устройства в радиоастрономических приемных комплексах. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 2010.- №4.- С.233-242.
3. Melnick G. J., Stauffer J. R., Ashby M. L. N., et al. The Submillimeter Wave Astronomy Satellite: Science Objectives and Instrument Description. // *Astrophysical Journal*.- 2000.- V.539.- P.77-85.
4. Horn J., Siebertz O., Schmulling F., et al. A 4 x 1 GHz Array Acousto-Optical Spectrometer // *Experimental Astronomy*.- 1999.- V.9.- №1.- P.17-38.
5. Schieder R. Back-end Spectrometers // Seminar new perspectives for Post-HERSCHEL far infrared astronomy from space. Madrid, Sep 1- 4, 2003.
6. Esepkina N.A., Kruglov S.K., Molodyakov S.A., Khai-kin V.B. Data acquisition systems based on DSP for mul-tichannel radioastronomical receivers. // *Astronomy & Astrophysics Transactions*,- 2000.- V.19, №3-4.- P.616-623.
7. Лыпарь Ю.И., Молодяков С.А. Методология системного проектирования аналогоцифровых опто-электронных процессоров обработки сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 2011.- Т.138.- №6.- С.181-190.
8. Молодяков С.А. Оптоэлектронные процессоры с ПЗС фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов. // *Информационно-управляющие системы*. - 2008. - №6.- С. 2-8.
9. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров. // *Антенны*. - 2006. - №7.- С. 69-76.
10. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров. // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 1998.- №2.- С.21-29.
11. Holst G.C. CCD arrays, cameras and displays. SPIE Press.- 1998.- 375p.
12. Молодяков С.А. Управление информационными характеристиками фотоприемника на приборе с зарядовой связью в устройстве ввода изображения в ЭВМ.// *ПТЭ*.- 1987.- №3.- с.71-75.
13. Есепкина Н.А., Илясов Ю.П., Лавров А.П., Молодяков С.А., Орешко В.В. Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров // *Письма в ЖТФ*.- 2003.- Т.29, Вып.21.- С.32-39.
14. Есепкина Н.А., Lavrov A.P., Molodyakov S.A. Acoustooptical pulsar processor usage for interstellar medium dispersion measurements. // *Proc. SPIE*.- 2005.- V.5447.- P.288-295.
15. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов. - М.: Бинум-Пресс.- 2006.- 656 с.
16. Есепкина Н.А., Lavrov A.P., Molodyakov S.A. Acoustooptical pulsar processor frequency scale calibration for increase accuracy measurement of time of arrival radioemission impulses. // *Proc. SPIE*.- 2006.- V. 6251.- P.269-276.
17. Молодяков С.А., Юдин К.Ю. Цифровая камера на сигнальном процессоре BF537 для гибридной пульсарной машины. // Научные исследования и инновационная деятельность: материалы научно-практической конференции, 2009г., СПбГПУ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.- С.56-65.

## FEATURES AND ALGORITHMS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN OPTOELECTRONIC DEVICES

*Molodykov S.A.*

Digital signal processing in optoelectronic devices used in the processing of optical signals from the output of the image sensor. Algorithms for flows digital data processing are discussed as applied to radio astronomy.