

# Компоненты Analog Devices

для построения радиотрактов  
с помощью технологии SDR

**В современных средствах мобильной и специальных видов связи широко используется цифровая обработка сигналов как при передаче, так и при приеме радиосигналов. В статье рассматриваются способы построения радиотрактов с помощью технологии SDR. Приведена краткая информация о микросхемах Analog Devices с высокой степенью интеграции, позволяющих реализовать устройство для систем SDR на одной ИМС.**

**Владимир Макаренко, к. т. н.**  
Email: v.makarenko@vdm.ais.ua

**П**рограммно-определяемые радиосистемы (Software-defined radio — SDR) используют технологию, при неизменной конфигурации оборудования позволяющую с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие характеристики системы связи, включая диапазон рабочих частот, тип модуляции, методы кодирования информации и другие параметры.

Технология SDR способна заменить огромный спектр существующих и разрабатываемых конструкций радиоприемников и трансиверов на несколько унифицированных. Такие устройства могут поддерживать любые действующие и вновь создаваемые виды модуляции и методы кодирования, многие сервисные функции.

Но это не единственная причина необходимости развития данных систем. Немаловажным является и то, что в настоящее время практически весь частотный диапазон распределен и лицензирован, однако при этом эксплуатируется недостаточно эффективно. Существенным образом повысить коэффициент применения спектра позволяет механизм динамического управления, согласно которому вторичным пользователям, не закрепленным за данным частотным диапазоном, предоставляется возможность передавать сообщения в диапазоне первичных пользователей в то время, пока он не занят штатной работой передающих устройств. Подобный механизм динамического управления спектром, называемый когнитивным радио, весьма сложен технически и может применяться только в так называемых интеллектуальных радиосистемах [1].

Кроме того, применение новых видов модуляции и цифровой обработки сигналов

позволяет значительно улучшить параметры канала связи без расширения полосы частот. Например, системы аналогового радиовещания, которые существуют сегодня, уже давно исчерпали свои возможности. Необходимость перехода от аналогового радиовещания к цифровому обусловлена нарастающим процессом объединения средств вещания, связи, информационных служб и компьютерных систем в единую интерактивную сеть, что стало возможным благодаря прогрессу в области цифровых технологий. Эти интеграционные процессы обуславливают все возрастающий интерес к проблемам повышения эффективности использования радиочастотного спектра (РЧС) и улучшения качества и количества услуг в системах связи.

Приведем еще несколько факторов, влияющих на данный процесс. Первый из них — требование к качеству передачи, что связано с широким распространением высококачественных мультимедийных систем, домашних кинотеатров, портативных плееров и мобильных телефонов, поддерживающих мультимедийные функции, и, как следствие, возникновение потребности в высококачественном звучании. Второй фактор — необходимость сохранения высокого качества в условиях мобильного приема (на подвижных объектах). Третий фактор — все возрастающая потребность в передаче по вещательным радиоканалам вспомогательной информации. Например, прогноза погоды, информации о состоянии дорог, пробках на дорогах, программ передач и т. п., что примерно соответствует системе RDS (Radio Data System) в аналоговом вещании в УКВ-диапазоне или системе «Телетекст» на телевидении.

В рамках существующих аналоговых систем эфирного радиовещания реализовать это нельзя. И если высокое качество вещания в УКВ-диапазоне в крупных городах и вблизи них еще удастся обеспечить, то в удаленных местах это становится невозможным (зона уверенного приема не превышает 50 км от передатчика). Учитывая, что в диапазоне коротких и средних волн сигналы распространяются на гораздо большие расстояния, чем в УКВ-диапазоне, возникает задача обеспечения высокого качества в таких диапазонах, что особенно актуально для автомобилистов. Система радиовещания с амплитудной модуляцией (АМ) охватывает большую территорию, но весьма чувствительна к действию атмосферных и промышленных помех и состоянию тропосферы. Кроме того, коэффициент полезного действия АМ-передатчиков не высок и достигает в среднем 4%. Львиная доля мощности тратится на излучение несущей частоты.

Выделенные для радиовещания диапазоны катастрофически «перенаселены». Шаг сетки частот составляет в Европе 9 кГц (ДВ и СВ), в США — 10 кГц (СВ). Это дает немного более 100 частотных каналов с полосой вещания  $2 \times 4,5$  кГц. На коротковолновых диапазонах шаг сетки частот всего 5 кГц, что уже меньше необходимой полосы частот для качественной передачи АМ-сигналов. С учетом дальнего прохождения радиоволн на КВ уровень помех возрастает, и качество вещания становится весьма плохим. Это и вызывает необходимость использования цифровых технологий для улучшения качества вещания, что, в свою очередь, невозможно без применения технологии SDR.

В основе современных радиоприемных устройств лежат две схемы: супергетеродинная (с однократным или многократным преобразованием частоты) и прямого преобразования. Синтез сигналов, передаваемых в эфир, также осуществляется двумя методами: формированием передаваемого сигнала на низкой частоте с последующим переносом в область радиочастот и формированием

передаваемого сообщения непосредственно на высокой частоте.

На рис. 1 показана функциональная схема приемопередающего тракта с помощью повышающих (в передающем тракте) и понижающих (в приемном тракте) преобразователей частоты. Приемный тракт построен по супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты.

Сигнал с выхода антенны через диплексер и полосовой фильтр ПФ1 поступает на малошумящий усилитель высокой частоты (УВЧ), характеристики которого во многом определяют отношение сигнал/шум на выходе приемника. С выхода УВЧ сигнал поступает на один из входов первого преобразователя частоты — смесителя (СМ1). На второй вход СМ1 подается сигнал несущей, формируемый блоком синтезаторов частоты. Через фильтр и усилитель промежуточной частоты (ФПЧ и УПЧ) сигнал разностной частоты, формируемый на выходе СМ1, поступает на вход АЦП. Коэффициент усиления УПЧ определяется напряжением или кодом (в зависимости от типа используемых ИМС) на выходе управления системой АРУ (автоматической регулировки усиления), формируемым на выходе цифрового сигнального процессора (ЦСП). Выходной сигнал УПЧ через аналого-цифровой преобразователь АЦП1 вводится в ЦСП, где и осуществляется основная обработка сигнала: дополнительная фильтрация, демодуляция, усиление сигнала и управление частотой синтезатора. Усилитель, АЦП1 и ЦСП образуют контур АРУ, необходимый для стабилизации амплитуды принимаемых сигналов на выходе тракта ПЧ, что позволяет использовать всю шкалу АЦП и обеспечить максимальное отношение сигнал/шум. Демодулированный в ЦСП сигнал через цифро-аналоговый преобразователь ЦАП1 поступает на выход приемника. Такой приемник выполняет цифровую обработку сигналов в тракте промежуточной частоты. Модификацией приемника является схема с неперестраиваемым входным фильтром (широкополосным преселектором), полоса

пропускания которого охватывает весь диапазон принимаемых сигналов.

В передающей части приемопередатчика модулированный сигнал переносится в область высоких частот с помощью второго смесителя сигналов (СМ2), а ЦСП выполняет функции формирования модулированного сигнала, управления частотой несущего колебания и контроля выходной мощности передатчика. Модулирующий сигнал через АЦП2 вводится в ЦСП, в котором осуществляется модуляция сигнала на низкой частоте. Модулированный сигнал через СМ2 и ФНЧ поступает на первый вход СМ2, а на второй его вход подается сигнал несущей частоты передатчика. Полосовой фильтр (ПФ) выделяет нужную боковую полосу частот, и ВЧ-сигнал через усилитель мощности (УМ) и диплексер передается в антенну. Контроль излучаемой мощности ведется с помощью детектора мощности, формирующего на выходе напряжение, пропорциональное среднеквадратическому значению мощности на выходе УМ. Это напряжение посредством АЦП3 вводится в цифровой сигнальный процессор, который и управляет коэффициентом усиления УМ.

В схемах с двойным (реже с тройным или более) преобразованием частоты добавляются еще один смеситель, фильтр и усилитель промежуточной частоты. Достоинствами супергетеродинных приемников являются высокая чувствительность (основное усиление сигнала в приемнике производится в сравнительно узкополосном УПЧ) и высокая избирательность, определяемая характеристиками ФПЧ. К недостаткам можно отнести наличие помехи по зеркальному каналу, существенного ослабления которой можно добиться при повышении промежуточной частоты. В приемниках с многократным преобразованием это первая ПЧ. Перечисленные факторы обеспечивают широкое распространение супергетеродинных приемников.

На рис. 2 приведена схема приемопередатчика с прямым преобразованием частоты в приемном тракте (приемник прямого пре-

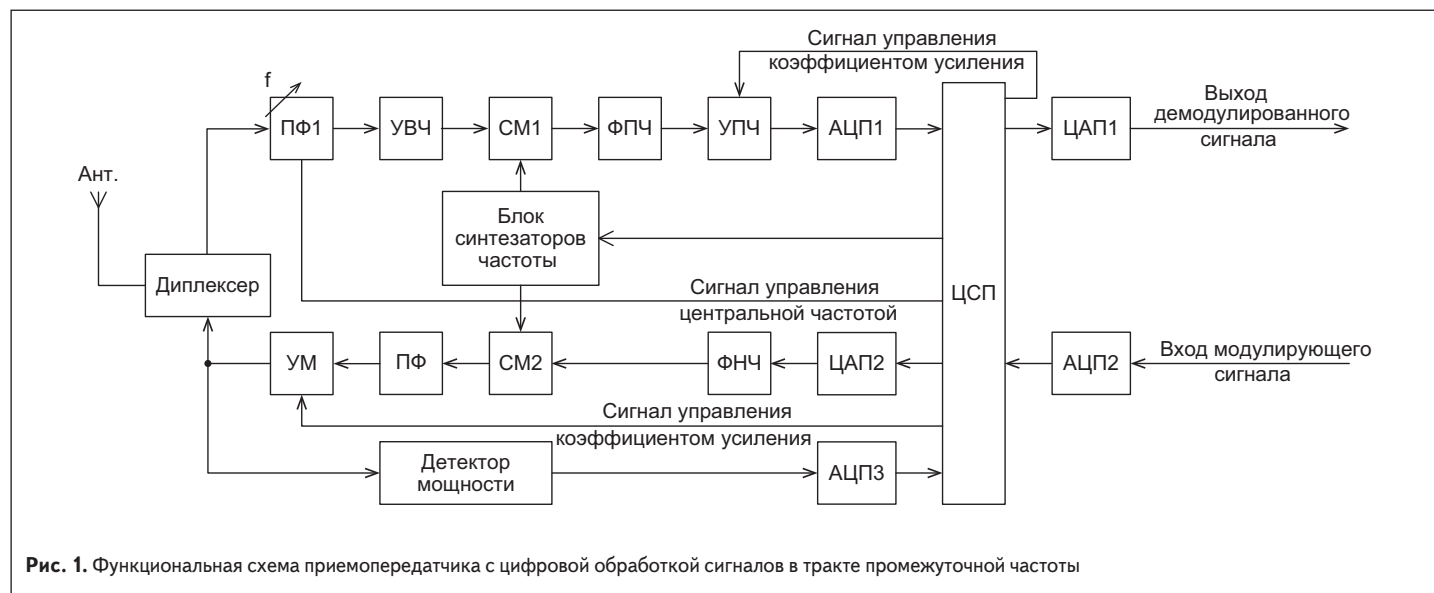
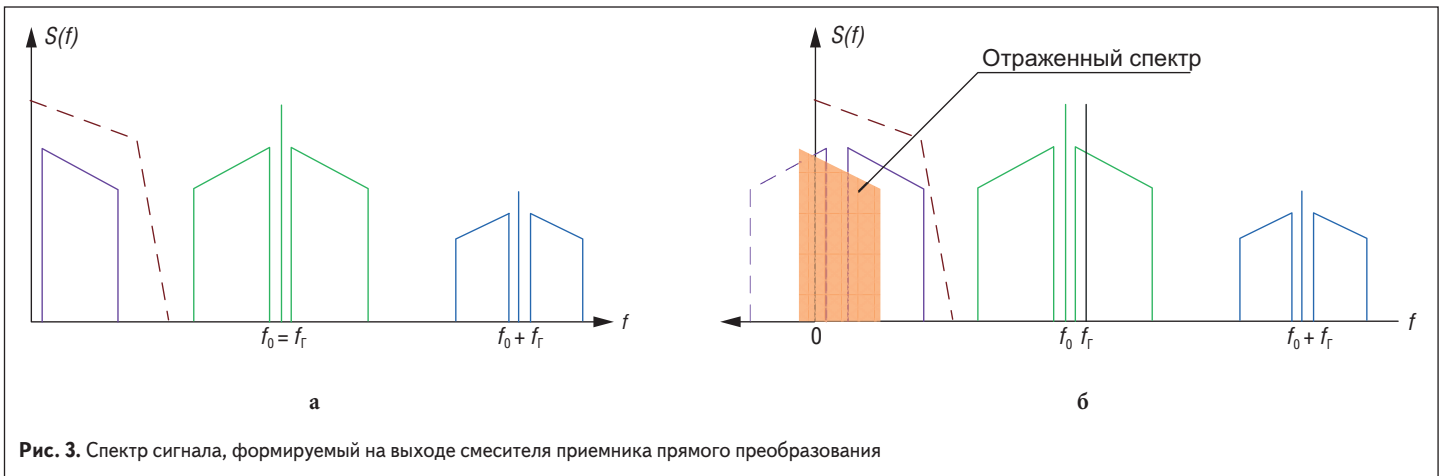
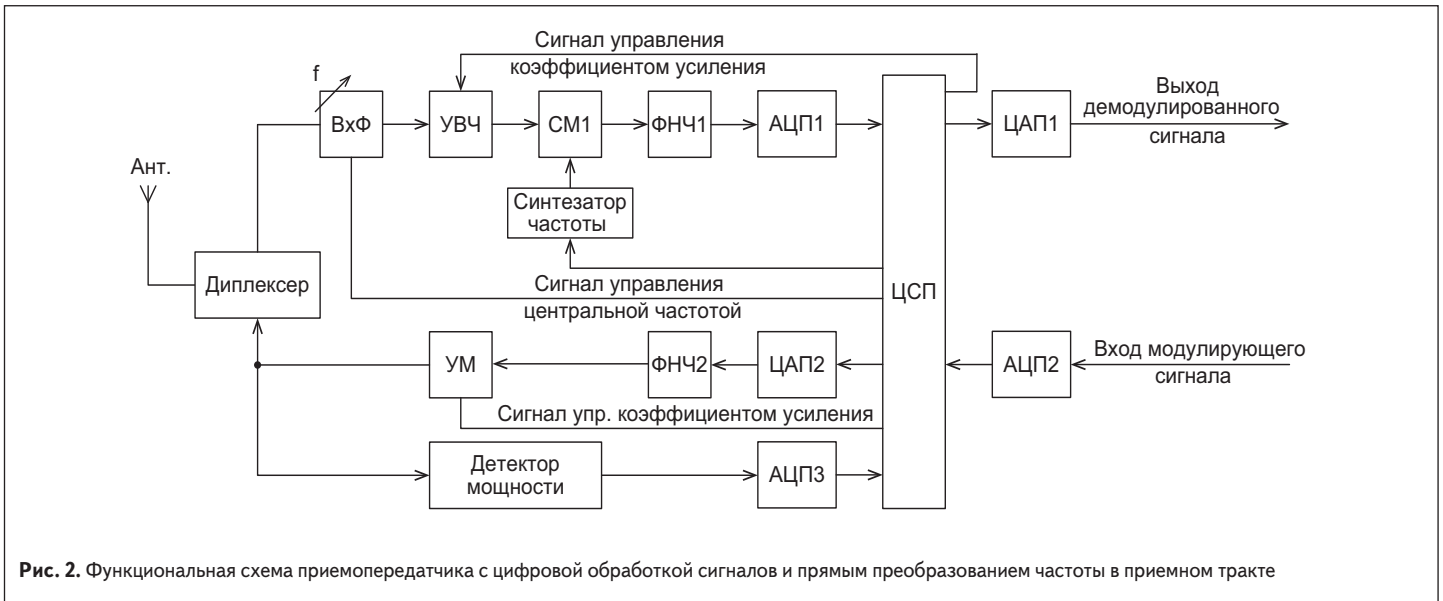


Рис. 1. Функциональная схема приемопередатчика с цифровой обработкой сигналов в тракте промежуточной частоты



образования) и формированием ВЧ-сигнала с помощью ЦСП в передающем тракте.

Как следует из рис. 2, в приемном тракте отсутствуют ФПЧ и УПЧ. При равенстве несущей частоты  $f_0$  принимаемого сигнала и частоты сигнала синтезатора  $f_r$  на выходе смесителя СМ1 формируется сигнал в низкочастотной области спектра, как показано на рис. 3а. Но если равенство  $f_0 = f_r$  будет нарушено, то в спектре появятся спектральные составляющие, отраженные от начала координат (рис. 3б). Это приводит к тому, что прием становится практически невоз-

можным. В лучшем случае сигнал на выходе СМ1 будет подвержен амплитудной модуляции с частотой, равной разности частот гетеродина и входного сигнала.

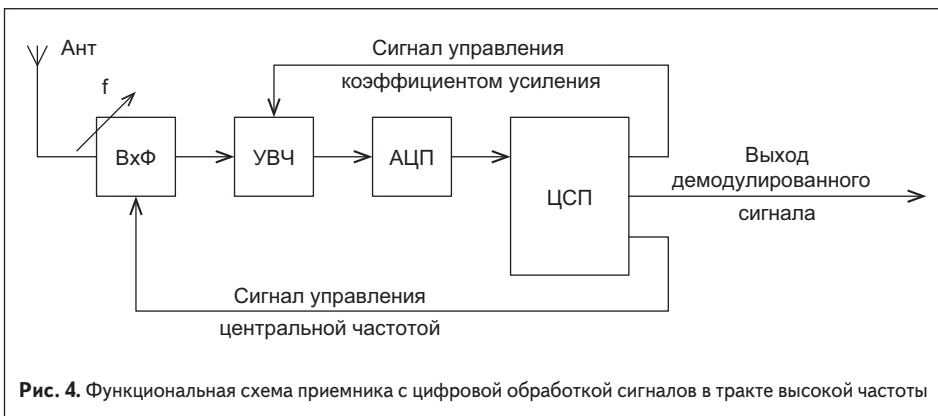
В передающей части высокочастотный модулированный сигнал формируется на выходе ЦСП и через ЦАП2, ФНЧ2 и УМ поступает на выход. В остальной схеме на рис. 1 и 2 различаются незначительно.

Самая простая функциональная схема соответствует приемнику с цифровой обработкой сигнала в тракте высокой частоты (рис. 4).

В таком приемнике принятый антенной сигнал усиливается и поступает на вход АЦП, с выхода которого он и вводится в цифровой сигнальный процессор. Однако из всех рассмотренных схем для ее реализации требуется самый быстродействующий АЦП. Самое низкое быстродействие АЦП необходимо при использовании приемника прямого преобразования.

Компания Analog Devices выпускает компоненты, позволяющие организовать любую из рассмотренных функциональных схем на дискретных компонентах. Но наиболее привлекательными для использования в системах SDR являются ИМС, содержащие как аналоговые, так и цифровые компоненты для реализации таких систем. В 2018 году компания Analog Devices выпустила книгу [2], посвященную построению систем с помощью технологии SDR.

Сочетание цифровой обработки и аналоговой высокочастотной схемы в одной ИМС приемника позволяет значительно сократить расходы на требуемое оборудование и упростить реализацию системы SDR. Примером такой ИМС является ИМС ADF7030, чья структурная схема приведена на рис. 5. Это высокопроизводительный интегрированный трансивер с малой потребляемой мощностью,



поддерживающий работу в узких полосах частот ISM в диапазоне 169,4–169,6 МГц. Он обеспечивает передачу и прием со скоростями 2,4 и 4,8 кбит/с с использованием 2GFSK-модуляции и передачи со скоростью 6,4 кбит/с с использованием модуляции 4GFSK. В ИМС встроен процессор ARM Cortex-M0, который выполняет управление обработкой сигналов и формированием пакетов, а также калибровку внутренних узлов ИМС.

Микросхема содержит малошумящий усилитель (LNA), два усилителя мощности (PA), встроенный синтезатор частоты, аналоговые части приемного и передающего трактов и блок цифровой обработки [3].

Другим примером интеграции на одном кристалле аналоговой и цифровой части служит ИМС AD9361 [4], функциональная схема которой приведена на рис. 6.

ИМС содержит два приемника прямой преобразования с квадратурной обработкой сигналов, два передатчика с квадратурной обработкой сигналов, 12-разрядные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, блоки цифровой обработки сигналов в каждом из каналов приема и передачи. В приемниках предусмотрено два режима работы системы АРУ — автоматический и аналоговый с различными постоянными

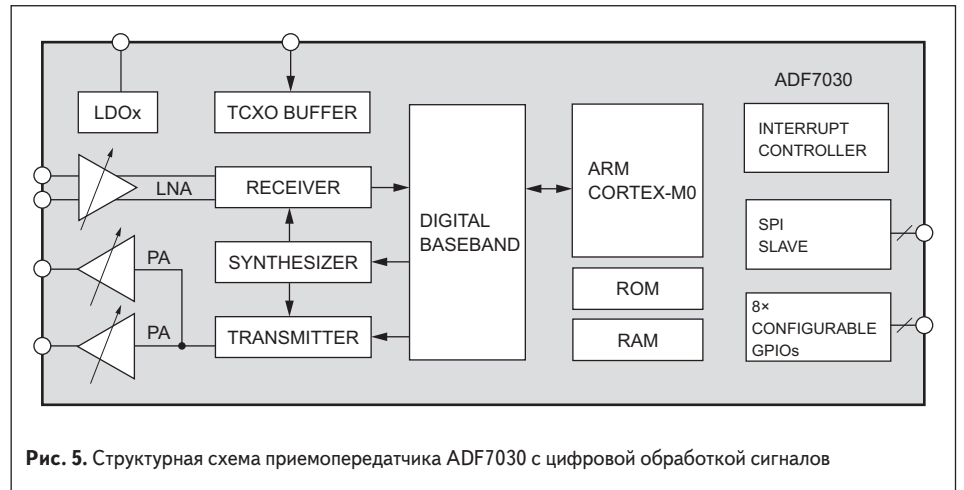


Рис. 5. Структурная схема приемопередатчика ADF7030 с цифровой обработкой сигналов

времени срабатывания. Встроенный датчик температуры и система коррекции позволяют поддерживать необходимые параметры аналоговой части ИМС в широком температурном диапазоне.

Передатчики AD9361 предназначены для работы в диапазоне 47 МГц...6 ГГц, а приемники — на частотах 70 МГц...6 ГГц. Встроенный синтезатор с дробными коэффициентами деления обеспечивает перестройку частоты с дискретностью 2,4 Гц. Полоса пропускания

каждого из каналов может программироваться в диапазоне 0,2–56 МГц.

ИМС может быть использована для применения в устройствах GSM, LTE, WiMax. В зависимости от ширины полосы канала связи и приложения, в котором используется приемопередатчик AD9361, ток потребления способен изменяться в широком диапазоне значений [4]. В спящем режиме суммарный ток потребления от всех источников питания не превышает 280 мкА. Аналогичными

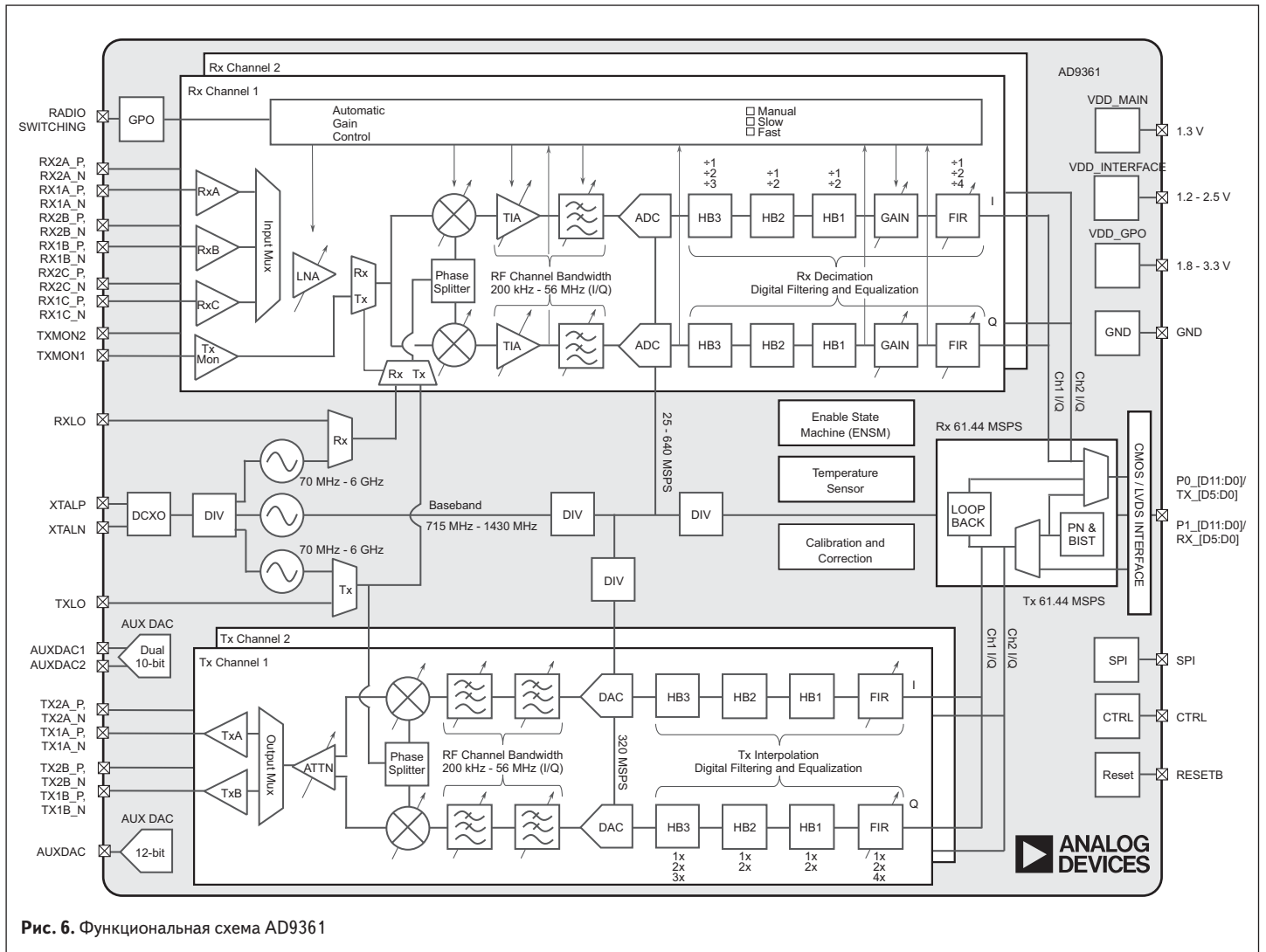


Рис. 6. Функциональная схема AD9361



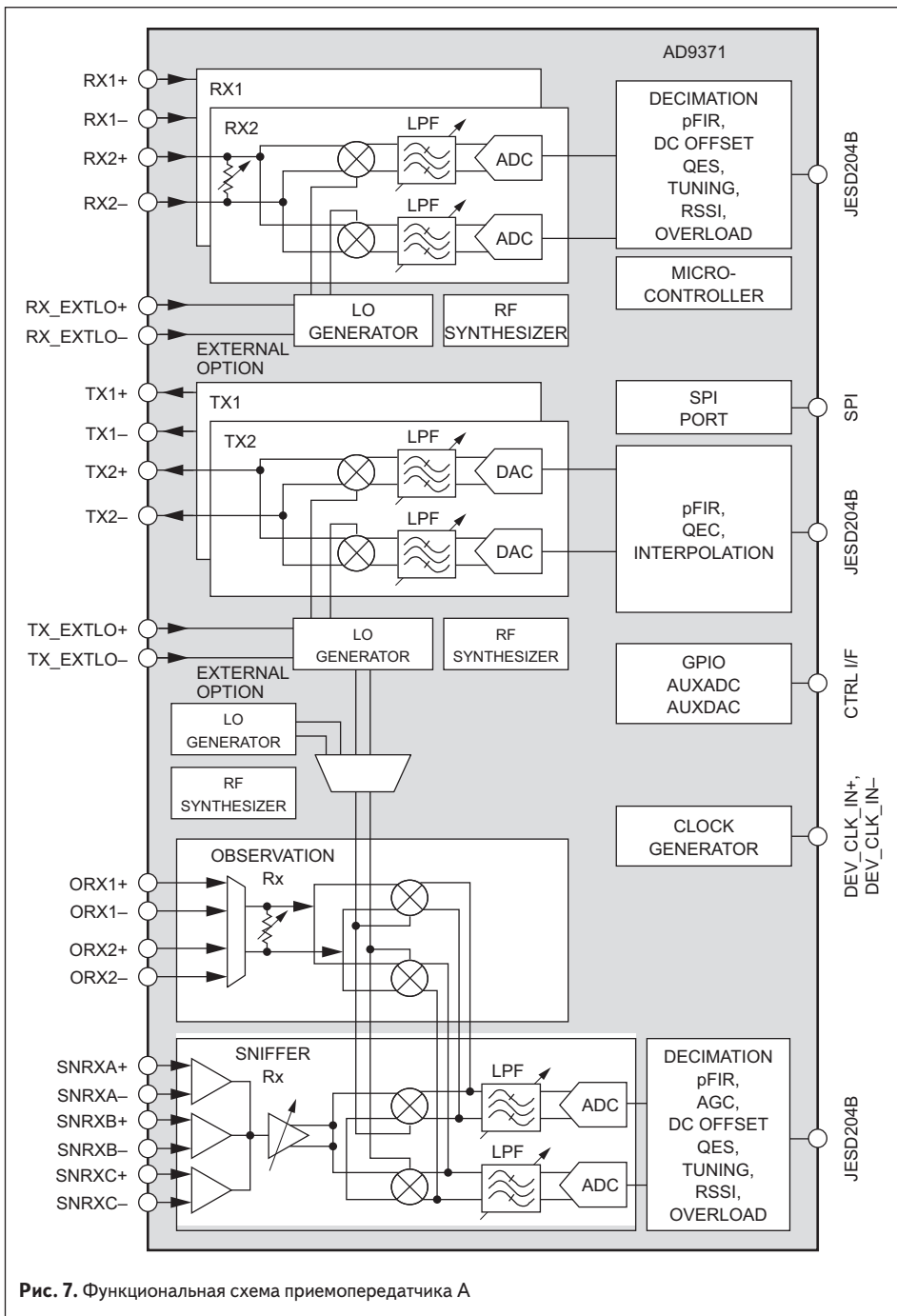


Рис. 7. Функциональная схема приемопередатчика A



Рис. 8. ADALMPLUTO — модуль активного обучения SDR

параметрами обладает и одноканальный приемопередатчик AD9364.

ИМС применяются в системах связи с БПЛА, портативных радиостанциях и других приложениях, где определяющими факторами становятся малые габариты и низкое энергопотребление.

Для более высокопроизводительных приложений со средней потребляемой мощностью предназначена ИМС AD9371 [5], содержащая двоянный приемопередатчик с дифференциальными входами, измерительный приемник (Sniffer receiver) и приемник наблюдения (Observation receiver). Функциональная схема приемопередатчика AD9371 приведена на рис. 7.

Приемопередатчик построен по схеме прямого преобразования частоты и обеспечивает:

- настраиваемый диапазон частот 300–6000 МГц;
- ширину полосы пропускания передатчика в режиме широкой полосы (BW) до 250 МГц, приемника — 8–100 МГц;
- поддержку дуплексного режима работы с разделением по частоте (FDD) и по времени (TDD).

ИМС содержит полностью интегрированные, независимые для каждого приемника и передатчика высокочастотные синтезаторы с дробным коэффициентом деления. Для связи с внешними устройствами предусмотрен высокоскоростной интерфейс JESD204B. Встроенный цифровой процессор обеспечивает обработку сигналов передатчиков и приемников, цифровую фильтрацию, контроль и калибровку параметров аналоговых узлов ИМС, управление синтезаторами частоты.

Основное назначение ИМС: микро- и макробазовые станции мобильной связи 3G/4G-, 3G/4G-пикосотовые системы с несколькими несущими, FDD и TDD активные антенные системы, широкополосные системы с обратной связью.

На базе ИМС AD9363 компания Analog Devices выпускает ADALM-PLUTO — модуль активного обучения SDR (рис. 8).

Основные характеристики модуля:

- эффективная платформа для экспериментов с SDR;
- диапазон рабочих частот: 325 МГц... 3,8 ГГц;
- 12-разрядные АЦП и ЦАП;
- один передатчик и один приемник;
- полудуплексный или дуплексный режим работы;
- поддержка MATLAB и Simulink;
- Libiiio, C, C++, C# и Python API;
- интерфейс USB 2.0;
- пластиковый корпус;
- питание через USB;
- полоса пропускания до 20 МГц.

Более полную информацию о высокоинтегрированных компонентах для систем SDR можно получить в [3–6] или на сайте компании Analog Devices. ■

## Литература

1. Николашин Ю. Л., Кулешов И. А., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. SDR-радиоустройства и когнитивная радиосвязь в декаметровом диапазоне частот // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. № 1.
2. Collins T. F., Getz R., Pu D., Wyglinski A. M. Software-Defined Radio for Engineers [www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf](http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf)
3. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7030.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7030.pdf)
4. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9361.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9361.pdf)
5. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9371.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9371.pdf)
6. [www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-highlight/ADALM-PLUTO-Product-Highlight.pdf](http://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-highlight/ADALM-PLUTO-Product-Highlight.pdf)