

07;08;09;12

## Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров

© Н.А. Есепкина, Ю.П. Илясов, А.П. Лавров,  
С.А. Молодяков, В.В. Орешко

С.-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: esepkina@cef.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2003 г.

Рассмотрен новый тип акустооптического (АО) процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров, осуществляющий компенсацию дисперсии в широкой полосе частот. АО процессор выполнен на основе АО спектроанализатора с использованием специального конвейерного режима работы фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС), который позволяет осуществлять сложение спектральных компонент принимаемого радиоизлучения с регулируемой временной задержкой в самом ПЗС-фотоприемнике. Представлены результаты применения разработанного АО процессора для наблюдения пульсаров на частоте 1.4 GHz в полосе 45 MHz на радиотелескопе РТ-64 Калязинской радиоастрономической обсерватории ФИАН.

**1. Введение.** В астрофизике и наблюдательной радиоастрономии одним из объектов исследований являются пульсары, представляющие собой нейтронные звезды с высокой и очень стабильной скоростью вращения. Для понимания физических процессов в этих объектах важное значение имеет исследование их радиоизлучения. Импульсное радиоизлучение пульсаров наблюдается в широком диапазоне частот от 100 MHz до 10 GHz с периодом повторения импульсов  $T_R$  от единиц миллисекунд до единиц секунд.

Радиоизлучение пульсаров имеет ряд особенностей, главная из которых — это дисперсия в межзвездной среде [1]. Из-за дисперсии короткий импульс радиоизлучения пульсара дрейфует по частоте в полосе приема  $\Delta f$  с центральной частотой  $f$  от высоких частот к

низким со скоростью

$$\alpha_{DM} = \frac{f^3}{8.3 \cdot 10^3 DM} \text{ MHz/s}, \quad (1)$$

где  $DM$  — мера дисперсии пульсара,  $\text{pk/cm}^3$ ,  $f$  — частота, МГц. Дрейф приводит к расширению импульса на выходе приемника и потере информации о его тонкой временной структуре. Таким образом, дисперсия препятствует расширению полосы приемника с целью увеличения его чувствительности, ограничивая ее величиной  $\delta f_{in} = \alpha_{DM} \cdot \delta t$ , где  $\delta t$  — требуемое временное разрешение. Это ограничение можно преодолеть путем суммирования многих узкополосных сигналов после компенсации дисперсионных задержек в каждом из узкополосных каналов, т.е. путем применения в составе пульсарных приемников специальных устройств — компенсаторов дисперсии.

Известно несколько типов компенсаторов дисперсии, наиболее распространенным из которых является некогерентный последетекторный компенсатор дисперсии, выполненный на основе многоканального банка фильтров. В таком компенсаторе сигналы  $s_n$  на выходе всех  $N$  частотных каналов многоканального фильтрового приемного устройства регистрируются параллельно в виде массива  $s_{n,k}$ , где  $n$  — номер канала,  $k$  — номер отсчета во времени, а затем суммируются в соответствии с алгоритмом (2), что устраняет влияние дисперсии и повышает отношение сигнал/шум (с/ш) в  $\sqrt{N}$  раз:

$$s_{\Sigma}(k) = \sum_{n=1}^N s_{n,k+\Delta \cdot n}, \quad (2)$$

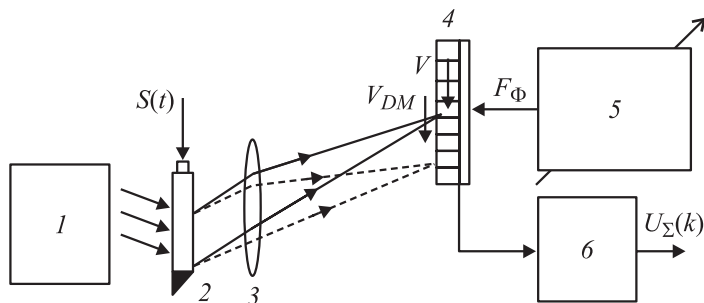
где  $\Delta$  — соответствующий сдвиг во времени, зависящий от меры дисперсии наблюдаемого пульсара.

Однако получение значительного выигрыша в увеличении отношения с/ш при расширении полосы приема требует применения в приемнике банка фильтров с большим числом каналов  $N$ , что представляет собой сложную техническую задачу. Как известно, задача формирования большого числа эквивалентных частотных каналов с разрешением  $\delta f \geq 100 \text{ kHz}$  достаточно просто решается с использованием акустооптических спектроанализаторов (АОС), которые широко используются в радиоастрономии для спектральных исследований [2].

Известно также применение АОС для наблюдения пульсаров [3], при котором АОС выполняет роль только банка фильтров.

Нами предложен АО процессор нового типа, более просто и эффективно устраняющий влияние дисперсии при обработке широкополосных сигналов, в котором сложение различных спектральных компонент с регулируемой задержкой осуществляется в самом ПЗС-фотоприемнике [4].

**2. Структура акустооптического процессора для обработки сигналов пульсаров.** Структурная схема предложенного нами АО процессора приведена на рис. 1. В принципе она соответствует традиционной схеме АО спектроанализатора, однако в ней, как показано ниже, используется специальный режим работы ПЗС-фотоприемника. Как видно, из рис. 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  $x$  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 обычных АОС распределение  $I(x, t)$  детектируется и накапливается  $N$ -элементным ПЗС-фотоприемником (ФПЗС). По истечении заданного времени накопления  $T_I$  распределение считывается в



**Рис. 1.** Структурная схема акустооптического процессора: 1 — лазер и формирователь пучка, 2 — акустооптический модулятор, 3 — фурье-линза, 4 — ФПЗС, 5 — контроллер (генератор управления сигналами), 6 — видеоусилитель и аналого-цифровой преобразователь.

виде последовательности отсчетов  $s_n \sim S(f_n)$  и в цифровом виде регистрируется в цифровом процессоре. Время  $T_I$  определяет временное разрешение АОС.

В предложенном нами АО процессоре в отличие от обычного АО спектроанализатора ФПЗС работает в специальном конвейерном („shift-and-add“) режиме. Этот режим обеспечивает специальный контроллер (генератор управляющих сигналов). Элементы ФПЗС под действием управляющих сигналов  $F_{ph}$  перемещаются электронным способом вдоль апертуры ФПЗС от одного края к другому подобно непрерывной цепочке (конвейеру). При перемещении зарядовых пакетов каждый из элементов одновременно выполняет и детектирование, и накопление (суммирование) сигналов из формируемых частотных каналов с соответствующей задержкой  $\Delta t$ , проходя их один на другим, так что суммирование (2) выполняется в реальном времени внутри ФПЗС аналоговым способом (в виде зарядовых пакетов) перед выводом сигналов из ФПЗС. После усиления и аналого-цифрового преобразования выходной сигнал ФПЗС  $U_{\Sigma}(k)$  подается на систему регистрации. Скорость движения  $V$  элементов ФПЗС определяется внешним управлением (частотой  $F_{ph}$ ):  $V = l \cdot F_{ph}$ , где  $l$  — шаг расположения элементов, и она может быть согласована с высокой точностью со скоростью дрейфа частоты (1) в принимаемом радиоизлучении:  $V_{DM} = K \cdot \alpha_{DM}$ , где  $K$  — константа, определяемая оптической схемой процессора. При поступлении в АО процессор широкополосного радиоизлучения пульсара выходной сигнал  $U_{\Sigma}(k)$  содержит составляющую, соответствующую огибающей импульса радиоизлучения пульсара, сжатого по сравнению с выходным сигналом обычного широкополосного приемника; таким образом, в АО процессоре компенсация влияния дисперсии осуществляется в реальном времени в самом ПЗС-фотоприемнике, а сам АО процессор является АО компенсатором дисперсии.

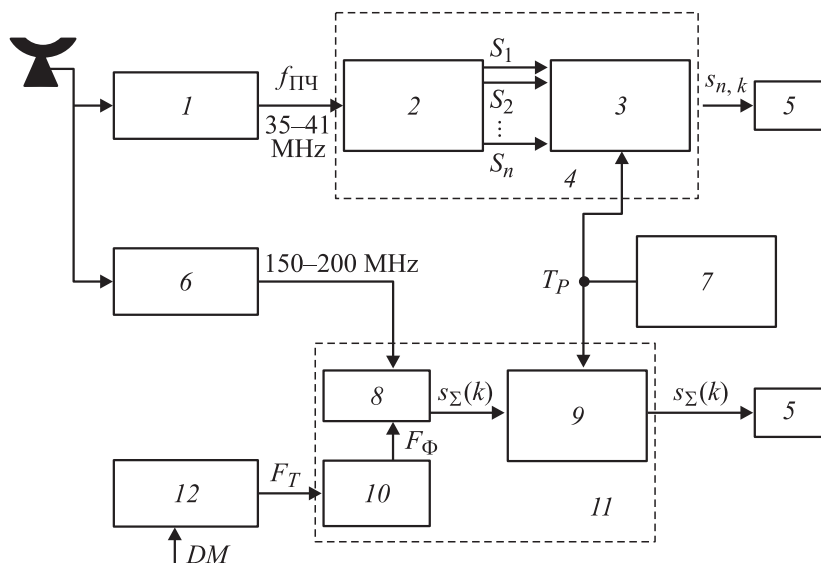
Предложенный нами АО процессор имеет ряд достоинств. Суммирование (2) происходит в ФПЗС, что увеличивает отношение с/ш и уменьшает скорость считывания из фотоприемника в  $N$  раз по сравнению с известной АО системой [3]. Отличительной особенностью нового процессора является его простая перестройка для обработки пульсаров с различной мерой дисперсии, которая выполняется электронным способом, путем изменения частоты  $F_{ph}$  управляющих импульсов.

Нами был разработан рабочий макет АО процессора — компенсатора дисперсии. В нем использовался He–Ne лазер ЛГН-207А, АОМ,

выполненный на кристалле  $\text{TeO}_2$  со срезом [110] и временной апертурой  $T_A \approx 15 \mu\text{s}$ , линейный ФПЗС PLX-703A (Sony), имеющий 2048 элементов размером  $14 \times 14 \mu\text{m}$ . АО процессор имел центральную частоту  $f_0 = 150 \text{ MHz}$ , рабочую полосу частот  $\Delta f_A = 80 \text{ MHz}$  и шаг следования частотных каналов около  $82 \text{ kHz}$ . Контроллер ФПЗС при изменении внешних тактовых частот  $F_R$  обеспечивал перестройку процессора для обработки сигналов пульсаров с мерой дисперсии от 15 до  $1000 \text{ pk/cm}^3$ .

**3. Результаты наблюдений с применением АО процессора на радиотелескопе.** Рабочий макет АО процессора был установлен в пульсарном приемном комплексе радиотелескопа РТ-64 с диаметром антенны 64 м Калязинской радиоастрономической обсерватории ФИАН. Для проведения наблюдений мы использовали два приемника, которые работают в диапазонах 600 MHz и 1.4 GHz. Структура приемного комплекса приведена на рис. 2. В тракте диапазона 600 MHz используется штатный 160-канальный фильтровый последетекторный компенсатор дисперсии АС-600/160, имеющий  $2 \times 80$  каналов по 40 kHz с общей полосой 6.4 MHz [5]. В тракте 1.4 GHz был установлен АО компенсатор дисперсии, параметры которого приведены выше. На АО компенсатор сигнал подавался после преобразования к промежуточной частоте  $F_1 = 175 \text{ MHz}$ . Из-за смещения центральной частоты АО процессора ( $f_0 = 150 \text{ MHz}$ ) и  $f_1$  полоса пропускания всего тракта 1.4 GHz составляла 45 MHz. Малые плотности потоков большинства пульсаров (порядка  $10^{-28} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ ) на частоте 1.4 GHz требуют дополнительного накопления сигналов по большому числу (до  $10^5$  и более) периодов для получения отношения  $s/\text{ш} > 1$ . Поэтому в каждом тракте в состав компенсаторов дисперсии входят буферные цифровые накопители, осуществляющие предварительное накопление сигналов  $s_{n,k}$  и  $s_\Sigma(k)$ , дальнейшее накопление сигналов выполняется в ЭВМ. Работа цифровых накопителей в обоих компенсаторах дисперсии синхронизировалась по импульсам „Период пульсара  $T_p$ “. Специальная система синхронизации рассчитывала ожидаемые моменты прихода импульсов излучения пульсаров, учитывая изменения периода из-за вращения Земли и другие факторы.

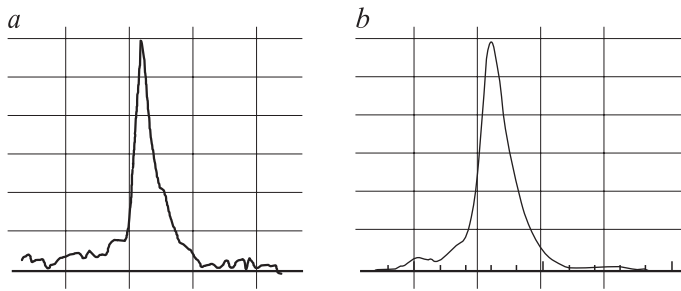
В диапазоне 1.4 GHz с применением разработанного АО компенсатора были приведены успешные наблюдения ряда пульсаров, как секундных, так и миллисекундных, одновременно и синхронно с их регистрацией в диапазоне 600 MHz на штатном фильтровом комплексе АС-600/160 ФИАН.



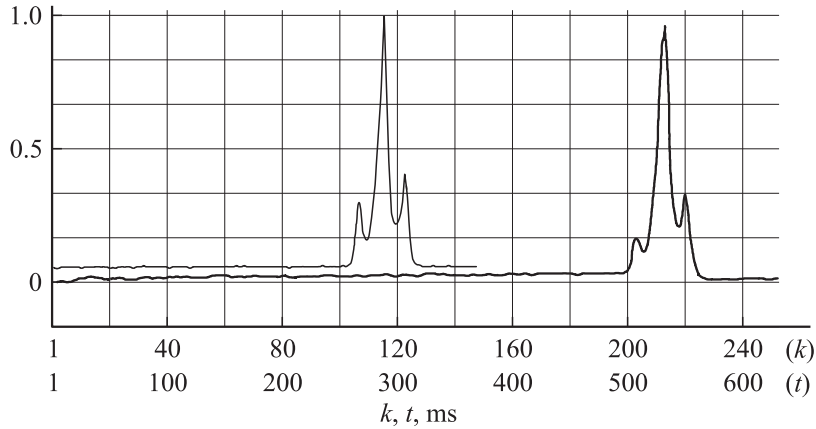
**Рис. 2.** Приемный комплекс радиотелескопа РТ-64 для наблюдения пульсаров на частотах 0.6 и 1.4 GHz. 1 — приемник 608–614 MHz, 2 — банк фильтров 160, 3 — буферный цифровой накопитель  $160 \times 256$ , 4 — фильтровой компенсатор дисперсии, 5 — ЭВМ, 6 — приемник 1.41–1.76 GHz, 7 — программирующий синтезатор периода, 8 — АО процессор, 9 — буферный цифровой накопитель 4096, 10 — ФПЗС-контроллер, 11 — АО процессор-компенсатор дисперсии, 12 — перестраиваемый генератор.

На рис. 3, *a* приведен профиль импульса миллисекундного пульсара PSR 1713+07, полученный нами на радиотелескопе РТ-64 в диапазоне 1.4 GHz, а на рис. 3, *b* для сравнения приведен профиль, полученный на 300-метровом радиотелескопе в Аресибо [6].

На рис. 4 показан результат синхронного наблюдения пульсара PSR 0329+54 с  $DM = 26.8 \text{ pk/cm}^3$  в двух диапазонах с центральными частотами  $f_1 = 1425$  и  $f_2 = 600 \text{ MHz}$ . Видна задержка времени прихода импульсов в 254 ms на этих частотах, связанная с дисперсией в межзвездной среде. Расчетное значение задержки определяется выражением  $\Delta t_{DM} = 4.15 \cdot 10^3 \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \cdot DM$  и составляет 254.2 ms. Синхронные наблюдения пульсаров на двух частотах открывают возможности про-



**Рис. 3.** Профили импульсов пульсара PSR 1713+07 на частоте 1.4 GHz, полученные с помощью радиотелескопов: *a* — РТ-64 (г. Калязин), *b* — Аресибо [6].



**Рис. 4.** Дисперсионное запаздывание импульсов пульсара PSR 0329+54 на двух частотах, полученных с помощью радиотелескопа РТ-64 (г. Калязин).

ведения на РТ-64 исследования частотных флуктуаций меры дисперсии, что важно, например, для хронометрирования пульсаров при создании глобальной пульсарной шкалы времени.

Таким образом, нами разработан широкополосный АО компенсатор дисперсии нового типа для регистрации импульсов радиоизлучения пульсаров с компенсацией дисперсионных искажений импульсов в

реальном времени и продемонстрирована его работа на радиотелескопе РТ-64.

Перспективы использования акустооптических методов для обработки сигналов пульсаров связаны с расширением полосы частот АО компенсатора и использованием в оптическом процессоре 2-канального АО модулятора. Это позволяет реализовать в оптике совместное преобразование Фурье двух радиосигналов ортогональных поляризацій, принимаемых антенной радиотелескопа, и определить их фазовые соотношения и поляризационные характеристики. Изучение поляризационных характеристик излучения пульсаров весьма важно для физики пульсаров.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГПУ к.ф.-м.н. И.И. Саенко и к.т.н. С.К. Круглову за участие в разработке АО процессора.

## Список литературы

- [1] *Манчестер Р., Тейлор Дж.* Пульсары. М.: Мир, 1980. 315 с.
- [2] *Malkamaki L., Mattila K., Rissanen A. et al.* // *Experimental Astronomy*. 1991. V. 2. N 3. P. 149–161.
- [3] *Hanado Y., Imae M., Sekido M.* // *IEEE Trans. On Instrum. and Measurement*. 1995. V. 44. N 2. P. 107–109.
- [4] *Есенкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А.* // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 1998. В. 2. С. 21–29.
- [5] *Илясов Ю.П., Орешко В.В., Дорошенко О.В.* // *Труды ФИАН*. 2000. Т. 229. С. 95–104.
- [6] *Foster R.S., Wolszczan A., Camilo F.* // *Astrophys. J.* 1993. V. 410. L91–L94.