

УДК 004.386, 004.272

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССОРЫ С ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКАМИ. КОНВЕЙЕРНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

С. А. Молодяков,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Обсуждаются алгоритмы потоковой обработки информации в оптоэлектронных процессорах. Конвейерная обработка сигналов с применением ПЗС-фотоприемника в специальном режиме накопления позволяет существенно сжать поток данных на входе цифрового узла. Приводится одна из возможных реализаций оптоэлектронного процессора непрерывной обработки сигналов применительно к задаче радиоастрономии.

Ключевые слова — оптоэлектронный процессор, конвейер, фотоприемник на приборе с зарядовой связью, акустооптический анализатор спектра, аппаратная функция, пульсар.

Введение

В последнее десятилетие стремительно развиваются все направления вычислительной техники, особенно те, которые связаны с повышением скорости вычислений. Ввиду технологических ограничений на рост тактовых частот электронных процессоров все больше внимания уделяют исследованию и созданию архитектур отдельных процессоров, построенных на новых физических принципах, а также мультипроцессорных (многоядерных) систем с разнородными процессорами. Особое внимание привлекают оптические методы обработки информации. Одним из типов новых процессоров являются оптоэлектронные (ОЭ) процессоры, в которых высокие скорости и параллельность оптических преобразований сочетаются с традиционными электронными и цифровыми методами обработки. В рамках мультипроцессорных систем особенно эффективно применение таких гибридных ОЭ-процессоров на этапе предварительной обработки информации в системах обработки потоков данных в мультимедийных задачах, задачах астрономии, связи и др.

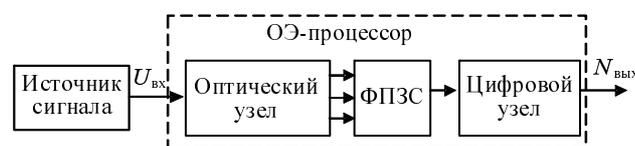
Наиболее общая структура ОЭ-процессора, обеспечивающего решение задач обработки сигналов, имеет вид, представленный на рис. 1.

Информация в ОЭ-процессор (сигнал $U_{\text{вх}}$) поступает в реальном времени с выхода источника сигналов. Оптический узел (оптический процессор) осуществляет практически в реальном времени интегральное преобразование над сигналом, вид которого определяется выбранной схемой. Пространственное распределение интенсивности све-

та регистрируется многоэлементным ПЗС-фотоприемником ФПЗС и в виде последовательности отсчетов сигналов вводится в цифровой узел. Цифровой узел (спецпроцессор) обеспечивает надежную и долговременную память, необходимую точность и гибкость алгоритмов обработки сигнала, возможность оперативно управлять режимом работы ФПЗС и оптического процессора. Результатом обработки потока входных данных является выходная информация $N_{\text{вых}}$.

Описанный ОЭ-процессор по классификации параллельных вычислительных систем Флинна можно рассматривать как векторный процессор класса SIMD [1]. Векторность достигается за счет использования оптического узла. Размер входного вектора оценивается для 1D-процессора в 1000 элементов, а для 2D-процессора — в 10^6 элементов.

Быстродействие ОЭ-процессора в первую очередь определяется быстродействием оптического процессора, которое обычно для фурье-процессора оценивают величиной 10^{17} флопсов [2]. Однако традиционные ограничения, связанные с медленными вводом и выводом информации из оптического узла, снижают быстродействие до величины 1 Гфлопс.



■ Рис. 1. Структурная схема ОЭ-процессора

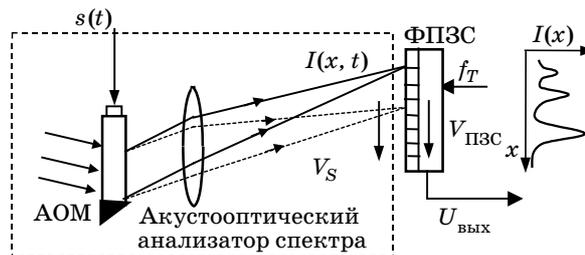
Особенно не хватает быстродействия при выводе, когда параллельную оптическую информацию фотоприемник преобразует в последовательную для цифрового узла.

Структуры оптических 1D- и 2D-устройств, особенно акустооптических, для спектральной и корреляционной обработки сигналов достаточно глубоко изучены как в России [3–7], так и за рубежом [8, 9]. Однако для эффективного применения оптической обработки информации необходимо использовать современные технологические достижения и разрабатывать новые алгоритмы распределенной потоковой обработки сигналов. Среди достижений по разработке компонент процессоров следует отметить создание: многоэлементных матриц лазерных излучателей с вертикальными резонаторами (vertical cavity surface emitting laser — VCSEL); ПЗС-фотоприемников с различной геометрией и архитектурой; фотоприемников на МОП-структурах, которые включают и сенсорную матрицу, и программируемую логику для размещения программ обработки; микропроцессоров с тактовыми частотами до 1 ГГц. Известен ОЭ-процессор EnLight 256 компании Lenslet (Израиль) [10]. Он содержит линейку 256 лазеров, матричный транспарант размерностью 256 × 256 элементов, выполнен на основе микротехнологии (MEMS), работает на тактовых частотах 125 МГц (производительность 8000 ГГц). Процессор доведен до уровня использования его в качестве процессора обработки сигналов, оснащен всем комплексом технических средств отладки и разработки программ (отладочный модуль, среда разработки).

При разработке ОЭ-процессора решаются три задачи: выбор типа оптического узла, определение режимов работы фотоприемника по обработке оптического сигнала и определение алгоритмов работы цифрового узла. При этом процессор цифрового узла полностью загружен операциями по управлению фотоприемником и потоковой обработкой отсчетов и является неотъемлемой частью ОЭ-процессора. В данной статье будет рассмотрен новый способ обработки сигналов в ОЭ-процессоре на примере задачи спектрального анализа. Будет показано преимущество этого способа, возможность его реализации с использованием линейного ФПЗС, а также его применение в радиоастрономии.

Конвейерная обработка сигналов в ОЭ-процессоре

Схема оптического узла рассматриваемого ОЭ-процессора соответствует традиционной схеме акустооптического спектроанализатора [5, 11] (рис. 2). 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



■ Рис. 2. Схема оптического узла ОЭ-процессора

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. Распределение $I(x, t)$ детектируется и накапливается в ФПЗС, а затем считывается с частотой f_T .

В эквивалентной схеме аналоговой части ОЭ-процессора (рис. 3) выделены три узла и соответствующие им основные этапы преобразования: акустооптическое преобразование, накопление и перенос зарядовых пакетов в ФПЗС, последовательное считывание зарядов из выходного узла с усилением и аналого-цифровым преобразованием [7].

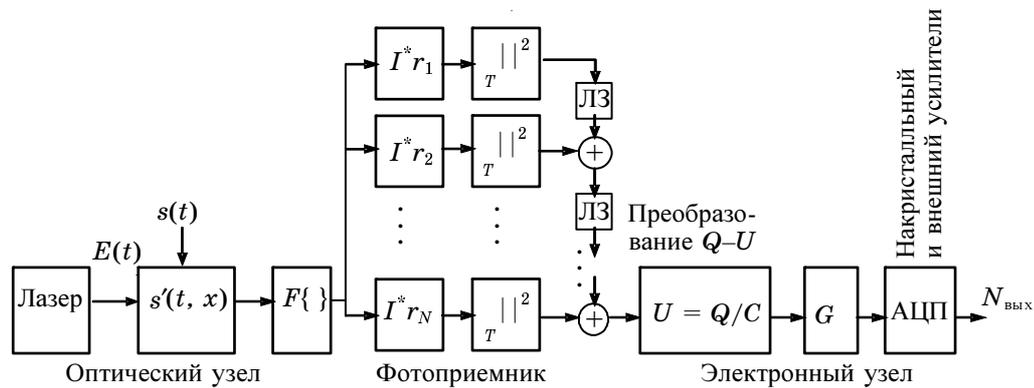
На первом этапе когерентное излучение проходит через акустооптический транспарант: $E(t) \times s(t - x / v(t))$, где s — входной сигнал; x — координата в плоскости транспаранта — АОМ; v — скорость волны в звукопроводе модулятора. На модуляторе происходит дифракция Брэгга, в фокальной плоскости Фурье-линзы наблюдается сигнал, близкий к спектру входного сигнала: $S(\Omega) = F[s(t)]$. Этот сигнал взвешен аппаратной функцией спектроанализатора $h(x, \Omega)$. В плоскости фотоприемника наблюдается сигнал

$$I(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega, t) \cdot h(x, \Omega) d\Omega. \quad (1)$$

На втором этапе происходит детектирование, дискретизация и интегрирование оптического сигнала в элементах ФПЗС:

$$Q_i(n) = \int_0^{T_{\text{int}}} \int_{\Delta x} |I(t, x)|^2 \cdot r(x'_i - x) dx dt, \quad (2)$$

где $Q_i(n)$ — заряд в i -м элементе ФПЗС; $r(x)$ — апертурная функция элемента. Каждый из N элементов ФПЗС имеет свой коэффициент передачи. Третий этап — передача зарядовых пакетов по ФПЗС. Наличие линии задержки ЛЗ отражает последовательный по тактовым импульсам характер передачи. Четвертый этап соответствует преобразованию зарядового пакета в цифровой отсчет. Заряд Q претерпевает преобразование в выходном узле с емкостью C , усиливается в двух усилителях (G — коэффициент усиления) и преобразуется в аналого-цифровом преобразователе АЦП.



■ Рис. 3. Эквивалентная схема аналоговой части ОЭ-процессора

При обработке сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ), которые возникают в задачах связи, локации, радиоастрономии, сигнал $I(x, t)$ перемещается по элементам ФПЗС со скоростью, определенной параметрами самого сигнала. Для непрерывной регистрации такого перемещающегося изображения можно применить один из двух режимов сканирования — цифровое или аналоговое. Первый режим традиционный и широко применяется, второй — разрабатывается с участием автора и применяется в ОЭ-процессорах при решении различных задач.

Сравним эти режимы при использовании ОЭ-процессора в радиоастрономии для обработки сигналов пульсаров [12]. При цифровом сканировании за время прохождения сигнала пульсара по фотоприемнику необходимо зарегистрировать не менее 100 отдельных кадров с ФПЗС, а затем в цифровом процессоре обработки просуммировать их с компенсацией сдвига. Период следования импульсов для одного из ярких и широко наблюдаемых пульсаров PSR 1937+21 составляет 1,55 мс. Отсюда требуемое время считывания кадра с ФПЗС 15 мкс, а частота вывода для 1000-элементного фотоприемника — около 70 МГц. Максимальные же частоты вывода зарядовых пакетов из ФПЗС у лучших фирм мира (Dalsa, Sony) не превышают 40 МГц. Однако в процессоре Communication Research Laboratory, Japan [13] применено цифровое сканирование. В этой системе максимальная частота вывода зарядовых пакетов f_T составляет 20 МГц, при этом пространственное разрешение уменьшено до 256 элементов. Другими недостатками такого подхода являются: перерывы в сеансах регистрации сигналов, необходимые для цифровой обработки кадров; повышенный уровень собственных шумов ОЭ-процессора, связанный с процессами неэффективности переносов и считывания из выходного узла ФПЗС [14].

При аналоговом сканировании зарядовые пакеты в ФПЗС-регистре перемещаются синхронно и параллельно с перемещением изображения по фотоприемнику: $V_{ПЗС} = V_S$. Скорость движения $V_{ПЗС}$ элементов ПЗС определяется внешним управлением (частотой f_T): $V_{ПЗС} = lf_T$, где l — шаг распо-

ложения элементов. В процессе перемещения в зарядовых пакетах происходит накопление, а значит и увеличение заряда. На выходе ФПЗС формируется сигнал, соответствующий огибающей радиоимпульса. ФПЗС в этом случае работает в режиме временной задержки и накопления — ВЗН (time delay and integrating — TDI) [15]. Полное время накопления сигнала $T_S = f_T N$, где N — количество элементов в регистре ФПЗС. В этом случае ОЭ-процессор работает в конвейерном режиме с двумя этапами: накопление кадра зарядовых пакетов с одновременным суммированием с зарядами предыдущего кадра, перенос пакетов на один ПЗС-элемент и снова первый этап. Конвейерное накопление зарядов соответствует классу MISD (конвейерных процессоров) в классификации Флинна [1]. Конвейерный режим существенно упрощает аппаратуру цифровой регистрации, позволяет использовать линейный ФПЗС с большим количеством элементов (более 1000). Для пульсара PSR 1937+21 частота конвейера (частота вывода из ФПЗС) составляет около 100 кГц, что легко получить для всех линейных фотоприемников.

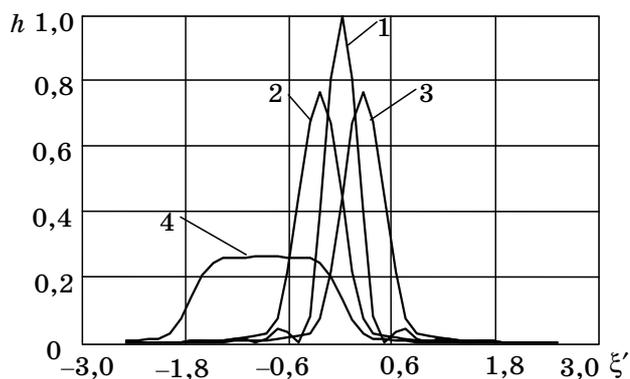
Несинхронность конвейера

Рассмотрим влияние на аппаратную функцию процессора рассогласование скорости сканирования (конвейера) $V_{ПЗС}$ и скорости перемещения сигнала V_S , считая, что сигнал ведет себя как ЛЧМ-сигнал: $V_S = V_{ЛЧМ}$. ЛЧМ-сигнал с длительностью $T_C \gg T_A$ можно записать: $s(t) = s_0 \cos(2\pi f_0(t - T_C/2) - \mu_0(t - T_C/2)^2)$, где s_0 — амплитуда; $\mu_0 = 2\pi \Delta f_S / T_C$ — крутизна ЛЧМ-сигнала, здесь Δf_S — полоса частот, равная полосе АОМ.

Определим аппаратную функцию процессора в движущейся со скоростью $V_{ПЗС}$ системе координат ξ в случае приближения равномерной засветки и пренебрежения квадратичного набега фаз [16]:

$$h(\xi) = \frac{1}{T_C} \int_0^{T_C} \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left(i \frac{L}{F\lambda} x \left(\xi - \Delta V \left(t - \frac{T_A}{2} \right) \right)\right) dx dt, \quad (3)$$

где L — пространственная апертура АОМ; F — фокусное расстояние линзы; λ — длина волны све-



■ Рис. 4. Аппаратная функция процессора: 1 — оптимальная частота конвейера; 2, 3 — отстроенная на 0,5%; 4 — отстроенная на 2%

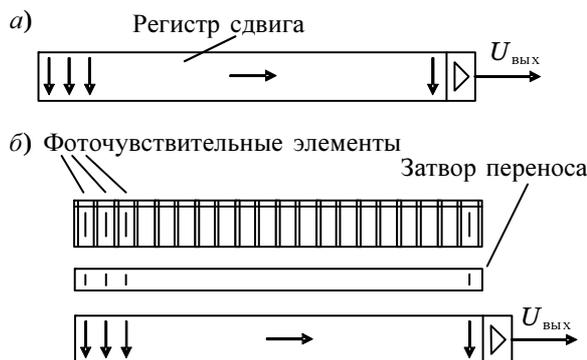
та; x — нормированная координата в плоскости АОМ; $\Delta V = V_{\text{ЛЧМ}} - V_{\text{ПЗС}}$ — рассогласование скоростей. $V_{\text{ЛЧМ}} = \mu_0 l / \delta f_l$, где δf_l — шаг частотной шкалы. Во временной области $h(t) = h(\xi / V_{\text{ПЗС}})$.

Аппаратные функции, рассчитанные по формуле (3) при разных частотах конвейера (отстроенных от оптимальной), представлены на рис. 4. Координата нормирована на ширину аппаратной функции процессора $\xi' = \xi / \delta f_A$. Если движение зарядов в ФПЗС синхронно с движением сигнала: $\Delta V = 0$, то аппаратная функция конвейерного процессора является функцией $\text{sinc}^2(k\xi)$. Видно, что при рассогласовании наблюдается уширение, уменьшение амплитуды и смещение аппаратной функции. Необходима точная настройка (не хуже 0,5%) частоты конвейера на скорость изменения частоты сигнала.

Реализация режима конвейерной обработки

Применение конвейерного режима связано с решением двух вопросов: организации режима ВЗН в фотоприемнике и его использования в рамках ОЭ-процессора. Известны специализированные матричные ВЗН-фотоприемники, которые применяются, в частности, в системах наблюдения участков небесной сферы при неподвижном телескопе. Такие ФПЗС выпускаются преимущественно фирмами Dalsa, Reticon, Texas Instruments и др. Для организации конвейерного накопления в линейных ФПЗС возможно использовать широко выпускаемые фотоприемники, предназначенные для покадрового вывода изображений.

Можно выделить две основные схемы линейных ФПЗС для организации режима ВЗН: с одним регистром накопления и сдвига (отечественный ФПЗС-1Л) и с выделенным регистром накопления (фотоприемник ILX703A фирмы Sony). В первой схеме (рис. 5, а) накопление и перенос зарядовых пакетов происходит в регистре сдвига и вывода; режим ВЗН всегда реализуется. Во второй схеме (рис. 5, б) накопление зарядов происходит в фоточувствительных элементах выделенного регистра накопления, затем заряд переносится в регистр

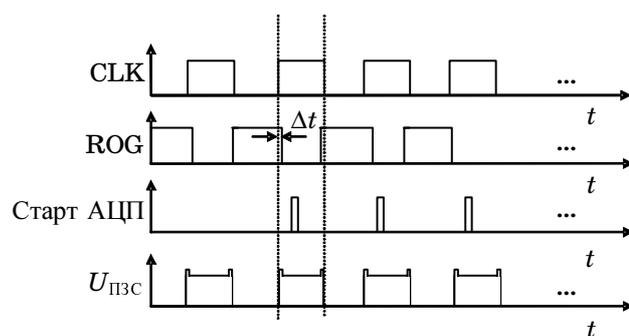


■ Рис. 5. Типовые структуры линейных ФПЗС: а — однорегистровые; б — с выделенным регистром накопления

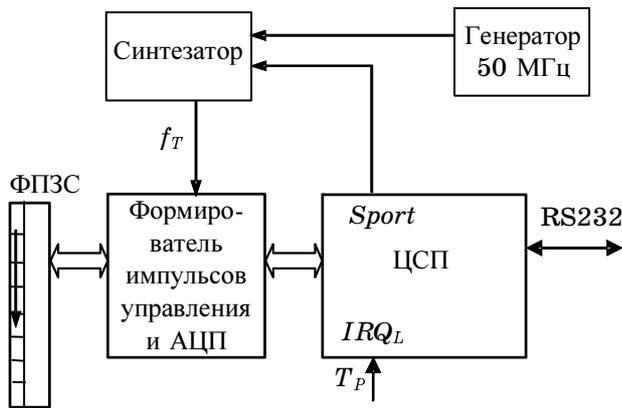
сдвига, сдвигается на один элемент, новый заряд из регистра накопления переносится в регистр сдвига, где он суммируется с имеющимися зарядами, сдвигается и т. д. Чаще всего в регистре накопления используются фотодиоды. Не каждый фотоприемник с выделенным регистром накопления позволяет реализовать ВЗН-режим.

Мы уже несколько лет используем ФПЗС ILX703 фирмы Sony для конвейерной обработки сигналов. Схема линейки ФПЗС аналогична схеме на рис. 5, б. Режим ВЗН является нестандартным для данного фотоприемника. Временная диаграмма сигналов представлена на рис. 6. Сигнал CLK обеспечивает сдвиг на один элемент зарядовых пакетов в выходном регистре. Сигнал ROG подается на регистр переноса и обеспечивает перенос зарядов из регистра накопления в выходной регистр сдвига. Экспериментально определены временные соотношения сигналов CLK и ROG. Отрицательный импульс ROG должен быть вложен в положительный импульс CLK. Время Δt должно быть не меньше 100 нс. На диаграмме показана форма сигнала с выхода ФПЗС, которая отличается от формы сигнала кадрового режима, и момент запуска АЦП.

Для применения конвейерной обработки сигналов в цифровую часть ОЭ-процессора были включены (рис. 7): целочисленный цифровой сигнал



■ Рис. 6. Временная диаграмма сигналов ВЗН управления ФПЗС ILX703



■ Рис. 7. Структурная схема цифровой части конвейерного ОЭ-процессора

ный процессор ЦСП ADSP2181; формирователь импульсов управления ФПЗС; синтезатор (DDS AD9835) тактовой частоты f_T , программируемый от ЦСП. Связь с ЭВМ поддерживается через интерфейс RS232. Формирователь импульсов по тактовым импульсам f_T вырабатывает сигнал старта АЦП и два сигнала управления: ROG и CLK (см. рис. 6). В схеме реализована возможность переключать по команде из компьютера режим работы — конвейерную или кадровую обработку сигналов. ЦСП выполняет следующие функции обработки: двойную цифровую коррелированную выборку; формирование виртуальных элементов за счет суммирования отсчетов; синхронное с периодом повторения сигналов суммирование кадров в 32-разрядных словах; непрерывный потоковый ввод отсчетов и вывод их в ЭВМ без потери входной информации.

В процессе работы зарядовые пакеты непрерывно выводятся с ФПЗС, также непрерывно после АЦП отсчеты поступают в ЦСП, который их считывает по прерыванию от АЦП. Для выделения кадров, которые соответствуют периоду входных импульсов, используется внешний импульс T_p . Особенность описанной схемы заключается в отсутствии синхронизации между импульсом периода кадров T_p и импульсами с ФПЗС. В результате точность определения момента прихода входного сигнала определяется временем одного отсчета с фотоприемника (период импульса CLK).

Применение конвейерного ОЭ-процессора для наблюдения пульсаров на радиотелескопе РТ-64

В астрофизике и наблюдательной радиоастрономии одним из объектов исследований являются пульсары, представляющие собой нейтронные звезды с высокой и очень стабильной скоростью вращения. Импульсное радиоизлучение пульсаров наблюдается в широком диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц с периодом повторения импульсов T_p от единиц миллисекунд до единиц секунд. Радиоизлучение пульсаров имеет ряд особенностей, глав-

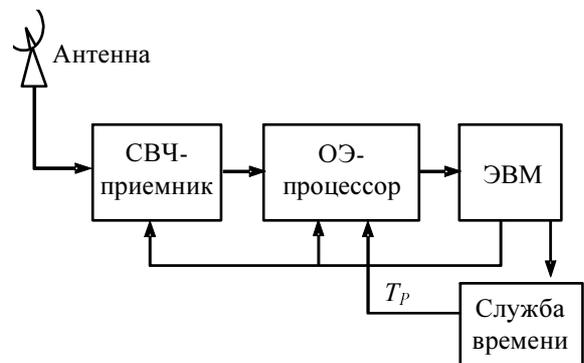
ная из которых — дисперсия в межзвездной среде [12]. Из-за дисперсии короткий импульс радиоизлучения пульсара перемещается по частоте в полосе приема Δf с центральной частотой f от высоких частот к низким со скоростью

$$\alpha_{DM} = \frac{f^3}{8,3 \cdot 10^3 DM}, \quad (4)$$

где DM — мера дисперсии пульсара, парсек/см³; f — частота, МГц. Каждый пульсар имеет свою DM и, следовательно, свою скорость перемещения по фотоприемнику. В некоторой полосе частот импульсы пульсаров можно представить в виде ЛЧМ-импульсов. Для обработки этих импульсов можно использовать ОЭ-процессор с конвейерным режимом обработки.

Нами был разработан рабочий макет ОЭ-процессора. В нем использовался He-Ne-лазер ЛГН-207А, АОМ, выполненный на кристалле TeO₂ с временной апертурой $T_A = 15$ мкс, и линейный ФПЗС ILX-703А (Sony), имеющий 2048 элементов размером 14×14 мкм. Акустооптический процессор имел центральную частоту $f_0 = 150$ МГц, рабочую полосу частот $\Delta f_A = 80$ МГц и шаг следования частотных каналов $\delta f_i \approx 82$ кГц. ЦСП программированием синтезатора на разные тактовые частоты f_T обеспечивал перестройку процессора для обработки сигналов пульсаров с мерой дисперсии от 15 до 1000 парсек/см³.

Установлен ОЭ-процессор в пульсарном приемном комплексе радиотелескопа РТ-64 с диаметром антенны 64 м Калязинской радиоастрономической обсерватории ФИАН [17] (рис. 8). Малые плотности потоков большинства пульсаров (порядка 10^{-28} Вт/(м²·Гц) на частоте 1,4 ГГц) требовали дополнительного накопления сигналов по большому числу (до 10^5 и более) периодов для получения отношения сигнал / шум > 1. Полное время накопления для получения профиля одного импульса достигало 2 ч, причем в ЦСП сигналы накапливались в течение 3 мин. Работа ЦСП синхронизировалась по импульсам «период пульсара»



■ Рис. 8. ОЭ-процессор в приемном комплексе радиотелескопа

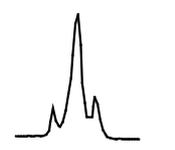
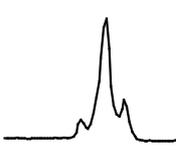
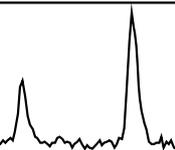
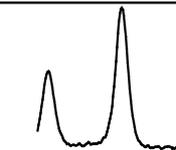
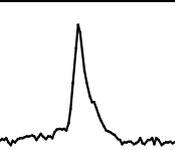
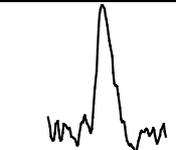
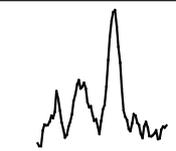
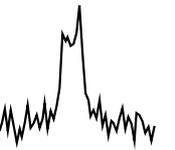
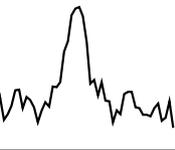
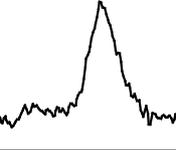
T_p . Специальная система синхронизации (Служба времени) рассчитывала ожидаемые моменты прихода импульсов излучения пульсаров, учитывая изменения периода из-за вращения Земли и другие факторы.

С помощью разработанного процессора в диапазоне 1,4 ГГц были проведены успешные наблюдения ряда пульсаров, как секундных, так и миллисекундных, одновременно и синхронно с их регистрацией в диапазоне 600 МГц на штатном фильтровом комплексе АС-600/160 ФИАН. Профили импульсов представлены в таблице. Время получения профиля для разных пульсаров различно и определяется плотностью потока S излучения пульсара. Если для первых двух пульсаров это время составляло 10–15 мин, то для слабых ($S = 2\text{--}4$ мЯн) миллисекундных пульсаров PSR 0613–02, 1640+22, 1643–12 время интегрирования достигало 2 ч. Профиль импульсов миллисекундного пульсара PSR 1713+07 выделялся из-под шума уже за 10–20 мин и существенно лучше, чем на фильтровом приемнике. Формы профилей импульсов пульсаров,

полученные на разных комплексах, несколько отличаются (особенно для пульсара PSR 0613–02), что связано с разными частотными диапазонами, на которых работают эти устройства. Наблюдается более низкое отношение сигнал/шум у ОЭ-процессора, так как в диапазоне 1,4 ГГц плотность потока излучения значительно меньше, чем на частоте 0,6 ГГц.

Особенность конвейерной работы предполагает, что в процессе регистрации сигналов от миллисекундных пульсаров по ФПЗС одновременно перемещаются несколько импульсов, для PSR 1937+21 таких импульсов пять. В случае секундных пульсаров по ФПЗС проходит один импульс. Представленные результаты наблюдений пульсаров (см. таблицу) позволяют сделать выводы о работоспособности рассмотренного ОЭ-процессора, а также о видимости приведенных пульсаров на радиотелескопе, выбрать пульсары для задач одновременных наблюдений на разных частотах. Более подробно результаты наблюдений представлены в работе [18]. Применение ОЭ-процессора для решения задачи измерения меры дисперсии DM показано в работе [19]. В настоящее время ведутся исследования по улучшению стабильности работы описанного ОЭ-процессора, связанные с разработкой методов учета дрейфов оптического узла.

Сравнение профилей пульсаров, полученных на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин) при одновременных наблюдениях на двух пульсарных комплексах

Пульсар	ОЭ-процессор	АС600/160
1. PSR 0329+54 $DM = 26,8$ $T_p = 0,714$ с $S = 203$ мЯн		
2. PSR 1937+21 $DM = 71,02$ $T_p = 1,55$ мс $S = 16$ мЯн		
3. PSR 1713+07 $DM = 15,993$ $T_p = 4,57$ мс $S = 4$ мЯн		
4. PSR 0613–02 $DM = 38,785$ $T_p = 3,06$ мс $S = 2,5$ мЯн		
5. PSR 1640+22 $DM = 18,415$ $T_p = 3,163$ мс $S = 3,5$ мЯн		
6. PSR 1643–12 $DM = 62,4$ $T_p = 4,62$ мс $S = 3$ мЯн		

Заключение

В статье рассмотрен ОЭ-процессор, в котором данные можно обрабатывать в реальном времени не только параллельно, но и конвейерно; продемонстрирована его работа на радиотелескопе РТ-64.

Перспективы использования таких процессоров для обработки сигналов связаны с улучшением параметров, применением новых оптических вычислителей и быстродействующих цифровых процессоров, а также с разработкой новых методов и алгоритмов обработки. Так, ведутся работы по созданию 2D-оптического вычислителя с использованием 2-канального АОМ. Это позволит реализовать в оптике совместное преобразование Фурье двух радиосигналов ортогональных поляризаций, определить их фазовые соотношения и поляризационные характеристики. В качестве ядра цифровой части рассматривается быстродействующий сигнальный процессор BlackFin (600 МГц).

Автор выражает благодарность коллегам Центра оптоэлектронных проблем информатики СПбГПУ за совместную работу и участие в разработке и применении ОЭ-процессора, сотрудникам ФИАН доктору физ.-мат. наук Ю. П. Илясову и канд. техн. наук В. В. Орешко за организацию и участие в наблюдениях на радиотелескопе РТ-64. Автор особенно благодарен организатору работ — руководителю Центра доктору физ.-мат. наук Н. А. Есепкиной.

Работа поддержана грантами РФФИ № 07-02-01211 и № 06-08-00090.

Литература

1. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. СПб.: Питер, 2002. 704 с.
2. Vanderlugt A. Optical Signal Processing. N. Y.: J. Wiley Inc., 1992. 506 p.
3. Кулаков С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. Л.: Наука, 1978. 144 с.
4. Егоров Ю. В., Наумов К. П., Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
5. Парыгин В. Н., Балакший В. И. Оптическая обработка информации. М.: Изд-во МГУ, 1987. 142 с.
6. Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. М.: Радиотехника, 2007. 184 с.
7. Хименко В. И., Тигин Д. В. Статистическая акустооптика и обработка сигналов. М.: Изд-во СПбГУ, 1996. 292 с.
8. Bradley G. Voone. Signal Processing Using Optics // Fundamentals, Devices, Architectures, and Applications. Oxford University Press, 1997. 416 p.
9. Jeiping Xu, Stroud R. Acousto-Optic Devices // Principles, Design and Applications. Wiley-Interscience, 1992. 672 p.
10. <http://www.lenslet.com>
11. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. Акустооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 2. С. 21–29.
12. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980. 315 с.
13. Hanado Y., Imae M., Sekido M. Millisecond Pulsar Observation System Using Acousto-Optic Spectrometer // IEEE Trans. On Instrum. and Measurement. 1995. Vol. 44. N 2. P. 107–109.
14. Holst G. C. CCD arrays, cameras and displays. SPIE Press, 1998. 375 p.
15. Барб Д. Ф. Режим задержки и интегрирования в приемниках изображения // Полупроводниковые формирователи сигналов изображений: Сб. ст. / Под ред. П. Йесперса. М.: Мир, 1979. С. 499–510.
16. Лавров А. П., Молодяков С. А. Оптоэлектронный пульсарный процессор и его аппаратная функция // Вычислительные, измерительные и управляющие системы: Тр. СПбГПУ; Ф-т техн. киберн. СПб., 2004. С. 114–119.
17. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. и др. Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 21. С. 32–39.
18. Есепкина Н. А., Лавров А. П., Молодяков С. А. Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров // Антенны. 2006. № 7. С. 69–76.
19. Esepkina N. A., Lavrov A. P., Molodyakov S. A. Acoustooptical pulsar processor usage for interstellar medium dispersion measurements // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5447. P. 288–295.