

Проект радиоастрономической системы прямого цифрового преобразования сигналов

© Е. В. Носов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены тенденции развития систем преобразования сигналов для радиотелескопов. Предложена концепция цифровой системы для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», в которой аналого-цифровой преобразователь включен на выходе малошумящего усилителя радиоприемного устройства и размещен на антенне. Применение такой модели позволяет отказаться от аналогового преобразования частоты и связанных с ним недостатков. Приведены преимущества, структура и принципы работы системы прямого цифрового преобразования радиоастрономических сигналов.

Ключевые слова: АЦП, цифровая обработка сигналов, система преобразования сигналов, ПЛИС, радиотелескоп, РСДБ.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.94-99>

Сигнальный тракт радиотелескопа, предназначенного для радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), обычно включает в себя малошумящие усилители (МШУ), блоки преобразования частоты (БПЧ) и систему преобразования сигналов (СПС), с выходов которой цифровые потоки со скоростью до нескольких Гбит/с поступают на регистрирующий терминал для передачи в центр корреляционной обработки. Если при регистрации сигналов и их передаче на коррелятор уже давно используются цифровые методы обработки сигналов, то в СПС их использование долгое время тормозилось отсутствием необходимых быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), которые могут обрабатывать гигабитный поток информации в реальном времени. Несмотря на это, развитие СПС шло по пути постепенного вытеснения аналоговых методов обработки сигналов цифровыми. По мере появления соответствующей элементной базы прослеживается тенденция перемещения места включения АЦП в сигнальном тракте радиотелескопа от выхода СПС в первых аналоговых системах к ее входу в современных цифровых системах (рис. 1).

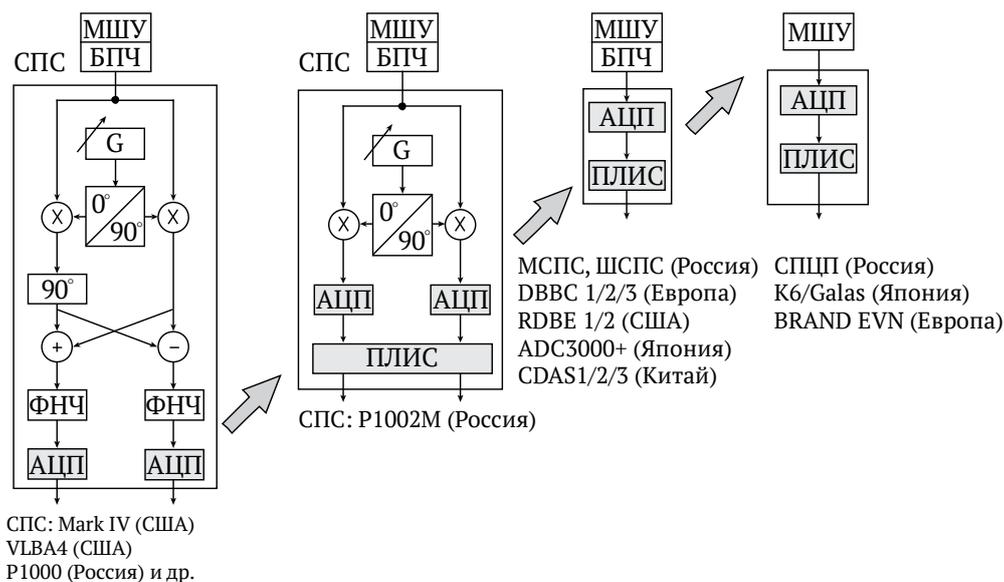


Рис. 1. Тенденция развития систем преобразования сигналов на радиотелескопах

Последние достижения в обработке сигналов на радиотелескопах основаны на использовании цифровых СПС, примерами которых являются разработанные в ИПА РАН широкополосные и многофункциональные СПС (ШСПС [1] и МСПС [2] соответственно). Однако использование таких систем предполагает наличие БПЧ в сигнальном тракте радиотелескопа и, соответственно, преобразование сигналов из области сверхвысоких частот (СВЧ) в область промежуточных частот (ПЧ) аналоговым способом. При этом недостатки этого способа преобразования сигналов, связанные с их неизбежными искажениями и соответствующими потерями когерентности, сохраняются. Поэтому закономерным представляется следующий шаг в развитии СПС— это полный отказ от аналогового преобразования сигналов и использование прямого цифрового преобразования на выходе МШУ. Ряд зарубежных научных центров уже работает в этом направлении, о чем свидетельствует создание японской системы K6/Galas [3] и проект сверхширокополосного цифрового приемника BRAND, предложенный EVN (The European VLBI Network) [4]. Поэтому важным и перспективным представляется создание отечественной системы прямого цифрового преобразования (СПЦП) радиоастрономических сигналов для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО».

К преимуществам такой системы по сравнению с существующими можно отнести:

- существенное сокращение аналогового тракта, размеров, веса и номенклатуры используемого на радиотелескопах оборудования;
- уменьшение стоимости оборудования;
- практически полную идентичность каналов на разных станциях;

- линейность фазочастотных характеристик всех каналов;
- многофункциональность и большой модернизационный потенциал.

Из недостатков СПЦП можно отметить только относительную сложность отладки системы и трудности в приобретении микросхем сверхбыстродействующих АЦП. Дело в том, что отечественная электронная промышленность пока не производит АЦП с быстродействием в десятки ГГц [5]. Такие АЦП уникальны, в отличие от ПЛИС, которые достаточно широко используются во многих отраслях техники. Серийный выпуск и коммерческое применение высокоскоростных АЦП пока ограничены.

В ИПА РАН исследования по созданию СПЦП ведутся на основе микросхемы HMCAD5831 фирмы Analog Devices [6]. Этот АЦП имеет полосу пропускания 20 ГГц при максимальной частоте дискретизации сигналов 26 ГГц и предполагает возможность коммерческого применения, в том числе в радиоастрономии. Число разрядов этой микросхемы равно 3, а наличие встроенного демультимплексора на выходе позволяет упростить согласование и ввод цифровых сигналов в ПЛИС, которая работает с меньшей тактовой частотой. На основе этого АЦП может быть построена система, которая с частотой дискретизации 20.48 ГГц позволит непосредственно оцифровывать сигналы L, S, C и X диапазонов частот. Для диапазонов K и Ka потребуется простое преобразование частоты вниз с помощью гетеродина с фиксированной частотой. Если же требуется принимать сверхширокополосный сигнал (например от 3 до 16 ГГц) [7], то его спектр можно разделить на два поддиапазона, соответствующие первой и второй зонам Найквиста, каждый из которых оцифровывается отдельным АЦП.

В СПЦП блок цифрового преобразования сигналов (БЦП) на основе указанной выше микросхемы предполагается разместить на антенне в непосредственной близости от МШУ радиоприемных устройств (рис. 2).

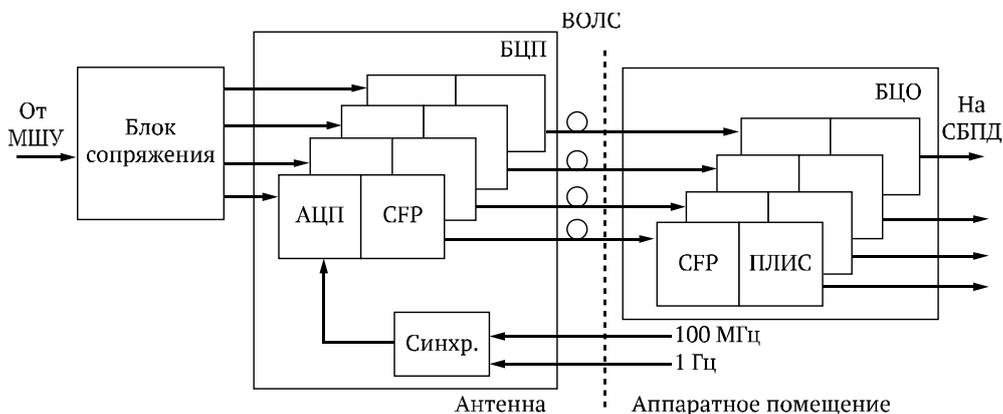


Рис. 2. Структура СПЦП

Вся цифровая обработка сигналов будет осуществляться в блоке цифровой обработки сигналов (БЦО), расположенном в аппаратном помещении, куда цифровые сигналы от БЦП передаются по волоконно-оптическим линиям (ВОЛС), что позволит избежать помех в чувствительных устройствах, размещаемых на антенне, а также ослабить ограничения по энергопотреблению и рассеиваемой мощности. СПЦП включает в себя блок сопряжения, который должен обеспечить подключение универсальной цифровой части системы к любому из используемых в комплексе «Квазар-КВО» или новых перспективных радиоприемных устройств (РПУ). Для каждого типа РПУ создается отдельный блок сопряжения, подготавливающий сигнал к аналого-цифровому преобразованию. БЦП может иметь до 4-х одновременно работающих каналов цифрового преобразования, чтобы обеспечить оцифровку сигналов во всех работающих диапазонах в обеих поляризациях. С выходов АЦП через оптические трансиверы SFP цифровые сигналы вместе с сигналами синхронизации передаются в 4-канальный БЦО. В каждом канале данные принимаются таким же SFP трансивером и после демультимплексирования вводятся в ПЛИС. В ПЛИС осуществляются все заданные преобразования сигналов. В режиме РСДБ там происходит выделение интересующих участков спектра и перенос их к нулевой частоте с соответствующим понижением частоты дискретизации. Выходные данные квантуются до нужного числа бит (обычно 1 или 2) и упаковываются в пакеты формата VDIF, принятого в международном радиоастрономическом сообществе [8]. Полученные пакеты передаются для записи на систему буферизации и передачи данных (СБПД) по интерфейсу 10G, 40G или 100G Ethernet с помощью встроенных в ПЛИС трансиверов и модулей QSFP. Формирование тактовых частот и привязка данных к шкале времени радиотелескопа осуществляется в БЦП с использованием сигналов 100 МГц и 1 Гц от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа. Управляет работой СПЦП центральный компьютер радиотелескопа по локальной сети Ethernet. По этому же интерфейсу в ПЛИС загружается требуемая прошивка, что позволяет реализовать в БЦО любые алгоритмы обработки, доступные в рамках вычислительных ресурсов ПЛИС. Благодаря этому, СПЦП может работать не только в режиме РСДБ наблюдений, но и в спектрометрическом и радиометрическом режимах.

На основе АЦП HMCAD5831 и ПЛИС XC7K325T фирмы Xilinx в ИПА РАН был разработан и изготовлен макет одноканальной СПЦП, на котором исследуются способы высокоскоростной цифровой обработки радиоастрономических сигналов и отрабатывается технология такой обработки (в том числе технология ввода высокоскоростных данных в ПЛИС и их синхронизации). Это позволит в ближайшем будущем приступить к полноценной разработке и конструированию СПЦП для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО».

Заключение

Переход от аналоговых к цифровым методам обработки сигналов — основная тенденция в развитии радиоастрономической аппаратуры. Закономерным этапом этого развития является перенос аналого-цифрового преобразования на выход маломощных усилителей РПУ и в большинстве случаев отказ от аналоговых методов преобразования сигналов на радиотелескопе. Разработка основанной на этом принципе системы прямого цифрового преобразования радиоастрономических сигналов позволит радикально сократить аналоговую часть сигнального тракта радиотелескопов и улучшить параметры радиоинтерферометра за счет идентичности каналов, линейности фазочастотных характеристик, повышения надежности работы аппаратуры. С появлением относительно доступных микросхем АЦП на диапазон частот до 20 ГГц и выше создание СПЦП стало вполне реальным. В ИПА РАН ведутся работы в этом направлении и по результатам исследований будет принято решение о разработке и изготовлении такой системы для радиотелескопов комплекса «Квazar-КВО».

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО».

Литература

1. Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В. Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономического радиоинтерферометра // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014 — № 1. — С. 34–40.
2. Маршалов Д. А., Носов Е. В., Гренков С. А., Бердников А. С., Федотов Л. В. Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. — СПб: ИПА РАН, 2017. — Вып. 43. — С. 95–103.
3. Sekido M., Takefuji K., Ujihara H., Kondo T., Tsutsumi M., Miyauchi Y., Kawai E., Takiguchi H., Hasegawa S., Ichikawa R., Koyama Y., Hanado Y., Watabe K., Suzuyama T., Komuro J., Terada K., Namba K., Takahashi R., Okamoto Y., Aoki T., Ikeda T. An Overview of the Japanese GALA-V Wideband VLBI System / International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings “New Horizons with VGOS” / ed. by Behrend D., Baver K. D., and Armstrong K. L. — NASA/CP–2016–219016. — Hanover: NASA Center for AeroSpace Information, 2016 — P. 25–33.
4. Tuccari G., Alef W., Pantaleev M., Flygare J., Perez J. A. L., Fernandez J. L. BRAND: a Very Wide-band Receiver for the EVN / Proceedings of the 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting. May 2017, Gothenburg, Sweden / ed. by Haas R., Elgered G. Molndal. — (EVGA), Chalmers University of Technology in Gothenburg 15–19 May, 2017 — P. 81–83.
5. Федотов Л. В., Маршалов Д. А., Гренков С. А. Возможности импортозамещения основных компонентов каналов приема и преобразования сигналов РСДБ радиотелескопа // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 39. — С. 98–109.
6. HMCAD5831 Datasheet and Product Info | Analog Devices. — URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmcad5831.pdf> (accessed: 18.08.2018).

7. *Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshekin V., Pozdnyakov I.* The Ultra-Wideband Receiver System for RT-13 Radio Telescope IAA RAS “Quasar” Network / The 13th EVN Symposium & Users Meeting Proceedings. // IAA RAS Transactions.— SPb.: IAA RAS, 2017. — Issue 41. — P. 49–52.

8. VLBI Data Interchange Format (VDIF). — URL: <https://vlbi.org/vdif/> (accessed: 18.08.2018).

A Project of the Direct Sampling Digital Backend for Radio Telescopes

E. V. Nosov, L. V. Fedotov

The paper overviews the development tendencies of digital backends for VLBI observations. It offers a concept of the new Direct Sampling Digital Backend for radio telescopes of the “Quasar” VLBI network. The concept is based on the analog-to-digital conversion of the signals received from the low noise amplifiers directly in radio frequency range. It allows to exclude analog downconverters from the signal chain and to avoid the related drawbacks. The paper describes the advantages of the new approach and provides the structure and operation principles of the Direct Sampling Digital Backend.

Keywords: analog-to-digital converters (ADC), digital signal processing (DSP), digital backend, Field Programmable Gate Array (FPGA), radio astronomy, VLBI.