

Обзор современных цифровых систем преобразования и регистрации сигналов для РСДБ-радиотелескопов

© Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

На современных радиотелескопах цифровые системы практически вытеснили аналоговую аппаратуру для преобразования и регистрации сигналов при радиоинтерферометрических наблюдениях. Однако обзорных статей по таким системам, как в нашей стране, так и за рубежом, очень мало. Зачастую скудные сведения о существующих и перспективных цифровых радиоастрономических системах разбросаны по различным публикациям, посвященным радиоастрономическим наблюдениям. Цель данной статьи — анализ современного состояния и перспектив развития отечественных и зарубежных цифровых систем для РСДБ-радиотелескопов, оценка уровня разработок в этой области и наиболее перспективных направлений совершенствования указанных систем. Проведен сравнительный анализ появившихся за последние годы в разных странах цифровых систем преобразования сигналов: R2DBE (США), DBBC3 (Европейский Союз), K6/GALAS (Япония), CDAS2 (Китай), KVN DAS (Южная Корея), ШСПС (широкополосная система преобразования сигналов) и МСПС (многофункциональная система преобразования сигналов) (Россия). Рассмотрены история развития, структурные схемы, параметры и особенности этих систем.

Число каналов для цифровой обработки сигналов промежуточных частот в рассмотренных системах может варьироваться от 2 до 12. В каждом канале после аналого-цифрового преобразования сигналов формируются цифровые потоки, как правило, в формате VDIF (VLBI Data Interchange Format). Предусмотрено не только 2-битовое квантование сигналов, но и возможность увеличения числа бит на каждую выборку сигнала до 4, 8, 10 или 16. Для цифровой обработки сигналов во всех рассмотренных системах используются программируемые логические интегральные схемы, так как только они способны обеспечить указанную обработку в реальном времени. Большое значение имеет использование стандартного интерфейса Ethernet и высокоскоростных оптических линий для передачи цифровых потоков в аппаратуру регистрации данных, которая на современных радиотелескопах строится на основе высокопроизводительных коммерчески доступных компонентов и программного обеспечения с открытым кодом.

Основной тенденцией развития цифровых систем преобразования сигналов является увеличение суммарной скорости выходного информационного потока, которая может достигать 96 Гбит/с и более. Для систем регистрации характерен отказ от разработки специализированных устройств и компоновка системы на основе сетевых технологий хранения большого объема данных. К другим направлениям развития современных цифровых систем на радиотелескопах можно отнести: минимизацию использования аналоговых методов и устройств для преобразования сигналов; стремление использовать не уникальные, а широко доступные и стандартизированные цифровые устройства; размещение цифровой системы непосредственно на антенне радиотелескопа с передачей цифровых потоков в систему регистрации, расположенную в аппаратном помещении, по волоконно-оптическим линиям. Важным направлением развития цифровых систем преобразования сигналов является расширение их функциональных возможностей и создание унифицированных систем, способных обеспечить как радиоинтерферометрические, так и радиометрические либо спектральные наблюдения без замены аппаратуры. Показано, что отечественные цифровые системы по своим параметрам не уступают лучшим зарубежным образцам, а по некоторым характеристикам превосходят их.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, системы преобразования сигналов, системы регистрации, аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка сигналов, программируемые логические интегральные схемы.

Контакты для связи: Федотов Леонид Васильевич (fedotov@iaaras.ru).

Статья поступила в редакцию 11.05.2020, принята к публикации 14.05.2020, опубликована 30.12.2020.

Для цитирования: Федотов Л. В. Обзор современных цифровых систем преобразования и регистрации сигналов для РСДБ радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 55. С. 24–35.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.24-35>

Overview of Modern Digital Data Acquisition and Recording Systems for VLBI Radio Telescopes

L. V. Fedotov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

On modern radio telescopes, digital systems have practically supplanted analog equipment for converting and recording signals during radiointerferometric observations. However, there are very few overview papers about such systems both in our country and abroad. Often, scarce information about the existing and promising digital radio astronomical systems is scattered among various publications devoted to radio astronomy observations. The purpose of this paper is to analyze the current state and prospects for the development of domestic and foreign digital systems for VLBI radio telescopes. It is necessary to assess the state of things in this field and the most promising directions for improving these systems.

Digital systems that have been developed in different countries in recent years were investigated by comparative analysis. The history of the development, structural diagrams, parameters and peculiarities of the following systems are considered: R2DBE (USA), DBBC3 (European Union), K6/GALAS (Japan), CDAS2 (China), KVN DAS (South Korea), BRAS and MDBE (Russia). The number of channels for digital processing of intermediate frequency signals in such systems can vary from 2 to 12. In each channel, digital streams are formed after the analog-to-digital conversion of signals, usually in VDIF format. Not only 2-bit quantization of signals is provided, but also the possibility of increasing the number of bits per each signal sample to 4, 8, 10 or 16. For digital signal processing, all systems use Field-Programmed Gate Arrays, since only they are able to provide the above processing in real time. It is important to use a standard Ethernet interface and high-speed optical lines to transmit digital streams to data recording equipment. With modern radio telescopes, this equipment is based on high-performance commercial off-the-shelf (COTS) hardware and open-source software.

The main trend in the development of digital data acquisition systems is an increase in the total speed of the output information stream, which can reach 96 Gbps. Recording systems are characterized by the rejection of the development of specialized devices and the layout of the system based on the network storage technologies of a big data. Other trends in the development of modern digital systems on radio telescopes include: minimizing the use of analog methods and devices for signal processing; using not unique, but widely available and standardized digital devices; the placement of the digital system directly on the antenna of the radio telescope with transmission of digital streams to the recording system located in the equipment room via fiber-optic lines. An important direction of the development of digital data acquisition systems is the expansion of their functional capabilities and the creation of unified systems capable of providing both radiointerferometric and radiometric or spectral observations without replacement of equipment. It has been shown that Russian-made digital systems in terms of their parameters are not inferior to the best foreign samples, and in some characteristics they are superior to them.

Keywords: Very Long Base Interferometry, Data Acquisition System, recording system, digital signal processing, Field Programmed Gate Array.

Contacts: Leonid V. Fedotov (fedotov@iaaras.ru).

Received May 11, 2020, accepted May 14, 2020, published 30 December, 2020.

For citation: Fedotov L. V. Overview of modern digital data acquisition and recording systems for VLBI radio telescopes // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 55. P. 24–35.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.24-35>

Введение

Системы преобразования и регистрации сигналов — важная составная часть аппаратуры любого радиотелескопа, предназначенного для РСДБ. Они подключаются к выходам промежуточных частот (ПЧ) радиоастрономической приемной системы и обеспечивают аналого-цифровое преобразование сигналов, преобразование их спектров с выделением, если это необходимо, частотных каналов внутри полосы ПЧ, формирование цифровых потоков в заданном формате и их регистрацию. От этих систем во многом зависят параметры радиотелескопа в целом, чувствительность радиointерферометра и точность определе-

ния групповой задержки сигнала при РСДБ, качество данных, получаемых при наблюдениях. Если регистрация сигналов на радиотелескопах почти всегда производилась в цифровом виде, то цифровые системы преобразования сигналов (СПС) начали бурно развиваться только в нашем столетии и в настоящее время практически вытеснили аналоговые системы на большинстве радиотелескопов. Однако литературы по цифровым СПС почти нет. Зачастую скудные сведения о существующих и перспективных цифровых радиоастрономических системах разбросаны по различным публикациям, посвященным радиоастрономическим наблюдениям. Обзорных публикаций по цифро-

вым системам преобразования и регистрации сигналов для радиотелескопов очень мало. Отечественных статей на эту тему нет совсем, хотя потребность в таких работах в связи с бурным развитием указанных систем, несомненно, существует.

Цель данной статьи — анализ современного состояния и перспектив развития отечественных и зарубежных цифровых систем для РСДБ-радиотелескопов. Оценка уровня разработок в этой области позволила бы наметить наиболее перспективные направления совершенствования указанных систем.

Современное состояние систем преобразования и регистрации сигналов на РСДБ-радиотелескопах

Необходимость перехода от аналоговых СПС к цифровым была сформулирована еще в начале текущего столетия в рамках проекта VLBI2010 [1], разработанного специальной рабочей группой

Международной службы РСДБ IVS. В этом проекте была предложена укрупненная структура цифровой СПС, обоснована необходимость использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в каналах такой системы, отмечено, что ширина полосы частот каждого канала ограничивается быстродействием существующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Однако задача создания сети радиотелескопов на антеннах малого диаметра, поставленная в проекте VLBI2010, требовала расширения полосы частот каждого канала СПС для компенсации потерь чувствительности радиоинтерферометра из-за сокращения площади поверхности антенны. Регистрация сигналов в проекте VLBI2010 основывалась на использовании специально разработанного параллельного формата данных VLBI Standard Hardware Interface (VSI-H) и американских систем регистрации семейства Mark 5.

Таблица 1

Современные цифровые системы преобразования и регистрации сигналов на РСДБ радиотелескопах

Обсерватория или комплекс	Страна	Входит в сеть	Система преобразования сигналов	Система регистрации
Effelsberg	Германия	IVS, EVN	DBBC2, RDBE	Fula10G, Mark6
Wettzel	Германия	IVS, EVN	DBBC2	Mark6, Fila10G/Flexbuff system
Goddard	США	IVS	RDBE	Mark6
Koike	США	IVS	RDBE	Mark6
Westford	США	IVS	RDBE	Mark6
Hartebeesthoek	ЮАР	IVS	DBBC	Mark6
Hobart	Австралия	IVS	DBBC3	Fila10G, Flexbuff system
Радиотелескопы проектов VERA и GALA-V	Япония	IVS, EAVN	ADS3000+, K6	K5 Recording Terminal, OCTADISK
Robledo	Испания	DNS, EVN	DVP	Mark5C
Medicina	Италия	IVS, EVN	DBBC	Flexbuff system
Noto	Италия	IVS	DBBC3	Fula10G
Sardinia Radio Telescope (SRT)	Италия	EVN, Italian VLBI network	DBBC	Mark5, Flexbuff system
Ny-Alesund	Норвегия	IVS	DBBC2	Mark5B+
Onsala	Швеция	IVS, EVN	DBBC3	Flexbuff system
Metsahovi	Финляндия	IVS, EVN	DBBC3	Flexbuff system
Yebeş	Испания	IVS, EVN	RDBE-G	Mark6
VIRAC	Латвия	–	DBBC2	Mark5C, Flexbuff system
Комплекс «Квазар-КВО»	Россия	IVS, EVN	ШСПС, МСПС	СЗПД
Shanghai	Китай	IVS, EAVN	DBBC3, CDAS2	Fila10G, Flexbuff system, Mark 6
Nanshan	Китай	IVS, EVN, EAVN, CVN	DBBC2, CDAS2	Diskpacks
Радиотелескопы сети KVN	Южная Корея	KVN, EAVN	KVN DAS	Mark 5B, Mark 6

Таблица 2

Основные параметры современных цифровых систем преобразования сигналов

Система	Страна-разработчик	Число каналов ПЧ	Ширина полосы частот канала, МГц	Квантование сигналов	Система	Суммарная скорость инф. потока на выходе, не более	Формат данных	Выходной интерфейс
R2DBE	США	2	2048	2 бит	R2DBE	16 Гбит/с	VDIF	10GE
DBBC2	Италия	4	512/1024	2 бит/4 бит	DBBC2	32 Гбит/с	VSI-H, VDIF	10GE
DBBC3	Европа	4/2/1	1024/2048/4096	2 бит/10 бит	DBBC3	128 Гбит/с	VSI-H, VDIF	40GE (100GE)
K6 /GALAS	Япония	4	1024	1/2 бит	K6 /GALAS	40 Гбит/с	VDIF	10GE
ADC3000+	Япония	4	512/1024	1/2/4/8 бит	ADC3000+	16 Гбит/с	VSI-H	VSI-H
KVN DAS	Южная Корея	4	512/1024	2 бит	KVN DAS	8 Гбит/с	VSI-H, ID-1	VSI-H
CDAS2	Китай	8/4	512/1024	1/2/4/8/16 бит	CDAS2	16 Гбит/с	VSI-H, VDIF	10GE, VSI-H
ШСПС	Россия	8	512	2 бит/8 бит	ШСПС	16 Гбит/с	VDIF	10GE
МСПС	Россия	до 12	512/1024/2048	2 бит/10 бит	МСПС	96 Гбит/с	VDIF	10GE (40GE)

Концепция VGOS, разработанная в рамках развития проекта VLBI2010, была основана на переходе от приема и обработки сигналов в двух частотных диапазонах к широкодиапазонному приему и требовала увеличения скорости цифровых потоков на радиотелескопах [2]. Соответственно увеличился объем информации, обрабатываемой на радиотелескопе, начались разработки более быстродействующих цифровых СПС и новых систем регистрации сигналов, основанных на передаче данных по каналам сети Ethernet с использованием нового международного формата VDIF (VLBI Data Interchange Format).

В настоящее время помимо отечественного РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» в мире существует несколько национальных и международных РСДБ-сетей: международная сеть IVS, американские DSN и VLBA, европейская EVN, восточно-азиатская сеть EAVN, японская VERA, китайская CVN, южнокорейская KVN. Большинство входящих в них радиотелескопов оснащены цифровыми СПС, разработанными за последнее время [3, 4, 5]. Наиболее характерные из них приведены в табл. 1.

Указанные в таблице цифровые системы в той или иной степени удовлетворяют требованиям, сформулированным в проекте VLBI2010 и VGOS. Они имеют число каналов достаточное для обработки сигналов двух поляризацій в нескольких частотных диапазонах с шириной полосы частот от 512 до 4096 МГц, обеспечивают 2-битовое квантование сигналов и формирование цифровых пото-

ков в формате VDIF для передачи их по сетям 10GE или 40GE.

Предусмотренная в некоторых цифровых СПС возможность увеличения числа бит, приходящихся на каждую выборку сигнала, позволяет не только сократить потери при дискретизации сигналов, но и расширить функции системы по контролю сигнального тракта, обеспечить регистрацию сигналов при радиометрических или спектральных наблюдениях. Большое число каналов системы и ширина полосы каждого из них позволяют при наблюдениях перекрыть широкий частотный диапазон и регистрировать сигналы в двух поляризациях одновременно, как это предусмотрено в проекте VGOS. Основные параметры перспективных цифровых систем приведены в табл. 2.

Зарубежные цифровые системы преобразования сигналов

Американская система R2DBE

Цифровая система RDBE (ROACH Digital Backend) разработана совместно Haystack Observatory и NRAO (National Radio Astronomy Observatory, USA) в 2010 г. на основе готовых плат iADC и ROACH фирмы Digicom Electronic Inc. При этом был использован опыт разработки на таких же платах системы преобразования сигналов DVP (DSN VLBI Processor), применяемой на радиотелескопах сети DSN. В дальнейшем система RDBE была модернизирована с заменой платы ROACH

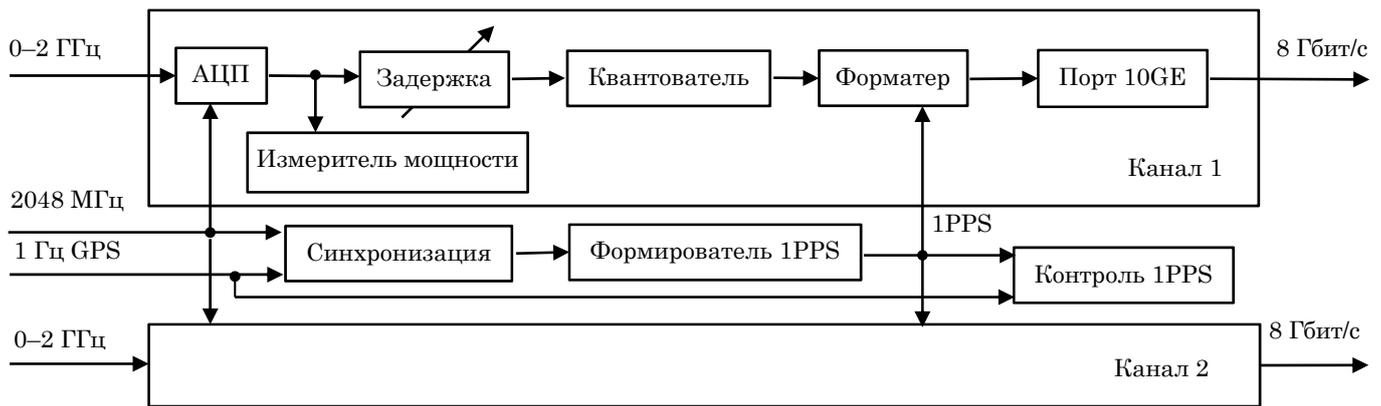


Рис. 1. Система R2DBE

на ROACH2. Последняя модификация системы R2DBE [6] содержит два одинаковых канала с 8-разрядными АЦП типа EV8AQ160 фирмы e2v, которые размещены на отдельных платах. Этот АЦП способен при тактовой частоте 2048 МГц работать со скоростью 4 Гбит/с [7]. Операции задержки на заданное число тактов, 2-битового квантования цифровых сигналов и формирования цифрового потока в формате VDIF для обоих каналов выполняет ПЛИС Xilinx Virtex-6 SX475T (рис. 1). Там же реализованы функции измерения мощности сигналов, синхронизации поступающих от датчика времени GPS секундных импульсов, формирования и контроля задержки импульсов внутренней шкалы времени 1PPS.

Так как тактовая частота работы ПЛИС ограничена (256 МГц), на вход поступают и обрабатываются параллельно 16 выборок сигналов. Для калибровки АЦП и согласования фаз цифровых сигналов предусмотрена подстройка задержки кодов на выходах АЦП.

В системе возможно использование конфигурации ПЛИС с банком полифазных фильтров и выделением 16, 32 или 64 узкополосных каналов. При создании 8-канальной системы из четырех экземпляров R2DBE может быть достигнута суммарная скорость выходного информационного потока в 64 Гбит/с.

Европейская система DBBC

Модульная система DBBC (Digital Base Band Converter) была разработана совместно несколькими европейскими исследовательскими организациями. Она содержит модули АЦП, цифрового преобразования сигналов, а также устройства, обеспечивающие цифровой интерфейс и передачу данных между указанными модулями. В зависимости от числа модулей в системе может быть предусмотрено различное количество каналов, обрабатывающих сигналы ПЧ с выходов приемной системы радиотелескопа. Так 4-канальная система

DBBC2 обеспечивает цифровую обработку сигналов в диапазоне до 2.2 ГГц с полосой частот 512 или 1024 МГц и формирование цифровых потоков с суммарной скоростью не более 32 Гбит/с. Последняя модификация системы DBBC3 [8] в минимальной конфигурации состоит из модуля аналого-цифрового преобразования сигналов ADB3L на микросхемах 10-разрядного АЦП EV10AQ190A фирмы e2v, который способен обрабатывать сигналы в полосе частот шириной 4096 МГц, и двух модулей (CORE3L, CORE3H) цифровой обработки сигналов на ПЛИС типа Virtex 7 (рис. 2).

Модуль CORE3H обеспечивает прием цифровых сигналов от АЦП, 2-битовое квантование, цифровую фильтрацию и разбивку на каналы в зависимости от режима работы радиотелескопа. Там же осуществляется синхронизация внутренней шкалы времени (1PPS) с секундными импульсами от внешнего датчика времени, например GPS. Внутренние сигналы синхронизации (2048 МГц и 1PPS) формируются специальным устройством (Clock). В модуле CORE3L выполняется форматирование цифровых потоков в заданном формате (VSI-H или VDIF) и формируются стандартные цифровые потоки 10GE или 40GE. Контроллер системы (FILA40G) предназначен для

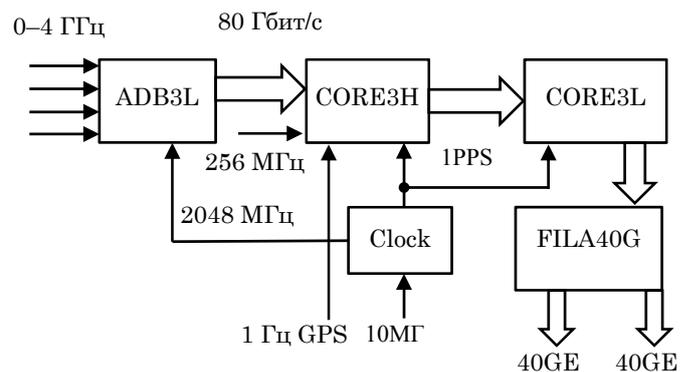


Рис. 2. Система DBBC3

мультиплицирования и коммутации цифровых потоков в зависимости от режима работы радиотелескопа и программы наблюдений. В зависимости от конфигурации, загружаемой в ПЛИС модулей цифровой обработки сигналов, в системе DBBC3 предусмотрены различные режимы работы радиотелескопа и сопряжение с различной приемной и регистрирующей аппаратурой: режим прямого преобразования цифровых отсчетов сигнала в полосе частот 4096 МГц; полифазная фильтрация и выделение двух, четырех или восьми каналов шириной 2, 1 или 0.5 ГГц соответственно; полифазная фильтрация или цифровое преобразование частот с выделением узкополосных каналов шириной 2-4-8-16-32-64-128 МГц [9].

Комплекс аппаратуры радиотелескопа SRT

Примером комплексного подхода к созданию аппаратуры преобразования и регистрации сигналов может служить комплекс на радиотелескопе Sardinia Radio Telescope [10]. Он имеет модульную структуру и включает в себя: 14 модулей 8-разрядных АЦП ADC1x5000-8 с тактовой частотой преобразования сигналов 5 ГГц; 7 модулей ROACH2 цифровой обработки сигналов на ПЛИС, аналогичных тем, которые используются в системе R2DBE; 8 рабочих станций на Intel XEON 8 core E5-2640 v2 и графических процессорах NVidia GTX 980 TI; модуль синхронизации и распределения тактовых сигналов; модуль управления и модуль хранения данных на 96 ТБ (рис. 3). Все модули, за исключением модуля синхронизации, соединены между собой оптоволоконными линиями 10 GE, для коммутации которых используется 24-портовый коммутатор типа Brocade VDX 6720.

В зависимости от режима работы радиотелескопа путем коммутации модулей и загрузки соответствующих прошивок в ПЛИС в этом комплексе предусмотрена возможность реализации различных систем преобразования и регистрации сигналов. К ним относится 14-входовая система радиометрической регистрации сигналов, обеспечивающая измерение полной мощности сигнала в полосе частот от 0.1 до 2.1 ГГц с возможностью выбора узкополосных частотных каналов в этой полосе. 4-входовой FX-коррелятор на основе банка цифровых фильтров (Digital Filter Bank) используется при поиске и измерении временных параметров пульсаров, а также при наблюдениях в спектральных линиях. В этой системе полоса частот каждого из входных сигналов 1024 МГц, а число спектральных каналов достигает 8192. Узкополосный спектрометр-поляриметр обеспечивает в рабочей полосе частот 135–240 МГц 2048 спектральных каналов для каждой поляризации и позволяет устанавливать мгновенную полосу пропускания от 0.488 до 62.5 МГц. Для работы в режиме РСДБ используется 4-входовая система DBBC, аналогичная описанной выше (рис. 2). Она имеет диапазон рабочих частот шириной 1024 МГц и позволяет передавать данные в систему регистрации Mark5 или Flexbuff. Универсальная широкополосная система SARDARA (Sardinia Roach2-based Digital Architecture for Radio Astronomy) предназначена для наблюдений в континууме, спектроскопии (с числом спектральных каналов до 16348), поляриметрии и наблюдений с высоким временным разрешением [11]. Система позволяет одновременно обрабатывать до 14 сигналов с полосой до 2.5 ГГц каждый и получать на выходе

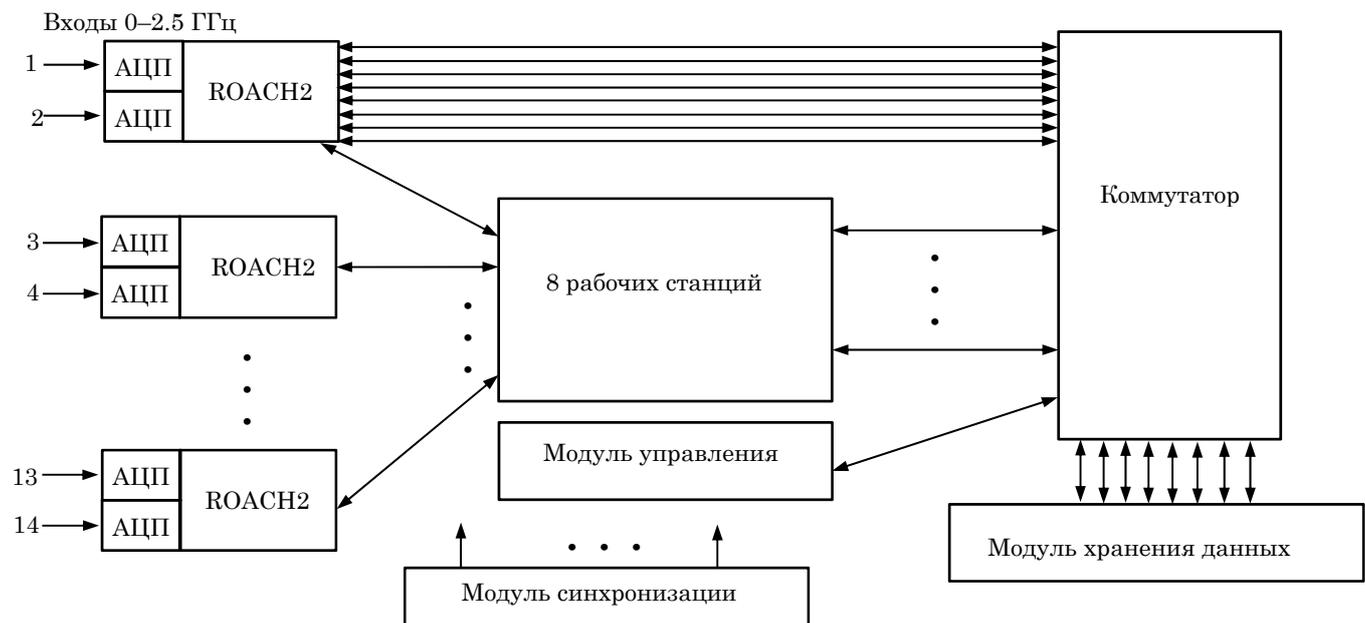


Рис. 3. Аппаратура преобразования и регистрации сигналов радиотелескопа SRT

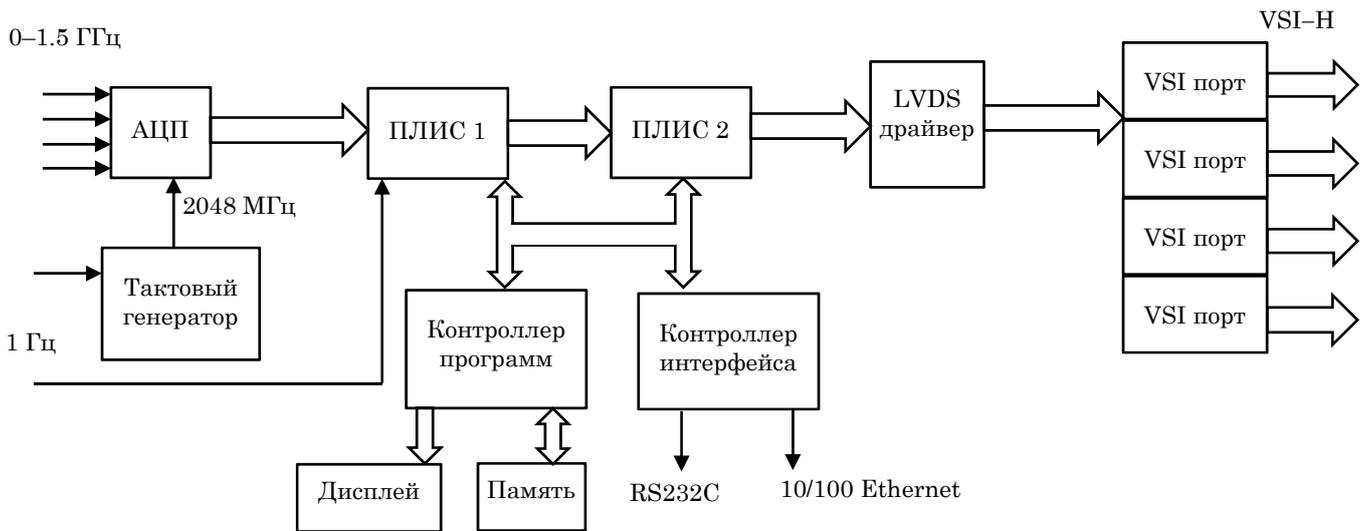


Рис. 4. Система ADS3000+

цифровые потоки с суммарной скоростью 80 Гбит/с. В этой системе для первичной обработки сигналов используются все 7 модулей ROACH2. Вторичная обработка осуществляется с помощью 8 рабочих станций и, в частности, дает возможность картографирования астрофизических источников при наблюдениях в континууме.

Японские системы ADS3000+ и K6/GALAS

В Японии с конца прошлого столетия успешно разрабатываются и внедряются цифровые системы преобразования и регистрации сигналов семейства K3–K5 [12]. При этом скорость аналого-цифрового преобразования, обработки и регистрации сигналов постоянно возрастает: от 56 Мбит/с в системе K3 к 1024 Мбит/с в системе K4 и 4096 Мбит/с в системе K5. Дальнейшим развитием системы K5 является СПС ADS3000+, которую производит японская фирма Cosmo Research Corp. В ней использованы: 8-разрядный АЦП фирмы e2V с тактовой частотой 2048 МГц и две ПЛИС Xilinx Virtex 5. Система способна обрабатывать сигналы в диапазоне частот до 1.5 ГГц, имеет 4 входа ПЧ и 4 одинаковых выхода для цифровых потоков в формате VSI-H [13]. Она может работать в различных режимах с цифровой фильтрацией сигналов и формированием как широкополосных, так и узкополосных каналов. Все основные элементы системы (рис. 4) размещены на одной многослойной печатной плате. В отличие от ADS3000+ система K6/GALAS не требует предварительного переноса спектра сигнала в диапазон ПЧ и предназначена для прямого цифрового преобразования аналоговых сигналов в диапазоне частот 0.01–24 ГГц с тактовой частотой 16384 МГц [14].

Система имеет 4 аналоговых входа и 4 выходных оптических порта 10GE. За счет цифровой обработки сигналов в ней имеется возможность выделения четырех каналов с полосой частот шириной 1 ГГц в любом месте входного частотного диапазона и предусмотрен режим цифровых видеоконверторов с выделением узкополосных каналов. Цифровая СПС K6/GALAS производится фирмой Elecs Industry Co. Ltd. на основе модулей собственной разработки [15].

Китайская система CDAS

Первая китайская цифровая СПС CDAS1 была создана в 2010 г. Она позволяла одновременно обрабатывать 4 сигнала ПЧ с шириной полосы частот 512 МГц и выделять в них 16 узкополосных каналов шириной 1, 2, 4, 8, 16 или 32 МГц с 1 или 2-битовым квантованием. На выходе формировался цифровой поток в формате VSI-H. В каждом канале имелся АЦП с тактовой частотой 1024 МГц и 4 ПЛИС Xilinx Virtex 4, в каждой из которых был реализован цифровой видеоконвертор с фильтрами, выделяющими сигналы верхней и нижней боковых полос. Система обеспечивала максимальную скорость выходного информационного потока 2 Гбит/с.

В системе CDAS2, разработанной в 2013 г., скорость выходного информационного потока увеличилась до 16 Гбит/с. Система построена аналогично CDAS1. В ней каждый канал имеет 2 входа ПЧ с полосой 512 МГц и оптический выход 10GE, а для цифровой обработки сигналов используется ПЛИС Xilinx Kintex 7 (рис. 5). При этом предусмотрена возможность как формирования 16 узкополосных каналов с помощью цифровых видеоконверторов, так и выделения до 120 каналов путем полифазной фильтрации сигналов [16].

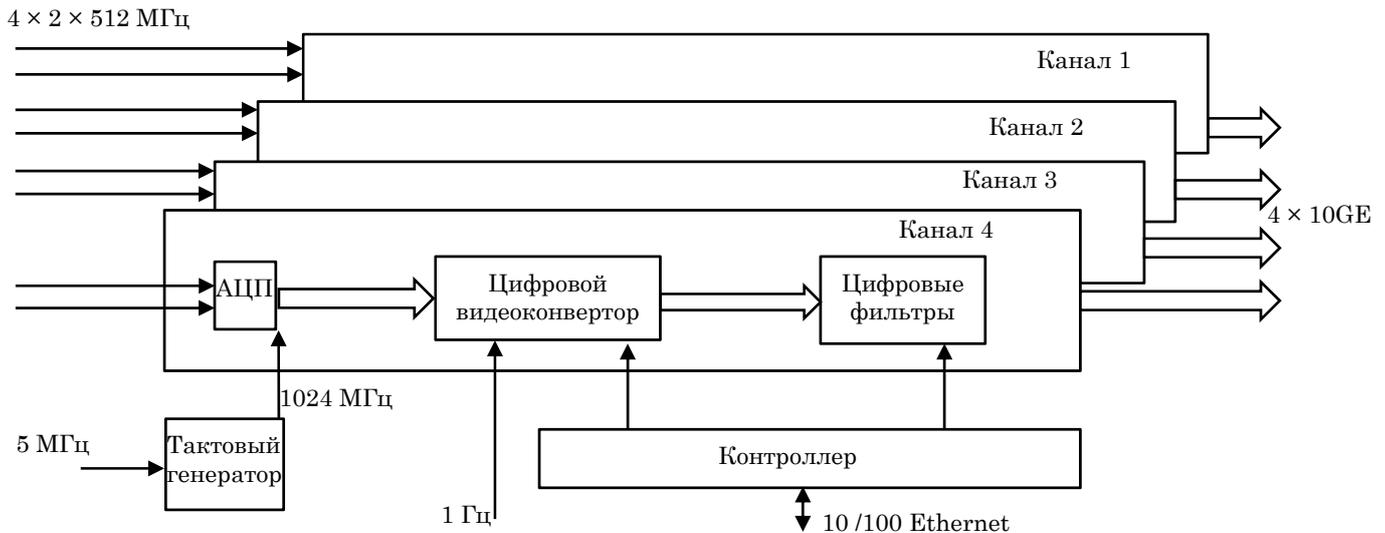


Рис. 5. Система CDAS2

В следующей китайской разработке, системе CDAS3, пропускная способность каждого канала ПЧ увеличена вдвое, что дало возможность обрабатывать либо 4 сигнала с полосой частот 1 ГГц, либо 2 сигнала с полосой 2 ГГц, либо 1 сигнал с полосой 4 ГГц [17]. Число оптических выходов 10GE в системе возросло до 6.

Южнокорейская система KVN DAS

Особенностью СПС KVN DAS [18] является то, что модули АЦП размещаются непосредственно на антенне радиотелескопа (рис. 6). Цифровые потоки в формате VSI-N вместе с сигналами синхронизации поступают на оптическую передающую систему. Там происходит преобразование параллельных потоков в последовательные, а электрические сигналы преобразуются в оптические для передачи в аппаратное помещение по оптоволоконной линии.

Использование оптического мультиплексора со спектральным уплотнением каналов (MS WDM) позволяет одновременно передавать четыре информационных потока вместе с сигналами синхронизации по одному оптическому волокну на разных несущих частотах. На приемном конце происходит демультиплексирование (DMS) оптических сигналов и преобразование их в электрические. При этом извлекаются сигналы синхронизации и формируются параллельные цифровые потоки, поступающие в банк цифровых фильтров. Приемная и передающая оптические системы используются также для обмена сигналами управления между частями СПС, размещенными на антенне и в аппаратном помещении. Банк цифровых фильтров используется для полифазной фильтрации цифровых сигналов и выделения узкополосных каналов в соответствии с программой РСДБ наблюдений.

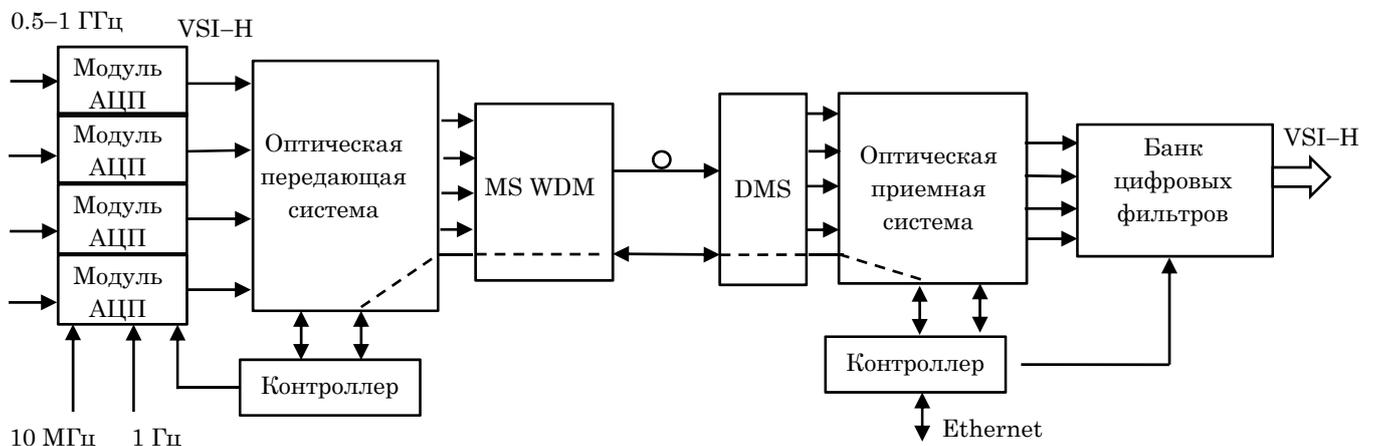


Рис. 6. Система KVN DAS

Первоначально в KVN DAS использовались модули АЦП ADS1000 с производительностью 1024 Мбит/с, разработанные NiCT (Япония). Имеется информация о попытках применения в KVN DAS более производительных модулей АЦП [19].

Зарубежные системы регистрации сигналов для РСДБ

В соответствии с рекомендациями, изложенными в проекте VGOS, современные системы регистрации сигналов для РСДБ должны не только обеспечивать высокую (не менее 16 Гбит/с) скорость записи данных, но передавать данные по волоконно-оптическим линиям в центр корреляционной обработки в режиме e-VLBI. Систем регистрации, в той или иной степени удовлетворяющих указанным требованиям, не так много (табл. 3). Все они основаны на применении стандартных, коммерчески доступных компонентов и модулей памяти на жестких магнитных дисках (HDD).

Наиболее распространена американская система регистрации Mark 6 [20]. Она является результатом дальнейшего развития известного семейства систем записи РСДБ-данных Mark 5, которое до недавнего времени занимало доминирующее положение на рынке систем регистрации для радиотелескопов. Система Mark 6 использует конструктив Mark 5 и представляет собой рабочую станцию на основе материнской платы Asus P6T6 WS Revolution с процессором Intel Core i7 и RAID-массив из 4 модулей с интерфейсом SATA при 8 HDD в каждом модуле. Программное обеспечение Mark 6 основано на операционной системе Linux и включает в себя программы, обеспечивающие передачу данных и управление системой. Mark 6 поддерживает дисковые модули емкостью от 8 до 80 Тбайт. В системе предусмотрен контроль дискового пространства, обеспечивается устойчивость к возможным отказам магнитных дисков, имеется возможность передачи данных по волоконно-оптической линии в центр корреляционной обработки.

Таблица 3

Современные зарубежные системы регистрации сигналов

Система	Скорость регистрации, Гбит/с	Число HDD	Интерфейс
Mark 6	16	4 × 8	4 × 10GE
Fila10G/Flexbuff system	32	≥ 24	8 × 10GE
OCTADISK2	8	≥ 2 × 12	10GE (40GE)

Mark 6 можно отнести к традиционному направлению развития систем регистрации радиоастрономических сигналов. Однако в последнее десятилетие появилось новое направление, основанное на сетевых технологиях, использовании аппаратуры серверов и облачного хранения данных. Такая система представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий регистрацию, мультиплицирование, коммутацию, буферизацию и передачу по стандартным волоконно-оптическим линиям через Internet данных РСДБ-наблюдений в формате VDIF. Аппаратную часть подобной системы принято называть Flexbuff. Примером может служить европейская разработка Fila10G/Flexbuff System, первое упоминание о которой относится к 2011 г. Эта система состоит из двух частей: интерфейсной части (Fila10G) и собственно регистрирующей части (Flexbuff) [21]. Интерфейсный блок Fila10G производится фирмой NAT-Lab Technologies HK Ltd [22]. Он преобразует 4 (или 8 в последней модификации) параллельных 32-разрядных потока данных в стандартные пакеты Ethernet, которые поступают на 2 или 4 оптических выхода 10GE. Таким образом, блок обеспечивает передачу данных со скоростью до 32 Гбит/с. Имеются модификации Fila10G для работы с данными в форматах VSI-H или VDIF и преобразованием форматов внутри блока. Через двунаправленные порты предусмотрена возможность передачи данных для записи как в Flexbuff, так и в регистраторы Mark 5B+. Специальная модификация Fila10G имеет вход для секундных импульсов шкалы времени радиотелескопа и может осуществлять синхронизацию потоков данных. Для управления блоком Fila10G используются порты RS232 или Ethernet.

Аппаратура Flexbuff содержит все компоненты, необходимые для высокоскоростной сетевой записи данных: сетевые карты 10GE, большой пул жестких дисков (не менее 24), достаточное число контроллеров SATA для управления жесткими дисками, 12 или более гигабайт современной высокоскоростной памяти, системную плату с современным многоядерным процессором и стандартный корпус для установки в стойку. Емкость хранилища Flexbuff может достигать 216 Тбайт [21].

Система регистрации OCTADISK (OCTAve DISK drive) [23] была разработана в Японии в рамках проекта OCTAVE (Optically Connected Array for VLBI Exploration), по которому несколько японских радиотелескопов были объединены в сеть с помощью оптоволоконных линий и работали в режиме e-VLBI. OCTADISK работает с данными в формате VDIF и первоначально имела один двунаправленный порт 10GE, обеспечивающий запись и воспроизведение данных со скоростью 4 Гбит/с, и 2 модуля памяти по 12 HDD в каждом.

При необходимости система комплектовалась специальным блоком OCTAVIA (Octave-VSI-Adapter) для преобразования данных из формата VSI-N в формат VDIF и передачи их через стандартный интерфейс 10GE. В модифицированной системе OCTADISK2 число портов 10GE было увеличено до 4, а скорость записи данных — до 8 Гбит/с. При этом число модулей памяти при необходимости можно наращивать. Система OCTADISK2 включает в себя персональный компьютер со специально разработанным программным обеспечением для управления регистрацией высокоскоростных потоков данных [24].

Отечественные перспективные цифровые системы преобразования и регистрации сигналов

В нашей стране радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» оснащены отечественными широкополосными системами ШСПС, которые по своим характеристикам не уступают лучшим зарубежным СПС [25]. ШСПС имеет 8 входов ПЧ и содержит 8 одинаковых модулей — каналов цифрового преобразования сигналов, а также модуль синхронизации, соединенные между собой через кросс-плату, на которой разветвляются сигналы синхронизации и управления модулями. Наличие в системе единого модуля синхронизации обеспечивает синхронное формирование цифровых потоков в формате VDIF. Каждый модуль цифрового преобразования сигналов построен на основе АЦП ADC081500, способного работать в диапазоне частот входных сигналов до 2 ГГц, и ПЛИС Xilinx Spartan-6, которая формирует 2-битовый информационный поток на стандартном выходе 10GE. ШСПС управляется через интерфейс Ethernet и имеет развитую систему контроля параметров и характеристик каждого канала. Особенностью ШСПС является размещение её непосредственно на антенне радиотелескопа с передачей цифровых потоков в аппаратное помещение по оптическим линиям.

В 2020 г. в обсерватории «Светлое» была введена в эксплуатацию новая, многофункциональная цифровая система преобразования сигналов МСПС, которая также размещается на антенне радиотелескопа [26]. Она может включать в себя до 12 каналов, каждый из которых содержит АЦП с тактовой частотой дискретизации 4096 МГц и диапазоном входных частот до 2 ГГц. Это позволяет напрямую оцифровывать сигналы с выходов приемных устройств радиотелескопов РТ-32 с полосой ПЧ до 1 ГГц, 3-диапазонных (S/X/Ka) приемных систем с полосой ПЧ 1–2 ГГц или сверхширокополосных (3–16 ГГц) приемных систем радиотелескопов РТ-13, последняя модификация которой имеет 8 каналов с ПЧ 0.05–2 ГГц. Таким образом, МСПС дает возможность наблюдать в 4 поло-

сах шириной 2 ГГц, расположенных в диапазоне от 3 до 16 ГГц в каждой из 2 поляризации. В этом случае суммарная скорость информационного потока на выходе системы достигает 64 Гбит/с. Особенностью системы МСПС является то, что она способна обеспечить преобразование и регистрацию сигналов не только в режиме РСДБ с широкополосными или узкополосными каналами, но и в других режимах работы радиотелескопа, например, в режиме радиометрической регистрации сигналов или в режиме регистрации радиоизлучения в спектральных линиях. Переход на другой режим работы осуществляется оперативно путем дистанционного изменения прошивки ПЛИС в каналах и программы процессора, управляющего работой системы.

Для регистрации сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» введены в эксплуатацию системы буферизации и передачи данных (СБПД). Система представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий регистрацию данных РСДБ-наблюдений со скоростью 16 Гбит/с, оперативную передачу данных одновременно с регистрацией на скорости до 10 Гбит/с в центр корреляционной обработки, хранение данных объемом до 10 ТБ [27]. СБПД построена на основе сервера Dell Power Edge r720 с двумя процессорами Intel Xeon E5-2643 3.30GHz, 128 ГБ оперативной памяти и двумя дисковыми массивами Dell Power Vault MD1220. Кроме того, она содержит четыре 2-портовые сетевые карты Intel X520, что суммарно с портами сервера обеспечивает десять сетевых интерфейсов 10GE. СБПД построена на высокопроизводительных коммерчески доступных компонентах и допускает возможность увеличения скорости регистрации данных. Работы в этом направлении уже ведутся.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что практически все современные СПС формируют цифровые потоки в формате VDIF и используют интерфейс 10GE для передачи этих потоков в систему регистрации. При этом тенденцией является увеличение суммарной скорости выходного информационного потока, которая может достигать 64 Гбит/с. Хотя в настоящее время передача такого потока на коррелятор затруднительна и требует больших затрат времени, перспективы развития высокоскоростных систем передачи данных и компьютерных сетей внушают определенный оптимизм. К другим тенденциям развития современных СПС можно отнести: минимизацию использования аналоговых методов и устройств для преобразования сигналов; стремление использовать не уникальные, а широкодоступные и стандартизированные цифровые устройства; размещение СПС непосредственно на антенне радиотелескопа с переда-

чей цифровых потоков в систему регистрации, расположенную в аппаратном помещении, по волоконно-оптическим линиям. Важным направлением развития цифровых СПС является расширение их функциональных возможностей. Современная цифровая система на ПЛИС способна производить с высокой скоростью не только 2-битовое квантование, фильтрацию и форматирование широкополосных сигналов при РСДБ-наблюдениях, но и выделять из них узкополосные каналы с заданными характеристиками, с высокой точностью осуществлять синхронизацию цифровых потоков и привязку их к шкале времени радиотелескопа. В цифровой СПС, как правило, реализуется широкий набор функций контроля сигнального тракта радиотелескопа и оперативной проверки его характеристик. Возможность дистанционного перепрограммирования ПЛИС позволяет использовать аппаратные средства цифровой СПС для обеспечения работы радиотелескопа не только в режиме РСДБ, но и в любом другом режиме. Цифровая СПС становится универсальной системой для первичной обработки и подготовки к регистрации сигналов, принимаемых антенной радиотелескопа при радиоинтерферометрических, радиометрических и спектральных наблюдениях.

Развитие глобальной сети Интернет и сетевых коммуникаций, а также постоянный рост скорости передачи данных дали толчок развитию технологии РСДБ реального времени (e-VLBI), когда данные поступают непосредственно на коррелятор. Если же пропускная способность канала передачи данных еще недостаточна, то используется так называемый режим квази-реального времени, когда система регистрации служит для буферизации данных на радиотелескопе перед их передачей по оптоволоконной линии. Поэтому, несмотря на рост объема и скорости получения информации при радиоастрономических наблюдениях, основной тенденцией развития систем регистрации на радиотелескопах является отказ от разработки специализированных устройств для регистрации радиоастрономических сигналов и компоновка системы на основе сетевых технологий и широко доступных компьютерных систем хранения большого объема данных.

Отечественные цифровые системы, которыми оснащены либо оснащаются радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО», по своим параметрам находятся на уровне лучших зарубежных образцов, а по некоторым характеристикам превосходят их. Например, последняя разработка — МСПС обеспечивает скорость информационного потока на выходе до 96 Гбит/с и в отличие от зарубежных систем размещается на антенне радиотелескопа, имеет развитую систему контроля и диагностики параметров сигнального тракта, способна выпол-

нять функции как радиоинтерферометрической, так и радиометрической, либо спектрометрической аппаратуры. В перспективе можно ожидать, что цифровая система заменит всю аппаратуру, предназначенную для преобразования сигналов на радиотелескопе, и на долю аналоговых устройств останется только усиление сигналов, принятых антенной. Предпосылки для этого есть [28].

Благодарность

Работа выполнена по инициативе автора и не требовала отдельного финансирования. Автор выражает благодарность заведующему Лабораторией преобразования и регистрации сигналов ИПА РАН к. т. н. Носову Е. В. за поддержку при выполнении указанной работы.

Литература

1. *Tuccari G., Whitney A., Hinteregger H., et al.* VLBI 2010 backend system subgroup report. URL: https://ivsc.gsfc.nasa.gov/about/wg/wg3/3_backend_systems.pdf (accessed: 01.12.2020).
2. IVS Technology. VGOS Concept [Электронный ресурс]. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-concept.html> (accessed: 01.12.2020).
3. *Armstrong K. L., Baver K. D., Behrend D.* International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. 2017 + 2018 Biennial report. USA, Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2020. 300 p. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/br2017+2018/NASA-TP-2020-219041.pdf> (accessed: 21.11.2020).
4. EVGA 2019, 24th Meeting of the European VLBI group for geodesy and astrometry, March 17–19, 2019. Proceedings. Spain: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2019. 314 p. URL: http://www.oan.es/evga2019/24_EVGA_2019_Las_Palmas.pdf (accessed: 21.11.2020).
5. EAVN Status Report for the 2021A Semester. October 22, 2020 [Электронный ресурс]. URL: https://radio.kasi.re.kr/eavn/status_report20a/node3.html (accessed: 21.11.2020).
6. *Akiyama K., Alberdi A., Alef W., et al.* First M87 event horizon telescope results. II. Array and instrumentation // *The Astrophysical Journal Letters*. 2019. no. 875:L2 28 p. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0c96> (accessed: 21.11.2020).
7. *Jiang H., Liu H., Guzzino K., et al.* A 5 Giga samples per second 8-bit analog to digital printed circuit board for radio astronomy // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2014. Vol. 126. P. 761–768. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/677799> (accessed: 21.11.2020).
8. *Tuccari G., Alef W., Dornbusch S., et al.* DBBC3 — the new wide-band backend for VLBI // 14th European VLBI network symposium & Users meeting EVN 2018, October 8–11, 2018. Proceedings of Science. Granada, 2019. URL: <https://pos.sissa.it/344/140/pdf> (accessed: 21.11.2020).
9. *Tuccari G., Alef W., Haas R., et al.* New observing modes for the DBBC3 // IVS 2018. 2018 General meeting proceedings. USA: NASA, 2018. P. 47–49. URL: <https://>

ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2018/11_tuccari_etal.pdf (accessed: 21.12.2020).

10. Sardinia Radio Telescope. Project. Backends. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.srt.inaf.it/project/backends> (accessed: 06.11.2020)

11. *Melis A., Concu R., Trois A., et al.* SARDINIA roach2-based digital architecture for radio astronomy (SARDARA) // Journal of Astronomical Instrumentation. 2018. Vol. 7. no. 1. 1850004. 17 p. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/full/10.1142/S2251171718500046> (accessed: 06.11.2020).

12. *Koyama Y.* Development of K3, K4 and K5 VLBI systems and considerations for the new K6 VLBI system // IVS NICT TDC News. 2013. no. 33. P. 39–43. URL: https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_33/pdf/pctdc_news33.pdf (accessed: 20.11.2020).

13. *Sekido M., Takefuji K., Tsutsumi M., et al.* Broad-band VLBI data acquisition system for GALA-V // IVS NICT TDC News. 2015. no. 35. P. 7–11. URL: https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_35/tdc_news35.pdf (accessed: 21.12.2020).

14. *Takefuji K.* Performance of direct sampler K6/GALAS // IVS NICT TDC News. 2016. no. 36. P. 20–22. URL: https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_36/tdc_news36.pdf (accessed: 25.11.2020).

15. Elecs Industry Co. Ltd. Products. AD Converter. Giga Sampler. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elecs.co.jp/en/product/rf_direct_sampler.html (accessed: 21.11.2020).

16. *Zheng W., Zhang J., Wang G., et al.* Technical progress of the Chinese VLBI network // IVS 2018 General meeting proceedings. USA: NASA, 2018. P. 7–11. URL: https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2018/02_zheng_etal.pdf (accessed: 21.12.2020).

17. *Zhu R., Wu Y., Li J., et al.* The Development of VLBI digital backend in SHAO // 2018 Progress in electromagnetics research symposium (PIERS-Toyama), August 1–4, 2018. Toyama: IEEE, 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8597987> (accessed: 21.11.2020).

18. *Oh S.-J., Roh D.-G., Wajima K., et al.* Design and development of a high-speed data-acquisition system for the Korean VLBI network // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2011. Vol. 63, Issue 6. P. 1229–1242. URL: <https://academic.oup.com/pasj/article/63/6/1229/2898194> (accessed: 21.12.2020).

19. KVN. Radio Technology Development Group. Backend Development. [Электронный ресурс]. URL: https://radio.kasi.re.kr/rtgdg/kvn_backend.php (accessed: 15.11.2020).

20. *Whitney A. R., Cappallo R. J., Ruszczyk C. A., et al.* Mark 6 16-Gbps next-generation VLBI data system // IVS 2014 General meeting proceedings. USA: NASA, 2014. P. 126–129. URL: https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2014/027_Whitney_etal.pdf (accessed: 21.11.2020).

21. *De Vicente P., Barbas L., González J.* Using VDIF in astronomy VLBI observations at the 40m RT. Flexbuff and eVLBI operations. Report number IT-CDT 2016-12. Guadalajara, Yebes: Yebes Observatory, IGN, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/315828506_Using_VDIF_in_astronomy_VLBI_observations_at_the_40m_RT_Flexbuff_and_eVLBI_operations/link/58e94802a6fdccb4a832155d/download (accessed: 21.12.2020).

22. Hat Lab. FILA10G — Multi 10GE Interface. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hat-lab.cloud/fila10g-2> (accessed: 21.11.2020).

23. *Oyama T., Kono Y., Suzuki S., et al.* New VLBI observing system 'OCTAVE-Family' to support VDIF specifications with 10 GigE for VERA, JVN, and Japanese e-VLBI (OCTAVE) // IVS 2012 General meeting proceedings. USA: NASA, 2012. P. 91–95. URL: <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2012/oyama.pdf> (accessed: 21.12.2020).

24. *Oyama T., Kono Y., Suzuki S., et al.* A progress report on the development and performance of OCTAVE-DAS for VERA, JVN and Japanese e-VLBI (OCTAVE) // 2014 XXXIth URSI General assembly and scientific symposium (URSI GASS), August 16–23, 2014. Beijing: IEEE, 2014. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6930037> (accessed: 21.12.2020).

25. *Кольцов Н. Е., Федотов Л. В., Маршалов Д. А., Носов Е. В.* Цифровая система преобразования сигналов для астрономических радиоинтерферометров // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 1. С. 34–40.

26. *Маршалов Д. А., Носов Е. В., Бердников А. С., Федотов Л. В.* Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 95–103.

27. *Безруков И. А., Сальников А. И., Яковлев В. А., Вылегжанин А. В.* Исследование производительности дисковой подсистемы системы буферизации и передачи данных // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 5–10.

28. *Носов Е. В., Федотов Л. В.* Проект радиоастрономической системы прямого цифрового преобразования сигналов // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 94–99.