

Цифровая система преобразования сигналов нового поколения для радиотелескопов

© Е. В. Носов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Появление аналого-цифровых преобразователей (АЦП), способных напрямую преобразовывать сигналы всех используемых в радиоастрономии длин волн, позволяет отказаться от большей части аналогового оборудования в сигнальном тракте радиотелескопа, заменив его системой прямого цифрового преобразования (СПЦП). Обработка сигнала в цифровом виде с помощью программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) дает значительные преимущества перед существующей аналоговой аппаратурой, позволяя уменьшить аппаратные потери чувствительности радиоинтерферометра. Разработка систем прямого цифрового преобразования является одной из мировых тенденций в развитии радиоастрономической аппаратуры. Рассмотрены перспективы создания отечественной СПЦП для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО». Приведена структура и принципы работы системы и ее составных частей.

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

Введение

В настоящее время для радиоинтерферометрических со сверхдлинными базами (РСДБ) наблюдений используются отдельные диапазоны частот L , S , C , X , K , Ka шириной не более нескольких ГГц, а достигнутая при таких наблюдениях точность определения групповой задержки сигналов составляет 10–20 пс [1]. Дальнейшее повышение точности возможно путем расширения регистрируемой полосы и диапазона частот, в котором расставляются каналы радиоинтерферометра при синтезе полосы частот, а также сокращением аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра. Поэтому перспективные проекты РСДБ-сетей, например VGOS [2], направлены на реализацию наблюдений в сверхшироком диапазоне частот 2–14 ГГц, в котором расставляются широкополосные (по 0.5 или 1 ГГц) каналы радиоинтерферометра.

Для решения задачи приема и преобразования таких сигналов ведутся разработки сверхширокополосных радиоастрономических приемных устройств (РПУ) [3], способных работать в указанном диапазоне частот, и сопрягаемых с ними систем преобразования сигналов (СПС) [4]. Однако в отличие от СПС, РПУ обычно строятся на принципах аналоговой техники, содержат несколько блоков преобразования частоты и кабельных соединений между ними, что ведет к искажениям сигналов. При этом очень сложно, а зачастую и практически невозможно, обеспечить стабильность групповых задержек сигналов в разных каналах, линейность и идентичность их фазочастотных характеристик (ФЧХ), что отрицательно сказывается на точности измерения групповой задержки сигналов радиоинтерферометром [5].

В значительной мере от этих недостатков можно избавиться, если преобразовать в цифровую форму сверхширокополосные сигналы непосредственно на выходе маломощных усилителей РПУ и последующее преобразование частоты, фильтрацию сигналов и формирование частотных каналов осуществлять с помощью цифровой обработки. Это даст возможность отказаться от большей части предназначенного для преобразования сигналов аналогового оборудования, повысив тем самым стабильность характеристик каналов и надежность работы всего сигнального тракта радиотелескопа.

Современный уровень развития цифровой электроники дает возможность решить задачу аналого-цифрового преобразования сверхширокополосных сигналов. На рынке появляются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), способные обрабатывать сигналы в диапазоне частот до 25 ГГц (см. таблицу). При этом быстродействие АЦП может достигать $68 \cdot 10^9$ преобразований в секунду.

Таблица

Параметры сверхбыстродействующих АЦП

Изделие, производитель	Число разрядов	Полоса пропускания, ГГц	Частота дискретизации, ГГц
ADC-30-NG, MICRAM	6	20	32
HMCAD5831, Analog Devices	3	20	26
HMC5401, Analog Devices	3	10	20
CHAIS ADC, Fujitsu	8	18	56
ASNT7122, Adsantec	4	20	15
A6B25G, Alphacore	6	25	25
EV5AS210, e2v	5	8	20
Williamson ADC, Jariet Tech.	10	25	42–68

На стадии экспериментальных образцов находятся и более высокочастотные устройства, которые могут стать коммерчески доступными в обозримом будущем. Сверхбыстродействующие АЦП находят применение в оптических трансиверах 100 G Ethernet, измерительном оборудовании, в сверхширокополосных приемных устройствах и системах цифровой обработки сигналов, предназначенных в том числе и для радиоастрономии. В Европе разрабатывается цифровое сверхширокополосное РПУ BRAND [6], предназначенное для радиотелескопов Европейской РСДБ-сети (EVN). В нем планируется напрямую оцифровывать весь входной диапазон частот от 1.5 до 15 ГГц и далее обрабатывать уже цифровые сигналы также, как это делается в цифровой системе DBBC3 [7].

Аналогичные сверхширокополосные цифровые системы для приема и цифровой обработки радиоастрономических сигналов разрабатываются в Астрофизической лаборатории Бордо (Франция) для использования в международных проектах Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) и Square Kilometre Array (SKA) [8, 9]. Огромного прогресса в использовании прямого цифрового преобразования сверхширокополосных сигналов достигли в Японском институте NICT, где была создана система GALA-V, предназначенная для сличения удаленных шкал времени методом РСДБ [10]. Используемый в данной системе цифровой преобразователь K6/GALAS способен обрабатывать сигнал с максимальной частотой до 16 ГГц.

Таким образом, внедрение прямого цифрового преобразования сверхширокополосных сигналов является мировой тенденцией в радиоастрономической аппаратуре. Данная работа рассматривает перспективы создания СПЦП в ИПА РАН для внедрения на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО».

Принципы построения СПЦП для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО»

Системы на основе цифровой обработки сигналов (ЦОС) лишены недостатков аналоговых устройств и дают разработчику полный контроль над характеристиками каналов РПУ и СПС. Чтобы максимально воспользоваться всеми преимуществами ЦОС, целесообразно сократить путь от источника сигнала до входа АЦП, то есть АЦП в СПЦП должны располагаться на антенне вблизи малошумящих усилителей (МШУ).

Однако устройства, осуществляющие ЦОС, являются источником электромагнитных помех, и их размещение на антенне может привести к попаданию помех в чувствительные аналоговые цепи МШУ. Поэтому желательно, чтобы большая часть аппаратуры цифровой обработки была вынесена за пределы антенны, например, в аппаратное помещение обсерватории. Такое расположение упрощает требования к размерам аппаратуры ЦОС, ее весу и токопотреблению. Последнее особенно важно, так как рассеиваемая мощность при обработке большого потока данных может составлять сотни Ватт, для отвода которых требуется организация соответствующей системы охлаждения,

что затруднительно в ограниченном объеме фокальной кабины антенны радиотелескопа.

Для передачи цифрового потока данных от АЦП, находящегося на антенне, к устройству ЦОС, находящемуся в аппаратном помещении, целесообразно использовать волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). ВОЛС широко применяются для передачи цифровых сигналов, практически не создают электромагнитных помех, сами устойчивы к таким помехам и обеспечивают надежную передачу скоростного потока данных на большие расстояния. При передаче цифровых сигналов от АЦП к аппаратуре ЦОС критически важно обеспечить синхронизацию передаваемых данных со шкалой времени радиотелескопа, для чего необходимо снабдить их метками времени.

Исходя из вышесказанного, основные принципы построения СПЦП можно сформулировать следующим образом:

- 1) АЦП размещается непосредственно на антенне;
- 2) устройство ЦОС располагается вне антенны в аппаратном помещении радиотелескопа;
- 3) передача данных от АЦП к устройству ЦОС осуществляется по ВОЛС;
- 4) должна быть обеспечена синхронизация передаваемых данных со шкалой времени радиотелескопа.

Основанная на этих принципах структура СПЦП содержит антенную часть, состоящую из блока сопряжения (БС) и блока цифрового преобразования (БЦП), и наземную часть, состоящую из блока цифровой обработки (БЦО) (рис. 1). От РПУ в сигнальном тракте радиотелескопа на основе СПЦП остаются только облучатели и МШУ. Разумеется, все вспомогательные устройства, предназначенные в частности для калибровки радиотелескопа и не показанные на рисунке, должны быть сохранены в составе РПУ. Сигналы от РПУ принимаются блоком сопряжения СПЦП, который осуществляет необходимое усиление, фильтрацию и коммутацию сигналов на входе АЦП. Затем сигналы оцифровываются в БЦП и передаются по ВОЛС в БЦО, где происходят необходимые для проводимого типа наблюдений преобразования. После цифровой обработки потоки данных записываются в системе буферизации и передачи данных (СВПД), откуда уже передаются в центр корреляционной обработки [11].

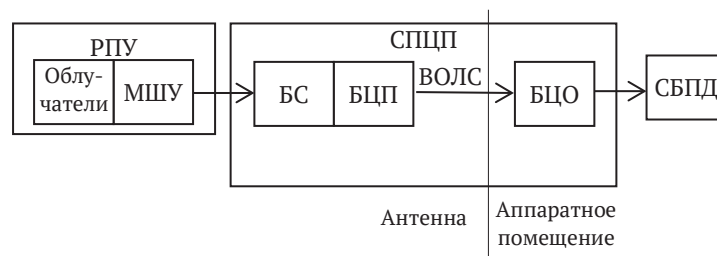


Рис. 1. Принцип построения сигнального тракта на основе СПЦП

Выбор оптимальной частоты дискретизации сигналов

Важнейшим параметром СПЦП является частота дискретизации сигнала в АЦП, от выбора которой во многом зависит структура отдельных блоков системы. В СПС для РСДБ традиционно используют частоты дискретизации $f_s = 2^n$ МГц, где n – целое число. Например, в СПС Р1002М [12], используемой на радиотелескопах РТ-32, $f_s = 1, 4, 8, 16, 32$ или 64 МГц, а в широкополосной СПС [13], установленной в настоящий момент на радиотелескопах РТ-13, используется частота дискретизации $f_s = 1024$ МГц. Поэтому для сохранения совместимости систем необходимо, чтобы сигналы на выходе БЦО также соответствовали условию $f_s = 2^n$.

Как правило, в РСДБ широкополосный сигнал делится на несколько узкополосных, из которых при корреляционной обработке восстанавливается синтезированный отклик. Даже в перспективных широкополосных СПС (например [4] или [14]) частота дискретизации сигналов в каналах, определяемая теоремой Котельникова, не превышает 4096 МГц. Поэтому для удобства ЦОС в СПЦП целесообразно выбрать частоту дискретизации АЦП, кратную 4096 МГц, что позволит с помощью децимации на целый коэффициент получить на выходе СПЦП каналы с частотой дискретизации $4096/2^n, n \geq 0$. Из таблицы видно, что для частот дискретизации выше 25 ГГц резко уменьшается число доступных моделей АЦП, поэтому частоту дискретизации целесообразно выбрать из ряда $f_s = 8192, 12288, 16384, 20480$ или 24576 МГц.

Аналоговая фильтрация обычно вызывает искажения сигналов. Любой аналоговый фильтр имеет температурную нестабильность характеристик и, как правило, вносит искажения в ФЧХ, особенно в районе частоты среза фильтра. Однако, подбором частоты дискретизации из приведенного выше ряда можно добиться, чтобы интересующие нас частотные диапазоны, в которых находится полезный сигнал, не располагались вблизи границ зон Найквиста, где должна находиться частота среза антиалиазингового фильтра, препятствующего наложению спектров при дискретизации [15]. Тогда полоса пропускания канала будет определяться только цифровыми фильтрами в БЦО, имеющими необходимый коэффициент прямоугольности и принципиально линейную ФЧХ.

Указанные соображения лежат в основе выбора оптимальной частоты дискретизации сигналов в БЦП. В настоящее время в приемных системах радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» используются облучатели L, S, C, X и K диапазонов длин волн (на радиотелескопах РТ-32), либо S, X и Ka диапазонов (на радиотелескопах РТ-13). Ведутся разработки сверхширокополосного облучателя для радиотелескопов РТ-13 на диапазон частот $2-18$ ГГц [16]. Соответствующий частотный план для РПУ комплекса «Квазар-КВО» приведен на рис. 2.

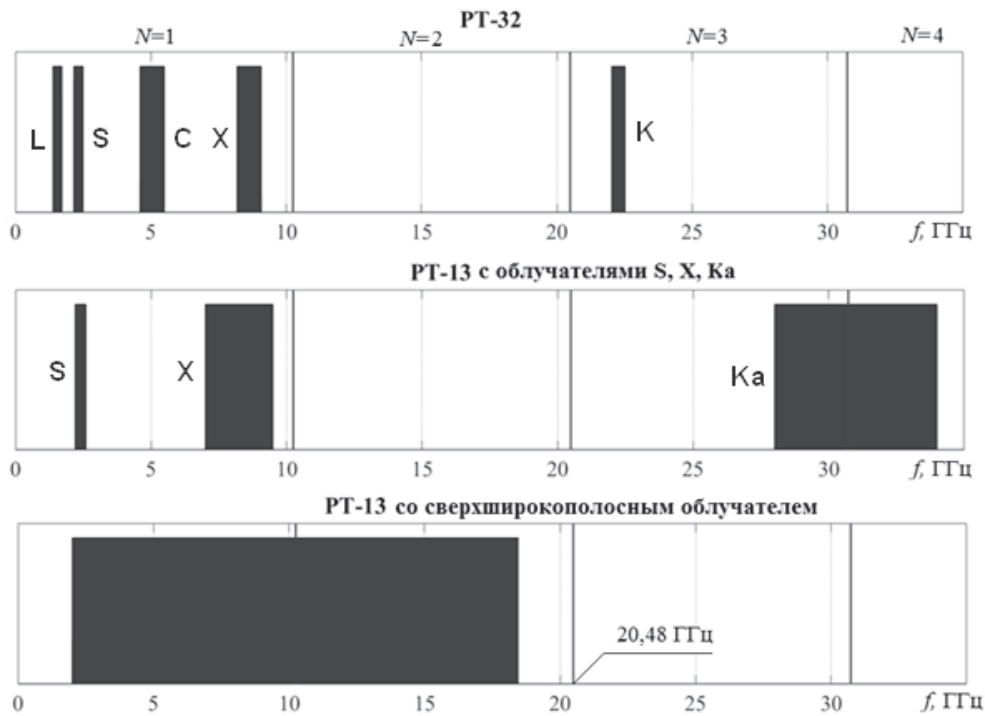


Рис. 2. Частотный план РПУ на радиотелескопах РСДБ-сети «Квazar-КВО».

N — номер зоны Найквиста при частоте дискретизации $f_s = 20.48$ ГГц

При частоте дискретизации $f_s = 8192$ и 16384 МГц X-диапазон (8–9 ГГц) попадает как раз на границу зон Найквиста, поэтому использование этих частот нежелательно. Для сверхширокополосного облучателя (нижний график на рис. 2) спектр сигнала в любом случае потребует делить на поддиапазоны, так как для размещения всего спектра в одной зоне Найквиста потребовалась бы частота дискретизации не менее 36 ГГц. Однако при частоте $f_s = 12288$ МГц необходимо три поддиапазона, а при частотах $f_s = 20480$ или 24576 МГц — всего два. Поэтому предпочтительно выбрать один из двух последних вариантов, то есть либо $f_s = 20480$ МГц, либо $f_s = 24576$ МГц.

Очевидно, что увеличение частоты дискретизации сопровождается и ростом сложности передачи, ввода в ПЛИС и дальнейшей обработки потока данных от АЦП, так как скорость цифрового потока возрастает. Поэтому частота дискретизации $f_s = 20480$ МГц оказывается оптимальным вариантом, подходящим для всех типов облучателей как на РТ-13, так и на РТ-32. В этом случае сигналы, принимаемые в L , S , C и X -диапазонах целиком попадают в 1-ю зону Найквиста (рис. 2). Так как у большинства АЦП из таблицы полоса пропускания входных каскадов не превышает 20 ГГц, то для приема сигналов из K и Ka -диапазонов может потребоваться преобразование частоты вниз с использованием гетеродина на фиксированной частоте.

Для аналого-цифрового преобразования сигнала от сверхширокополосного облучателя его спектр разделяется на два поддиапазона, соответствующих первой и второй зонам Найквиста, каждый из которых оцифровывается отдельным АЦП. Причем спектр сигнала из второй зоны Найквиста будет инвертирован, что легко исправляется при дальнейшей цифровой обработке. Структуры блоков сопряжения для трех рассмотренных случаев описаны в следующем разделе.

Блок сопряжения СПЦП

В отличие от цифровой части СПЦП блок сопряжения не может быть универсальным для любого радиотелескопа, так как по составу облучателей и структуре РПУ они существенно различаются. При разработке каждого конкретного БС необходимо рассчитать его усиление и коэффициент шума, чтобы минимизировать вклад в шумы системы. При этом могут потребоваться дополнительные усилители на входах БС, которые на приводимых ниже схемах для простоты не показаны. БС для радиотелескопа РТ-32 должен иметь отдельный вход для каждого диапазона частот (рис. 3). Облучатели диапазонов S и X — совмещены, что позволяет принимать оба диапазона одновременно. Сигналы этих диапазонов объединяются в БС с помощью широкополосного сумматора мощности и оцифровываются одним АЦП.

Спектр сигнала К-диапазона переносится вниз с помощью преобразователя частоты. Причем в качестве гетеродинного сигнала может использоваться сигнал частоты дискретизации АЦП 20.48 ГГц, что позволяет отказаться от отдельного гетеродина. Для подавления зеркального канала при переносе частот используется полосовой фильтр по входу смесителя. Чтобы минимизировать влияние его характеристик на полезный сигнал, полосу пропускания фильтра целесообразно выбрать на 10–15 % шире полосы частот полезного сигнала, а конечную полосу пропускания формировать в БЦО с помощью цифрового фильтра с линейной ФЧХ.

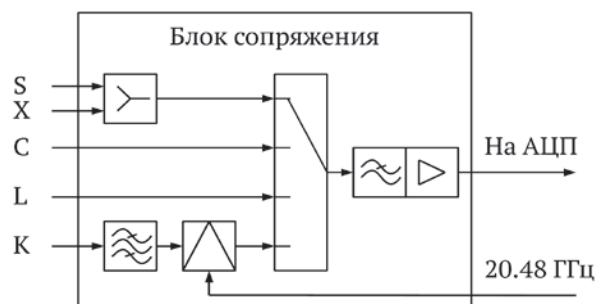


Рис. 3. Блок сопряжения СПЦП для радиотелескопов РТ-32 при приеме сигналов одной поляризации

Широкополосный коммутатор 4:1 в БС выбирает один из входных сигналов (S/X , L , X или K) и подает его на ФНЧ с частотой среза около 10 ГГц. Это необходимо, чтобы отсеять широкополосные шумы МШУ и помешать им попасть из второй зоны Найквиста в первую, что привело бы к увеличению шумов системы. Полученный сигнал дополнительно усиливается, чтобы соответствовать оптимальному для АЦП уровню. Для одновременной работы в двух поляризациях потребуется два таких БС и два АЦП в БЦП.

Трехдиапазонное РПУ радиотелескопов РТ-13 имеет совмещенный $S/X/Ka$ облучатель, что позволяет проводить наблюдения одновременно во всех трех диапазонах длин волн. Однако осуществить аналого-цифровое преобразование сигналов сразу трех указанных диапазонов на одном АЦП невозможно, так как их не удастся разделить по частоте в пределах одной зоны Найквиста. Поэтому на РТ-13 необходимо использовать два АЦП на каждую поляризацию. Блок сопряжения в этом случае как и ранее объединяет сигналы S и X -диапазонов в один канал и подает его на АЦП1 (рис. 4). Спектр сигнала Ka -диапазона (28–34 ГГц) с помощью преобразователя частоты переносится вниз в центр первой зоны Найквиста (2–8 ГГц). Для этого потребуется гетеродин на частоту 26 ГГц, синхронизируемый опорным сигналом 100 МГц. Как и ранее, частоты срезов фильтров отстоят далеко от полосы частот полезного сигнала, следовательно их влияние на искажения сигналов, а значит и на аппаратные потери чувствительности радиоинтерферометра будет незначительным.

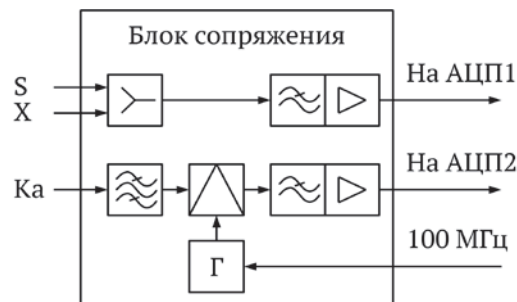


Рис. 4. Блок сопряжения СПЦП для радиотелескопов РТ-13 с трехдиапазонным РПУ при приеме сигналов одной поляризации

В случае реализации сверхширокополосного приема сигналов преимущества СПЦП проявляются в наибольшей мере. В этом случае блок сопряжения наиболее простой. Он делит входной сигнал на два поддиапазона: от 2 до 10 ГГц и от 10 до 18 ГГц. Такое разделение может выполняться либо с помощью делителя мощности и двух фильтров на соответствующие диапазоны, как показано на рис. 5, либо с помощью широкополосного диплексера.

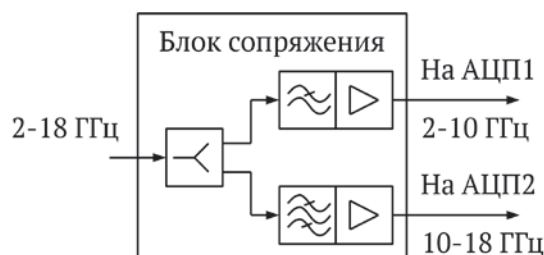


Рис. 5. Блок сопряжения СПЦП для радиотелескопов РТ-13 со сверхширокополосным РПУ при приеме сигналов одной поляризации

Приведенные схемы показывают, что БС могут быть достаточно простыми и компактными, а использование СПЦП при приеме сверхширокополосных сигналов позволяет кардинально сократить количество и сложность аналоговой аппаратуры в сигнальном тракте. Соответственно уменьшится ее размер, вес и, конечно, стоимость.

Цифровая часть СПЦП

Для оцифровки сигнала на радиотелескопах РТ-32 необходимо по одному АЦП на каждую поляризацию, а на радиотелескопах РТ-13 — по два АЦП. Соответственно БЦП должен иметь до четырех каналов цифрового преобразования (КЦП), каждый из которых содержит один АЦП (рис. 6).

Для установки оптимального уровня сигнала на входе АЦП используется управляемый аттенюатор. АЦП тактируется сигналом с частотой $f_s = 20.48$ ГГц, генерируемым в модуле синхронизации из сигнала опорной частоты 100 МГц, который поступает от системы частотно-временной синхронизации (СЧВС) радиотелескопа [17]. Также от СЧВС поступает сигнал “1 Гц”, с которым синхронизируются внутренние часы модуля синхронизации, используемые для добавления меток времени к потоку выходных данных БЦП. Управление БЦП осуществляется через локальную сеть (ЛС) радиотелескопа по интерфейсу 1G Ethernet.

Структура цифровой части СПЦП зависит от того, какой АЦП используется в БЦП. Наиболее доступным из известных сверхбыстродействующих АЦП с полосой пропускания 20 ГГц можно считать HMCAD5831 фирмы Analog Devices, поэтому на основе данного устройства и рассмотрены структуры БЦП и БЦО. Используемый АЦП имеет 3 разряда и бит переполнения, что позволяет получить 10 уровней квантования сигнала. 4-битные отсчеты сигнала поступают от ядра АЦП со скоростью 4×20.48 Гбит/с на логический вентиль типа исключаящее ИЛИ и далее на демультиплексор 1:2. На выход АЦП с демультиплексора поступает 8-разрядный сигнал со скоростью потока данных $2 \times 4 \times 10.24$ Гбит/с, а также меандр частоты 10.24 ГГц для синхронизации данных.

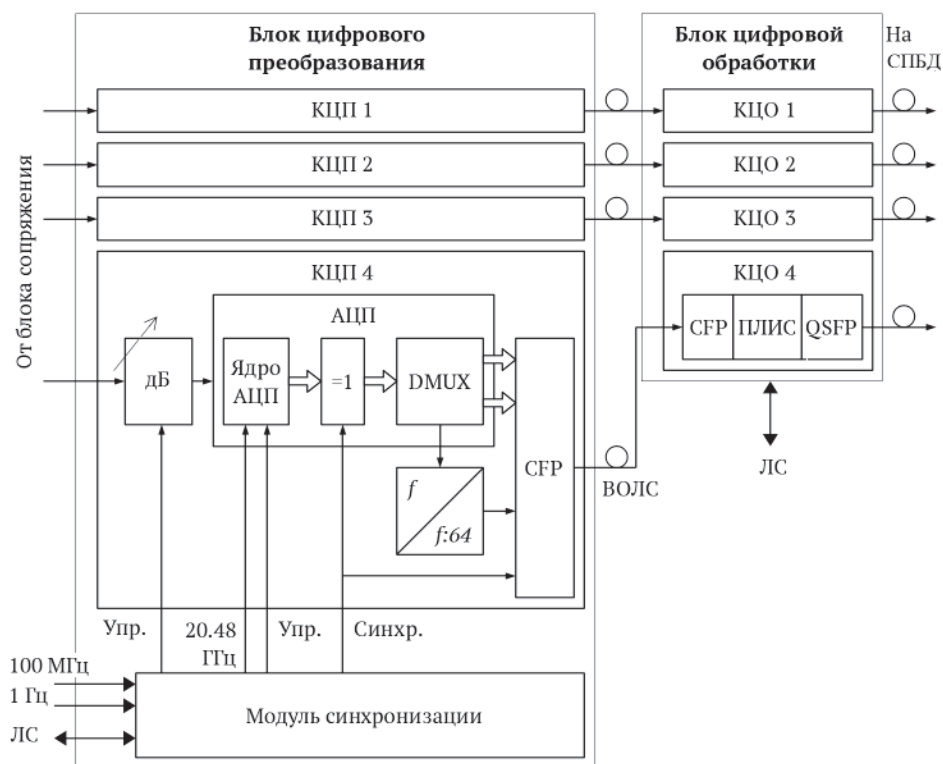


Рис. 6. Цифровая часть СПЦП

Для передачи такого потока данных используется трансивер типа CFP, поддерживающий скорость передачи более 100 Гбит/с. Существуют CFP трансиверы, способные принимать до 10 входных потоков данных и передавать их по одному оптоволокну, используя спектральное уплотнение каналов (технология DWDM). Если не использовать эту технологию, то входные потоки данных надо передавать параллельно по многожильному оптоволоконному кабелю, что также способны обеспечить некоторые модели CFP трансиверов.

В БЦО данные принимаются в канале цифровой обработки (КЦО) таким же CFP трансивером и поступают в виде 8 параллельных потоков на высокоскоростные GTX-трансиверы ПЛИС, где происходит демультиплексирование 1:32, за счет чего поток данных от АЦП вводится в ПЛИС в виде 64 параллельных 4-битных выборок сигнала с тактовой частотой всего 320 МГц. Для синхронизации трансиверов ПЛИС и, при необходимости, самого CFP трансивера, меандр частоты 10.24 ГГц от АЦП делится до 160 МГц. Полученный сигнал также передается по ВОЛС параллельно с данными.

Обработка данных в ПЛИС происходит в пакетном режиме, причем длина пакета кратна 64 отсчетам. Чтобы обозначить начало очередного пакета, данные сопровождаются метками времени, формируемыми в модуле синхрони-

зации и передаваемыми через тот же SFP трансивер по последней свободной линии. Метки времени содержат информацию о номере секунды и номере пакета в секунде и передаются с помощью одного из кодов, устраняющих постоянную составляющую. Перед началом работы проводится синхронизация КЦП с КЦО, во время которой определяется, какой из 64 параллельных отсчетов в ПЛИС является первым в пакете, после чего сдвиг данных устраняется, чтобы на каждом такте все параллельные отсчеты принадлежали только одному пакету.

Операция синхронизации выполняется с помощью встроенного в АЦП вентиля исключающего ИЛИ, один из входов которого доступен извне АЦП, а также имеющейся в HMCAD5831 возможности отключать выход ядра АЦП. Сигнал синхронизации (меток времени) поступает от модуля синхронизации на вход вентиля. При выключенных выходах ядра АЦП этот сигнал и становится выходным сигналом АЦП, благодаря чему в ПЛИС с точностью до одного отсчета можно определить начало очередного пакета и очередной секунды времени, то есть привязать данные к шкале времени модуля синхронизации, которая в свою очередь синхронизирована с СЧВС радиотелескопа.

В ПЛИС происходит выделение интересующих участков спектра, их фильтрация и перенос 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. Полученные пакеты передаются для записи на СПБД по интерфейсу 10G, 40G или 100G Ethernet с помощью встроенных в ПЛИС и QSFP трансиверов.

Внутри ПЛИС реализуется также набор функций анализа сигнала, включающий функции измерения мощности сигнала, спектральный анализ, выделение и анализ сигнала фазовой калибровки. Управление БЦО осуществляется из локальной сети радиотелескопа по интерфейсу 1G 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.

Заключение

Благодаря развитию элементной базы радиоэлектроники стало возможным создать систему прямого цифрового преобразования для радиотелескопов, работающую в любом радиоастрономическом диапазоне длин волн, в том числе сверхшироком. Размещение АЦП на антенне вблизи МШУ позволяет существенно сократить аналоговую часть сигнального тракта радиотелескопа, уменьшая габариты, вес и номенклатуру используемого оборудования. Такая цифровая система обеспечивает стабильность характеристик каналов, близкую к линейной ФЧХ, сокращение разброса групповой задержки сигналов

между каналами. Создание и внедрение СПЦП приведет к повышению стабильности и надежности работы оборудования, а, в конечном итоге, к дальнейшему сокращению потерь чувствительности радиointерферометра и повышению точности радиоастрономических измерений.

В настоящее время в ИПА РАН прорабатываются варианты исполнения такой системы, проводятся экспериментальные исследования сверхбыстродействующего АЦП НМСAD5831, разрабатываются алгоритмы цифровой обработки сверхширокополосных сигналов, исследуется влияние эффектов квантования и дискретизации таких сигналов на аппаратурные потери чувствительности при РСДБ. Это позволит создать отечественную СПЦП, соответствующую уровню указанных зарубежных разработок, с учетом требований международного РСДБ сообщества к перспективным системам преобразования сигналов. Гарантией этого является накопленный в ИПА РАН опыт создания цифровых систем преобразования сигналов для радиоастрономии.

Литература

1. *Ipatov A., Ivanov D., Ilin G., Smolentsev S., Gayazov I., Kurdubov S., Mardyshkin V., Fedotov L., Stempkovski V., Vytnov A., Salnikov A., Surkis I., Mikhailov A., Melnikov A.* New generation VLBI: Intraday UT1 estimations / International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2016 General Meeting Proceedings «New Horizons with VGOS» / ed. by Behrend D., Baver K. D., Armstrong K. L. — P. 106–110.
2. *Petrachenko B., Behrend D., Hase H., Ma C., Niell A., Nothnagel A., Zhang X.* Proposal for VGOS Observing Plan: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2013 Annual Report. 70–79 / 2014.
3. *Евстигнеев А. А., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Чернов В. К.* Сверхширокополосная приемная система для малых РСДБ-радиотелескопов // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2014. — Вып. 28. — С. 36–42.
4. *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.
5. *Федотов Л. В.* Системы преобразования сигналов для РСДБ // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 34. — С. 3–74.
6. *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, Sweeden / ed. by Haas R., Elgered G. Molndal, Sweeden, 2017. — P. 81–83.
7. *Tuccari G.* DBBC3. A Full Digital Implementation of the VLBI2010 Backend / International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting Proceedings. / ed. by Behrend D., Baver K. D. NASA/CP-2012-217504, 2012. — P. 76–80.
8. *Weinroub J.* Observing to the very edge of a black hole using wideband signal processing. [Online] / URL: https://indico.tlabs.ac.za/event/48/contributions/625/attachments/322/347/hpspsa_weinroubv3.pdf.
9. *Tan G. H., Lehmsiek R., Billadec B., Caputad K., Gauffree S., Theronb I. P., Pantaleev M., Ljusicd Z., Quertiere B., Peens-Houghg A.* An innovative, highly sensitive receiver system for the Square Kilometre Array Mid radio telescope / Proc. of SPIE, Vol. 9906, 990660-1. / ed. by Hall H. J., Gilmozzi R., Marshall H. K. — P. 76–80.

10. 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., Armstrong K. L. — P. 25–33.

11. Безруков И. А., Сальников А. И., Яковлев В. А., Вылегжанин А. В. Система буферизации и передачи данных нового поколения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 3–9.

12. Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В. Системы преобразования сигналов радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. Красноярск: СибГАУ, 2014. — Т. 56, № 4. — С. 81–87.

13. 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.: СПбГЭТУ, 2014. — № 1. — С. 34–40.

14. Vertatschitsch L., Primiani R., Young A., Weintroub J., Crew G. B., McWhirter S. R., Beaudoin C., Doeleman S., Blackburn L. R2DBE: A Wideband Digital Backend for the Event Horizon Telescope // 2015. — Vol. 127. — P. 1226.

15. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание / Москва: Бином-Пресс, 2006. 656 с.

16. Роев А. А., Чернов В. К. Сверхширокополосный облучатель радиотелескопа глобальной сети VGOS // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 59–64.

17. Вытнов А. В., Иванов Д. В., Жуков Е. Т., Смоленцев С. Г., Яковлев В. А. Система частотно-временной синхронизации комплекса «Квазар КВО» // История науки и техники. — 2013. — № 3. — С. 84–90.

New Generation Sampling Backend for Radio Telescopes

E. V. Nosov, L. V. Fedotov

State of the art analog-to-digital converters (ADC) allow for direct sampling of radio signals without mixers and local oscillators. It gives an opportunity to replace most of the analog equipment in a signal chain of radio telescopes by a compact digital backend. Digital signal processing (DSP) reduces losses of sensitivity in radio interferometers which is a significant advantage over the analog equipment. The paper presents a project of the Direct Sampling Backend for radio telescopes of the “Quasar” VLBI network.

Keywords: ADC, DSP, digital backend, field programmable gate array (FPGA), radio astronomy, very long baseline interferometry (VLBI).