### УДК 004.421: 520.8

## МЕТОД КАЛИБРОВКИ ЧАСТОТНОЙ ШКАЛЫ ПУЛЬСАРНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРОЦЕССОРА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦСП

Лавров А.П., д.ф-м.н., профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, e-mail: lavrov@cef.spbstu.ru; 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, акустооптический анализатор спектра, частотная шкала, дрейф, калибровка, перезагрузка программ, передискретизация.

#### Введение

Одним из путей создания современных высокопроизводительных систем обработки сигналов является разработка гибридных оптоэлектронные (ОЭ) процессоров, включающих оптические и цифровые узлы. Такие ОЭ-процес-

соры наряду с высоким быстродействием имеют ряд существенных преимуществ по сравнению, например, с чисто цифровыми процессорами – это простота, дешевизна, надежность работы, а также низкое энергопотребление (на один канал) [1]. В значительной степени указанные преимущества достигаются благодаря применению акустооптических (АО) вычислителей, выполняющих спектральный или корреляционный анализ радиосигналов с эквивалентной производительностью до 1022 оп./сек. ОЭ-процессоры легко встраиваются в действующие системы, так большинство радиотелескопов оснащены радиоспектрометрами с АО анализаторами спектра (АОАС) [2].

Одна из проблем использования ОЭ-процессоров связана с наличием нестабильности (дрейфов) амплитудных и частотных параметров аналогового узла, каким является АОАС [3]. Нестабильность амплитудных параметров в первую очередь связана с изменением с течением времени интенсивности лазерного излучения, а нестабильность частотных параметров связана с зависимостью параметров частотной шкалы от температуры звукопровода АО-модулятора [4]. Учет амплитудной нестабильности в радиоастрономических системах осуществляется традиционным образом - за счет использования модуляционного приема [5]. Рассмотрению методов учета нестабильности параметров частотной шкалы АОАС посвящено недостаточно публикаций, в действующих системах указанные методы применяются редко. В статье представлено описание метода калибровки частотной шкалы и его реализация в пульсарном ОЭпроцессоре с применением цифрового сигнального процессора (ЦСП).

### Пульсарный оптоэлектронный процессор. Постановка задачи

Одним из видов процессоров, которые применяются

Описан метод калибровки и аппаратура цифровой обработки сигналов в оптоэлектронном процессоре регистрации импульсного радиоизлучения космических источников – пульсаров. Цифровая обработка осуществляется после получения сигнала с выхода аналоговой части процессора. Метод калибровки предусматривает введение нового режима работы процессора, а также измерение основных параметров аналоговой части с целью их учета при получении интегрального профиля импульсов радиоизлучения. Продемонстрирован способ реализации метода, предполагающий использование перезагрузки программ в цифровой сигнальный процессор и вторичную обработку данных.

> в приемных радиоастрономических системах, являются пульсарные процессоры [2]. Они предназначены для регистрации радиоизлучения пульсаров, которые представляют собой нейтронные звезды с высокой и очень стабильной скоростью вращения [6]. Сигналы от пульсаров в виде импульсов широкополосного радиоизлучения с периодом ТР попадают на Землю и регистрируются на радиотелескопах. Импульсное радиоизлучение пульсаров наблюдается в широком диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц. Для импульсов, огибающих излучение, пульсаров характерны малая длительность (5% и менее от периода), переменные форма и амплитуда импульсов и очень стабильный период ТР. Наблюдаемые значения периода лежат в пределах от 1,56 мс для пульсара PSR 1937+21 (миллисекундные пульсары) до 4,31 с для пульсара PSR 1845-19 (секундные пульсары) [6]. Из-за дисперсии в межзвездной среде короткий импульс радиоизлучения пульсара при его наблюдении на Земле дрейфует по частоте в полосе приема от высоких частот к низким. В большинстве случаев малые плотности потоков энергии от пульсара дают на входе приемника отношение с/ш << 1. Задача пульсарного процессора заключается в обработке принимаемого радиоизлучения - в выделении пульсара из-под шума для построения огибающей – профиля импульсов радиоизлучения. Для этого в пульсарных процессорах выполняется компенсация дисперсии, а затем длительное синхронное с периодом ТР накопление сигналов. Компенсация дисперсии при широкой полосе приема – до 100 и более мегагерц выполняется по последетекторной схеме: спектральная фильтрация радиоизлучения в большом числе n параллельных каналов (п - сотни), детектирование сигналов на выходе фильтров, сложение этих сигналов с взаимными задержками, определяемыми дисперсией [6, 7].

Для обработки радиоизлучения пульсаров можно ис-

пользовать ОЭ-процессоры [8, 9]. Первое применение пульсарного ОЭ-процессора проведено авторами совместно с сотрудниками ФИАН в 2002 году на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин) [10]. Обобщенная схема приемного комплекса с пульсарным ОЭ-процессором представлена на рис. 1. В АОАС проводится спектральное преобразование сигнала, а ЦСП обеспечивает первичное интегрирование и обработку данных. Управляющий компьютер выполняет управление СВЧ-приемником, загружает программы, считывает данные из ЦСП, а также обеспечивает отображение текущей информации. Служба времени радиотелескопа поддерживает работу системы в реальном времени.



Рис. 1. Пульсарный ОЭ-процессор в приемном комплексе радиотелескопа

Структурная схема АОАС приведена на рис. 2, она хорошо известна [1]. 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 которого линейно связана с частотой f анализируемых радиосигналов. Выполняется параллельный спектральный анализ скользящей выборки радиосигнала длительностью  $T_{AOM}$ 

$$I(n,t) = I(x,t) = I(f,t) =$$

$$= \left| \int_{0}^{T_{AOM}} s(t-\tau) \exp(j2\pi f\tau) d\tau \right|^{2}.$$
(1)

Распределение I(x,t) отражает спектр мощности S(f,t) скользящей выборки анализируемого сигнала s(t). Длительность выборки  $T_{AOM}$  определяет частотное разрешение – в нашей задаче около 100 кГц. *N*-элементный ПЗС-фотоприемник дискретизирует по пространству, детектирует и накапливает во времени распределение I(x,t):  $I(n,t) \approx \int I(x_n,t) dt$ . Время интегрирования

определяет временное разрешение АОАС.





В предложенном нами пульсарном ОЭ-процессоре [9, 11] ФПЗС работает в специальном режиме – режиме временной задержки и накопления (ВЗН) [12]. В этом режиме ФПЗС выполняет дополнительную функцию аналоговой многоотводной суммирующей линии задержки, суммируя сигналы  $I_n(t)$ . Время задержки  $\Delta$  между отводами (соседними элементами ФПЗС) определяется периодом (частотой) управляющих импульсов ФПЗС – фазных напряжений, и поэтому оно изменяется простым способом в широких пределах от единиц до десятков микросекунд.

В ВЗН-режиме зарядовые пакеты ФПЗС под действием управляющих сигналов перемещаются электронным способом вдоль апертуры ФПЗС от одного края к другому подобно непрерывной цепочке (конвейеру). При таком конвейерном режиме работы ФПЗС на выходе формируются отсчеты:

$$U_{OUT}(t) = \sum_{n=1}^{N} I(t - n \cdot \Delta; n),$$

$$U_{OUT}(k) = \sum_{n=1}^{N} I(\Delta(k - n); n),$$
(2)

где n – номер частотного канала, k – номер отсчета во времени. Скорость движения  $V_{\rm CCD}$  зарядовых пакетов ФПЗС определяется внешним управлением (частотой  $F_{\Phi}$ ):  $V_{\rm CCD} = l \ F_{\Phi}$ , где l – шаг расположения элементов, она должна быть согласована со скоростью изменения частоты в принимаемом радиоизлучении:

$$V_{DM} = \frac{K \cdot f^3}{8,3 \cdot 10^3 DM}$$
, где  $K$  – константа, определяемая

оптической схемой процессора; DM – мера дисперсии пульсара, в парсек/см<sup>3</sup>, f – частота, в МГц. Каждому пульсару соответствует своя мера дисперсии DM, а значит и своя скорость изменения частоты  $V_{\rm DM}$ , и следовательно своя частота  $F_{\Phi}$ . Для типичных значений величин DM и f частота  $F_{\Phi}$  изменяться в пределах от десятков до сотен килогерц.

При поступлении в ОЭ-процессор широкополосного радиоизлучения пульсара выходной сигнал  $U_{OUT}(k)$  содержит составляющую, соответствующую огибающей импульса радиоизлучения пульсара – одиночный профиль сигнала, который соответствует прохождению одного импульса радиоизлучения пульсара по фотоприемнику. За счет суммирования одиночных профилей в ЦСП, а затем в компьютере формируется интегральный профиль.

Описываемый ОЭ-процессор используется для получения одиночных и интегральных профилей импульсов радиоизлучения секундных и миллисекундных пульсаров [10]. Для более широкого применения ОЭ-процессора, в частности в задаче измерения меры дисперсии радиоизлучения пульсара [11], необходимо обеспечить высокую стабильность получения профиля сигналов радиоизлучения (при неучтенном (паразитном) смещении не хуже 2 мкс [13]). Известны методы термостабилизации рабочего объема АОАС и учета дрейфов параметров частотной шкалы за счет использования калибровки. Термостабилизация требует существенных затрат; так в японском ОЭ-процессоре используется двухуровневая термостабилизация (поддерживается ± 0.1 град в объеме АОАС) [8]. Описаны методы калибровки АО-радиоспектрометров при времени наблюдения десятки минут, основанные или на одном частотном репере, который непрерывно подмешивается к сигналу [14], или на гребенке реперов, которая подается в начале и в конце измерений [15]. Мы предлагаем использовать калибровку частотной шкалы для пульсарного ОЭпроцессора при длительных (более 1 часа) наблюдениях радиоизлучения пульсара. Для применения калибровки необходимо разработать как метод, так и способ его реализации.

### Метод калибровки частотной шкалы

Метод частотной калибровки связан с вводом сигналов эталонных частот, регистрацией отклика на эти частоты, восстановлением частотной шкалы и учетом дрейфа шкалы в выходном сигнале. Известно, что частотная шкала AOAC, т.е. зависимость f = f(n), где n - номер частотного канала, является нелинейной функцией [3]. Поэтому в качестве сигналов эталонных частот мы используем гребенку реперов, аналогично с использованием АОАС на европейском спутнике [15]. Гребенку эталонных частот из-за ВЗН-режима работы ФПЗС нельзя вводить непрерывно, смешивая ее на входе с исследуемым сигналом, в результате появляются два режима работы ОЭ-процессора: «наблюдение» и «калибровка», в которых входными сигналами процессора являются или сигнал от антенны  $S_A$ , или сигнал  $S_K$  от генератора гребенки эталонных частот. Распределение интенсивности I(x,t) в АОАС регистрируется в первом случае с использованием режима ВЗН, а во втором - традиционного «кадрового» режима работы ПЗС-фотоприемника.

Рассмотрим связь между временем прихода импульса и частотными характеристиками; определим параметры частотной шкалы, которые нужно измерять при калибровках. Импульс радиоизлучения пульсара проходит от начальной частоты  $f_1$  частотной шкалы AOAC до конечной частоты  $f_2$  через полосу  $\Delta f = f_1 - f_2$ , и на выходе ФПЗС появляется отклик. В системе Службы времени радиотелескопа рассчитывается и вырабатывается импульс, соответствующий периоду повторения *Т*<sub>Р</sub> импульсов радиоизлучения пульсара (привязка во времени к шкале всемирного времени не хуже 100 нс). Время прихода импульсов радиоизлучения определяется по максимуму выходного сигнала ОЭ-процессора относительно этого импульса. Смещение измеряемого времени прихода может быть вызвано двумя причинами: смещением всей шкалы АОАС как единого целого (одинаково изменяются частоты  $f_1$  и  $f_2$ ) и изменением времени прохождения  $\Delta t$  из-за изменения полосы частот  $\Delta f$ . Смещение (сдвиг) времени прихода импульса можно определить как  $\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_M$ , где  $\Delta T_0$  – сдвиг импульса за счет смещения всей шкалы. При этом  $\Delta T_M$  – сдвиг из-за изменения масштаба частотной шкалы.  $\Delta T_0 = \Delta N_0 \cdot m_{f0} / V_{\rm CCD}$ , где  $\Delta N_0$  – смещение шкалы, измеренное в элементах фотоприемника;  $m_{f0}$  – масштаб частотной шкалы  $m_{f0} = \frac{\Delta f}{N}; N$  – количество ПЗС-элементов в частотном

диапазоне  $\Delta f$ .  $\Delta T_{\rm M}$ = $\Delta t_{\rm CCD}$  –  $\Delta t_{\rm KAL}$ , где  $\Delta t_{\rm CCD}$  и  $\Delta t_{\rm KAL}$  – время прохождения импульса пульсара по частотному диапазону (по фотоприемнику) при начальном масштабе *m*<sub>f0</sub> и при масштабе, полученном после калибровки

$$m_{fKAL}$$
,  $\Delta t_{CCD} = \frac{N_0 \cdot m_{f0}}{V_{CCD}}$ ;  $\Delta t_{KAL} = \frac{N_0 \cdot m_{fKAL}}{V_{CCD}}$ , где  $N_0$  –

номер элемента, соответствующего центральной частоте  $f_0$  АОАС. В результате смещение импульса пульсара, связанное с изменениями параметров частотной шкалы, можно определить в виде:

$$\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_M =$$

$$= \frac{\Delta N_0 \cdot m_{f0}}{V_{CCD}} + \frac{N_0 (m_{f0} - m_{fKAL})}{V_{CCD}}.$$
(3)

Исходя из сказанного, для компенсации смещения (3) при каждой калибровке необходимо измерять два параметра: смещение шкалы  $\Delta N_0$  и новый ее масштаб  $m_{fKAL}$ . Последовательность операций алгоритма калибровки может быть следующая:

1. Поиск положения (центров тяжести) n<sub>к</sub> частотных реперов  $f_{\rm K}$ .

2. По полученным оценкам n<sub>к</sub> построение аппроксимирующей зависимости  $f_{\rm A}(n)$  частотной шкалы.

3. Нахождение смещения частотной шкалы  $\Delta N_0 =$ (*N*<sub>0</sub>-*n*<sub>0A</sub>), где *N*<sub>0</sub> – начальное (исходное) значение координаты элемента фотоприемника для центральной частоты  $f_0$  процессора;  $n_{0A}$  – новое значение координаты частоты  $f_0$ , полученное из зависимости  $f_A(n)$ .

4. Нахождение нового масштаба частотной шкалы *т*<sub>fKAL</sub>, вычисленного с использованием аппроксимирую-

щей зависимости 
$$m_{fKAL} = \frac{f_1^2 - f_2}{n_{1A} - n_{2A}}$$
, где  $n_{1A}$  и  $n_{2A}$  -

координаты частот  $f_1$  и  $f_2$ , которые близки к краям частотной шкалы АОАС.

5. Суммирование профилей импульсов при получении интегрального профиля с учетом  $\Delta T$  (3) изменения параметров (дрейфа) частотной шкалы.

Перечисленные операции можно осуществлять как в ЦСП, так и в управляющем компьютере, как в реальном времени, так и при вторичной обработке. Причем, в любом случае ЦСП должен поддерживать два переключаемые во времени режима «наблюдение» и «калибровка».

Предлагаемый метод предусматривает включение в приемную систему радиотелескопа новых элементов: коммутатора и генератора частотных реперов (рис. 3). Коммутатор по сигналу управления U<sub>CH</sub>, поступающий с периодом ТСН, подает на вход ОЭ-процессора сигнал антенны S<sub>A</sub>, или сигнал генератора реперов S<sub>K</sub>. Указанное переключение проводится в процессе получения одного интегрального профиля в течение времени т, причем часть времени (около 1 мин) данные накапливаются в ЦСП, а полное накопление (до нескольких часов) осуществляется в компьютере. Такое двухэтапное накопление выбрано исходя из необходимости непрерывного обновления данных на экране управляющего компьютера, причем на экране наблюдаются данные, как профиля импульсов, так и частотных реперов. Период переключения ТСН в наших наблюдениях на РТ-64 составлял около 10 мин. В качестве частотных реперов мы выбрали гребенку частот, которая включала 12 реперов. На рис. З в показана гребенка частот, зарегистрированная фотоприемником в полосе анализа АОАС (60 МГц), здесь *n* – номер элемента фотоприемника, работающего в кадровом режиме.



Рис. 3. Схема включения ОЭ-процессора с коммутатором (а), временная диаграмма сигналов (б) и отклик ОЭ-процессора на гребенку частотных реперов (в)

## Реализация метода с использованием ADSP 2181 и перезагрузки программ

В качестве основы построения цифровой части ОЭпроцессора мы использовали ЦСП фирмы Analog Devises ADSP2181 (рис. 4). ЦСП выполняет управляющие функции для ФПЗС, а также накапливает, передает и принимает данные из компьютера через интерфейс RS232. На шину ЦСП подключены дешифратор адреса портов ввода-вывода, регистр управления (РУ) и регистр данных (РД). Формирователь импульсов управления ФПЗС по тактовым импульсам  $f_{\rm T}$  вырабатывает сигнал старта АЦП Start и два сигнала управления CLK и ROG для линейного ФПЗС Sony ILX703 (2048 элементов) [16]. Временная диаграмма зависит от программы, загруженной в ЦСП. При кадровом режиме работы ФПЗС вырабатывается один импульс ROG, по которому зарядовые пакеты переносятся из регистра накопления в выходной регистр. После этого передаются 2048 импульсов СLК, по которым осуществляется вывод зарядовых пакетов из фотоприемника. При ВЗН-режиме каждый импульс ROG сопровождается импульсом СLК, и сигналы из ФПЗС на видеоусилитель и АЦП поступают непрерывной цепочкой. На каждый отсчет из ФПЗС поступает два импульса Start и соответственно вырабатываются два импульса End, которые подаются на вход запроса прерывания ЦСП. Это сделано для использования алгоритма цифровой обработки – двойной коррелированной выборки [17], который позволяет уменьшить шумы считывания и вычесть постоянное смещение из сигнала с ФПЗС. Частоту тактовых импульсов  $f_{\rm T}$  задает синтезатор типа AD9835, который программируется через последовательный интерфейс при начальной загрузке программы. При наблюдении для каждого пульсара в зависимости от его параметра DM вычисляется своя скорость движения V<sub>CCD</sub> зарядовых пакетов в ФПЗС и соответственно своя частота  $f_{\rm T}$ , которая может составлять 1-10 МГц. Для режима калибровки тактовая частота  $f_{\rm T}$  соответствует частоте сдвига зарядовых пакетов в ФПЗС *F*<sub>Ф</sub>=100кГц.

Приоритеты прерываний в ЦСП определены следующим образом: наивысший имеет *IRQ*<sub>2</sub> (чтение данных с АЦП), следующий *IRQ*<sub>L</sub> (импульс периода *T*<sub>P</sub> инициирует начало следующего кадра отсчетов), а минимальный – прерывание таймера. По таймерному прерыванию происходит передача данных из ЦСП в управляющий компьютер. Процессор имеет двойные (теневые) переключаемые регистры, что вызывает определенные трудности при обработке многих вложенных прерываний. Для исключения неоднозначности содержания регистров при обработке прерывания *IRQ*<sub>2</sub> запрещаются другие прерывания, кроме того, рабочие регистры в обработчиках прерываний *IRQ*<sub>2</sub> и *IRQ*<sub>L</sub> используются через стек.



Рис. 4. Структурная схема цифровой части ОЭ-процессора с ADSP 2181

ЦСП выполняет следующие функции обработки: цифровая двойная коррелированная выборка; суммирование последовательно идущих отсчетов; суммирование кадров в словах расширенной разрядности. Более подробно функции обработки описаны в [17]. Программа ЦСП (рис. 5) включает следующие модули: обработчики прерываний, монитор реального времени, программы записи отсчетов в один из двух буферов, переключения буферов, передачи накопленных данных, приема команд управления и программа программирования синтезатора. Два буфера памяти в ЦСП применяются для обеспечения параллельности двух операций: суммирования данных в ЦСП и передачи в компьютер. Переключение буферов происходит перед передачей данных в компьютер после накопления /суммирования кадров в течение 1 мин.



Рис. 5. Структура программы ЦСП

Особенность программного обеспечения заключается в том, что оно должно реализовать, как было сказано, два режима «наблюдение» и «калибровка». Нами было использовано решение распределенной между ЦСП и компьютером обработки: для каждого режима своя программа ЦСП, свое окно на рабочем экране компьютера. Совместить режимы в одной программе ЦСП оказалось сложно, прежде всего, из-за недостаточности памяти в ЦСП.

Общий алгоритм наблюдений с калибровкой следующий. В начальном диалоге выбирался исследуемый пульсар *PSR(DM, f*<sub>T</sub>, *T*<sub>P</sub>), задавалось общее время наблюдений, период калибровок (*T*<sub>CH</sub>). Затем в ЦСП загружалась программа, обеспечивающая режим «калибровка», при которой прерывание от сигнала периода пульсаров *T*<sub>P</sub> отключалось, период накопления 10 мс вычислялся в ЦСП, фотоприемник работал в режиме кадрового накопления, в ЦСП суммировалось 10 кадров отсчетов с ФПЗС. Управляющий компьютер после приема кадра калибровки (рис. 3 в) передавал в ЦСП программу, обеспечивающую режим «наблюдение». В этом режиме фотоприемник работает в ВЗН-режиме и выполняются ранее описанные алгоритмы обработки и передачи данных.

Особенность переключения режимов «наблюдение» и «калибровка» заключается в том, что при изменении временных диаграмм управляющих сигналов ФПЗС в нем наблюдается переходной процесс. Поэтому после переключения режима приходится несколько первых кадров «сбрасывать», не передавая их в ЦСП. Нами определено максимальное время переходного процесса 100 мс, что соответствует «сбросу» 10 кадров отсчетов в режиме «калибровка» и до 100 кадров в режиме «наблюдение» (в зависимости от периода *T*<sub>P</sub> пульсара).

Для организации «сброса» данных можно использовать несколько возможностей: запрет выработки сигналов Start АЦП, запрет прерывания в ЦСП от сигнала End АЦП, анализ флага разрешения в программе обработки прерывания. Включение режима «сброса» должно быть синхронизовано с началом кадра, то есть с импульсом периода Тр. Мы использовали самый простой вариант режим программного «сброса», то есть третью из перечисленных возможностей. Пример программы обработки прерывания, в которой анализируется флаг FlagSt pasрешения записи отсчетов с ФПЗС, приведен в табл.1. Особенность программы заключается в том, что в ней используется всего один регистр, значение которого при входе сохраняется, а при выходе восстанавливается из стека. Режим программного «сброса» увеличил на три число команд обработчика прерываний, тем самым увеличил минимальную длительность периода отсчетов с

ФПЗС, которые может обрабатывать ЦСП. Такое увеличение не является критичным, так как общее количество команд, которые тратятся на обработку одного отсчета, близко к 100 командам ЦСП.

Таблица 1. Программа обработки прерыва	ния
по сигналу End АЦП (IF	₹Q₂)

N₂	Команда ЦСП	Примечание
1.	Irq2sub: $dm(stek1) = ay1;$	Сохранение регистра в
2.	ay1 = dm(FlagSt);	стеке
3.	none = pass ay1;	Чтение флага разреше-
4.	if eq jump mm1m;	ния записи отсчетов
5.	ay1 = 1;	Анализ флага
6.	dm(Flag) = ay1;	
7.	$ay1 = IO(adc\_reg);$	
8.	$dm(Temp\_Item) = ay1;$	X7 1
9.	mm1m:ay1 = dm(stek1);	Установка флага готов-
10.	rti;	Итение отспета из АШП
		Сохранение отсчета во
		временной переменной
		Восстановление
		регистра
		Выход из обработчика
		прерываний

Два режима работы ОЭ-процессора отражены в основном окне программы наблюдения (рис. 6). Основное пространство окна занимают 3 зоны графиков: текущий профиль импульса пульсара, полученный из ЦСП; профиль, накопленный в компьютере и частотные реперы сигнала калибровки. В зоне графика калибровки имеется возможность следить за помеховой обстановкой в частотном диапазоне работы приемного комплекса с АОАС. В информационной зоне статистики можно наблюдать ряд параметров, такие как время начала и окончания наблюдений, текущее время, параметры пульсара и др. Внизу окна расположена строка статуса, в которой отображаются комментарии к элементам окна и пунктам меню при наведении на них курсора «мыши».



Рис. 6. Рабочее окно программы наблюдения

Итогом работы программы в управляющем компьютере является выходной файл (рис. 7), в котором чередуются кадры калибровок (рис. 3) и наблюдений. В файле (рис. 7а) последовательно записаны: кадр калибровок (нижний уровень), 10 профилей импульса пульсара PSR 1937+21 из ЦСП (верхний уровень) и таким образом повторяется далее.



Рис. 7. Файл наблюдений и профили импульсов пульсара PSR 1937+2.

На рис. 7б показаны 10 профилей импульсов пульсара, полученные после 50000 суммирований в ЦСП (*n* – номер элемента в файле наблюдений). Наблюдается смещение среднего уровня сигнала ОЭП, что не влияет на форму итогового интегрального профиля.

# Алгоритм и программа корректировки данных с учетом калибровки

Последним этапом обработки данных радиоизлучения пульсаров с целью построения итогового профиля импульсов является процесс корректировки данных. На этом этапе производится не только построение итогового интегрального профиля из отдельных промежуточных профилей импульсов после их корректирования, но и необходимая визуализация. Для реализации указанных операций мы разработали программу вторичной обработки.

Программа осуществляет ввод данных из файла, по-

лученного в результате работы программы наблюдения (рис. 7). В заголовке каждого файла указаны основные параметры пульсара и режима наблюдения. Рабочее окно программы приведено на рис. 8. При обработке файла наблюдений оператор имеет возможность видеть смещение (коррекцию положения) накопленного профиля и смещение частотной шкалы на каждом шаге (обработке очередного кадра калибровки и 10 кадров наблюдений). Итоговый интегральный профиль может быть сохранен в выходном файле в текстовом формате.

Программа реализует все пять этапов алгоритма калибровки. При поиске максимумов частотных реперов центр тяжести  $n_T = \sum_i U_i n_i / \sum_i U_i$  определяется по

пяти отсчетам вокруг найденного максимума. Учитыва-

ется, что ширина максимумов соответствует 2-3 элементам фотоприемника по уровню 0,5. Аппроксимирующая зависимость  $f_{A}(n)$  строится методом наименьших квадратов. На экране компьютера отображается координата  $n_{0A}$  для центральной частоты  $f_0$ , вычисленная по полученной зависимости (рис. 8). Суммирование промежуточных профилей импульсов для получения интегрального профиля осуществляется таким образом, что суммируются десять подряд идущих промежуточных профилей, затем они сдвигаются с учетом  $\Delta T$  (3) и суммируются в итоговый интегральный профиль. Для реализации сдвига используется прием передискретизации [17]. Первоначально проводится десятикратное размножение отсчетов с использованием линейной интерполяции; затем сдвиг размноженных отсчетов на round  $(10 \cdot \Delta T)$  элементов; в конце восстановление исходного количества путем суммирования по десять подряд идущих отсчетов (десятикратная децимация).



Рис. 8. Рабочее окно программы вторичной обработки

Таким образом, предложен метод калибровки данных, который можно использовать при проведении длительных сеансов регистрации радиоизлучения, проводимых в резное время при разных условиях. Разработаны аппаратные и программные средства, в которых реализована калибровка частотной шкалы АОАС. В процессе наблюдений происходит переключение режимов «наблюдение» - «калибровка» и соответственно перезагрузка программ управления ФПЗС и обработки данных ЦСП. В программе работы ЦСП учтена необходимость выделения времени на переходной процесс при смене режимов работы фотоприемника. Для измерения параметров частотной шкалы используется набор ИЗ 12 частотных реперов. При корректировке данных наблюдений - сдвиге профилей импульсов используются методы размножения и децимации отсчетов. За счет использования калибровки для ОЭ-процессора повышена на порядок точность определения времени прихода импульсов радиоизлучения пульсаров (2 мкс). Описанный алгоритм калибровки используется нами для корректировки положения профиля пульсаров в ОЭ-процессоре на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин) [18]. Авторы выражают благодарность сотрудникам ПРАО АКЦ ФИАН, работающим под руководством к.т.н. Орешко В.В. за участие и организацию наблюдений на радиотелескопе РТ-64, и коллегам к.ф.-м.н. Иванову С.И., к.ф.-м.н. Саенко И.И. и к.т.н. Круглову С.К. за участие в обсуждении результатов исследований и разработке элементов ОЭ-процессора.

### Литература

1. Гусев О.Б., Кулаков С.В., Разживин Б.П., Тигин Д.В. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени. Радио и связь. М., 1989, 136с.

2. Лавров А.П., Молодяков С.А., Саенко И.И. Акустооптические процессоры в радиоастрономических приемниках // Антенны.- 2009.- №7.- С.45-55.

3. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Molodyakov S.A., Saenko I.I. Acousto-optical spectrometers' frequency performance stability // Proc. SPIE.- 2004.- V.5381.- P.253-257.

4. Виленский А.В., Лысой Б.Г., Чередниченко О.Б. Компенсация температурного дрейфа волны настройки акустооптического спектрофотометра // Квантовая электроника.- 2002.- Т.32.- №3.- С.232-234.

5. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры, М.: Наука, 1973.- 416с.

6. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары.- М.: Мир, 1980.- 315с.

7. Илясов Ю.П., Орешко В.В., Дорошенко О.В. Пульсарный комплекс ФИАН на радиотелескопе ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине // Труды ФИАН. – 2000. – Т.229. – С.95-104.

8. Hanado Y., Imae M., Sekido M. Millisecond Pulsar Observation System Using Acousto-Optic Spectrometer // IEEE Trans. On Instrum. and Measurement.- 1995. - V.44, N2.- P.107-109.

9. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Аку-

стооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 1998.- №.2.- С.21-29.

10. 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.

11. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров. // Антенны. – 2006. – №7. – С.69-76.

12. Барб Д.Ф. Режим задержки и интегрирования в приемниках изображения // Полупроводниковые формирователи сигналов изображений. Сб. статей / Под ред. П.Йесперса, Ф.Ван де Виле и М.Уайта.- М.: Мир, 1979.-С.499-510.

13. Орешко В.В. Инструментальная погрешность хронометрирования пульсаров. Комплекс АС-600/160. // Труды ФИАН.- 2000.- Т.229.- С.110-118.

14. Саенко И.И., Круглов С.К., Розанов С.Б., Соломонов С.В. Оптоэлектронный спектрометр для комплекса дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых волнах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2010.- №4(103).- С.243-249.

15. Melnick G. J., Stauffer J. R., Ashby M. L. N., et al. The Submillimeter Wave Astronomy Satellite: Science Objectives and Instrument Description. // The Astrophysical Journal.- 2000.- V.539.- P.77-85.

16. ILX703A - 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W). Datasheet. http://www.ic-on-line.cn

17. Молодяков С.А. Особенности и алгоритмы цифровой обработки сигналов в оптоэлектронных процессорах // Цифровая обработка сигналов. В печати.

18. Esepkina N.A., Lavrov A.P., Molodyakov S.A. Acousto-optical pulsar processor frequency scale calibration for increase accuracy measurement of time of arrival radioemission impulses // Proc. SPIE.- 2006.- V. 6251.- P.269-276.

## METHOD OF CALIBRATING THE FREQUENCY SCALE PULSAR OPTOELECTRONIC PROCESSOR AND ITS IMPLEMENTATION USING A DSP

### Lavrov A.P., Molodykov S.A.

Described calibration method and apparatus for digital signal processing in optoelectronic processor registration pulsed radio emission of cosmic sources – pulsars. Digital processing is carried out after receiving a signal from the output of the analog part of the processor. The calibration method involves the introduction of a new mode of the processor, and the measurement of the main parameters of the analog section in order to incorporate them into the profile of the resulting integral radio pulses. Show you how to implement the method using reset program in the digital signal processor and a secondary processing.