

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКИ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЮ RADIOVERSE

В статье рассматриваются микросхемы широкополосных приемопередатчиков компании Analog Devices, ориентированные на применение в беспроводных мобильных сетях 3G/4G/5G.

В. Охрименко

RADIOVERSE: HIGHLY INTEGRATED RF IC TRANSCEIVERS

Abstract – This article introduced highly integrated radio frequency (RF) transceivers for 3G/4G/5G macro cell.

V. Okhrimenko

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие систем беспроводной связи рождает спрос на многодиапазонные и мультистандартные радио приемопередатчики (трансиверы). Тенденция создания портативных мобильных устройств с низким уровнем энергопотребления требует применения конфигурируемых решений как в блоках цифровой обработки сигналов, так и в аналоговых каскадах радиоприемников. Современные высокопроизводительные цифровые сигнальные процессоры (DSP) и интегральные микросхемы программируемой логики (Field Programmable Gate Array – FPGA) обладают достаточной производительностью для реализации цифровых методов обработки широкополосных сигналов одновременно по нескольким параллельным каналам. Применение конфигурируемых компонентов (АЦП, ЦАП, радио трансиверов и пр.) в трактах современных радиоприемников позволяет существенно облегчить и ускорить процесс разработки устройств беспроводной связи [1-12].

Компоненты для реализации конфигурируемых высокочастотных радио-трактов выпускаются рядом компаний. Это, например, компания Lime Microsystems (LMS6002D, LMS7002M, LMS8001+, LMS9000), Maxim Integrated, Inc. (MAX2580) и др. К таким компонентам относятся также выпускаемые компанией Analog Devices микросхемы трех семейств широкополосных радиочастотных трансиверов. Это поддерживающие технологию RadioVerse трансиверы AD9361, AD9363, AD9364, AD9371, AD9375, ADRV9008 и ADRV9009, ориентированные, в первую очередь, на применение в высокоэффективных радиосистемах мобильной связи, в которых необходимо обеспечить высокое качество радиосигнала в широком диапазоне частот при низком уровне энергопотребления и стоимости [1-6].

Это, главным образом, базовые станции для

беспроводных сетей 4G и 5G с использованием многоэлементных антенн (рис. 1), получивших название Massive MIMO (Multiple Input, Multiple Output), а также радиосистемы типа SDR (Software Defined Radio – программно-определяемые радиосистемы).

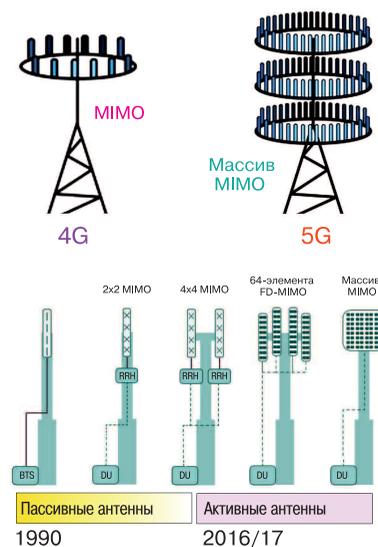


Рис. 1. Эволюция технологии беспроводной связи

В сравнении с системами MIMO типа 2×2 MIMO, 4×4 MIMO, 8×8 MIMO, широко используемыми в настоящее время в сетях 3G и 4G, особенностью Massive MIMO (M-MIMO) является использование многоэлементных цифровых антенных решеток с количеством антенн 128, 256 и более (рис. 1).

Технология MIMO обеспечивает значительный прирост скорости передачи данных. В зависимости от конфигурации оборудования и количества используемых антенн можно получить увеличение скорости от двух до восьми раз. Обычно в беспроводных сетях используется одинаковое число передающих и принимающих антенн, обозначаемых как 2×2 MIMO, 4×4 MIMO и т.д. (например, 2×2 MIMO означает наличие двух передающих и принимающих антенн). Использование нескольких антенн и соот-

ветствующих алгоритмов обработки потоков данных позволяют в радиоканале с полосой пропускания 20 МГц увеличить скорость передачи с 860 Мбит/с (Wi-Fi 802.11ac) до примерно 7 Гбит/с в конфигурации 8x8 MIMO. Суть технологии MIMO заключается в распараллеливании потока данных и передачи их по нескольким каналам с использованием, соответственно, нескольких антенн как на стороне передачи, так и приема. При этом алгоритмы кодирования и восстановления данных позволяют "реконструировать информацию" даже при наличии "потерянных" символов на стороне абонента.

Для реализации концепции Massive MIMO (рис. 2) [6] предполагается использование многоэлементных фазированных антенных решеток. При этом, отдельные элементы решетки могут обслуживать одновременно совершенно разных абонентов, находящихся в пределах углов обзора антенны. Для систем беспроводного широкополосного доступа, многоэлементных MIMO-систем, а также радио систем с возможностью формирования необходимой диаграммы направленности разработаны методы существенного увеличения пропускной способности при эффективном использовании радиочастотного спектра в случае применения интегрированных приемопередатчиков с возможностью конфигурирования. Massive MIMO – это, по сути, технология, в которой количество пользовательских терминалов меньше, чем количество антенн базовой станции.

SDR-системы – радиосистемы, в которых часть

или все функции (перестройка частоты несущей, переключение вида модуляции, изменение выходной мощности и т.п.) реализуются с помощью программных средств и могут сравнительно просто быть модифицированы. Основное отличие между традиционными радиосистемами и SDR-системами – то, что в первых все функции реализуются на аппаратном уровне, следовательно, любые изменения в случае необходимости могут быть произведены только за счет изменения параметров физических компонентов, входящих в устройство. Это также приводит к ограниченности системы при необходимости реализации нескольких стандартных протоколов связи и, кроме того, значительно увеличивает стоимость изделия. В SDR-системах все необходимые изменения осуществляются только на программном уровне, что позволяет значительно снизить стоимость изделия и расширить его функциональные возможности.

Термин SDR не следует путать с термином SRD (Short Range Device), который применим к радиоустройствам малого радиуса действия, содержащим радиопередатчик или радиоприемник, которые применяются в системах сигнализации, дистанционного управления и пр. для обмена сигналами и данными с использованием любого вида модуляции. Для SRD-систем выделены следующие частотные диапазоны: 13.56, 40, 433, 868/915 МГц, а также 2.4 и 5.8 ГГц. Яркие представители трансиверов, ориентированных на применение в SRD-системах – это, например, ADF7020/23 компании Analog

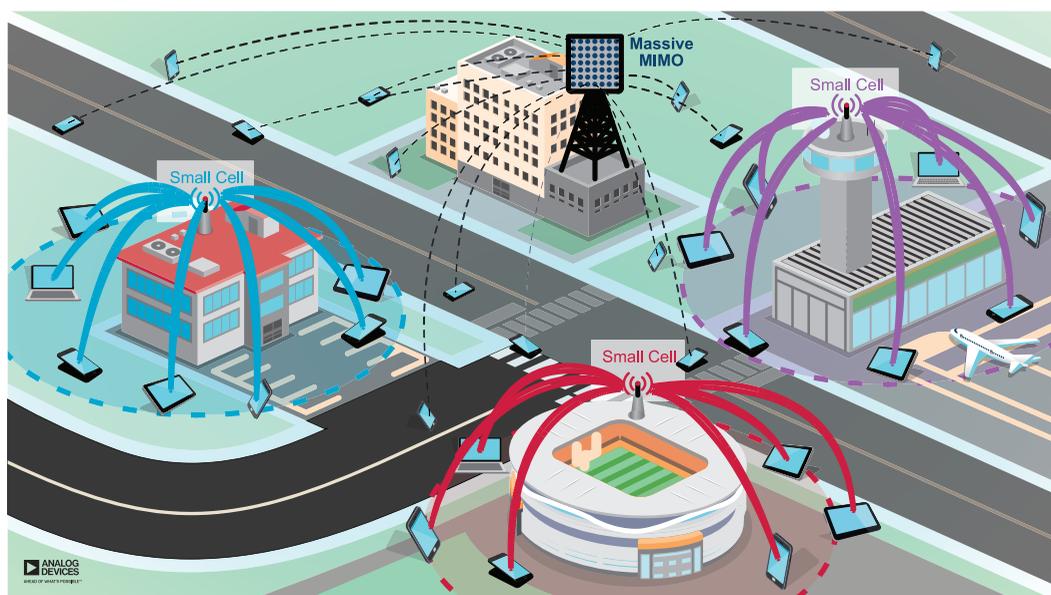


Рис. 2. Вариант реализации концепции Massive MIMO

Devices.

На рис. 3 приведен вариант простейшей структуры устройства обработки и передачи видеоизображения по радиоканалу. Чтобы в полной мере оценить возможности рассматриваемых широкополосных приемопередатчиков (AD9361/3/4, AD9371/5, ADRV9008/9), в табл. 1 приведена необходимая скорость передачи данных для формирования изображений разного формата, а в табл. 2 – занимаемая полоса частот в зависимости от используемого вида модуляции [1].

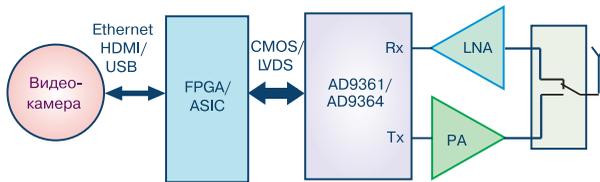


Рис. 3. Вариант простейшей структуры устройства обработки и передачи видеоизображения по радиоканалу

ТРАНСИВЕРЫ КОМПАНИИ ANALOG DEVICES

Микросхемы широкополосных приемопередатчиков AD9361/3/4, AD9371/5, ADRV9008/9 – это си-

стемы на кристалле (System-on-Chip – SoC) с высокой степенью интеграции, изготовленные в малогабаритных корпусах размерами всего 10×10 или 12×12 мм, которые способны заменить десятки высококачественных дискретных компонентов в радиосистемах, созданных с использованием традиционных технологий обработки радиосигналов.

Высокая степень интеграции, которая лежит в основе высоких технических характеристик приемопередатчиков, позволяет за счет использования всего одной системы на кристалле заменить до 20 высококачественных дискретных высокочастотных радиокомпонентов и вместе с тем обеспечить простой и надежный интерфейс с внешними устройствами.

Используемый метод прямого преобразования частоты, высокая линейность передатчика, автоматическая калибровка и другие возможности позволяют реализовать высокие технические характеристики и гарантировать высокую надежность при эксплуатации в жестких условиях окружающей среды.

Рассматриваемые трансиверы компании Analog Devices – высокоинтегрированные конфигурируемые радиочастотные приемопередатчики, содержащие входные и выходные каскады с программ-

Таблица 1. Скорость передачи данных при формировании видеоизображения разного формата

Тип	Формат	Число пикселей	Скорость передачи данных, Мбит/с	Скорость передачи данных с компрессией (200/1), Мбит/с
VGA	640×480	307200	442	2.2
720p	1280×720	921600	1328	6.64
1080p	1920×1080	2073600	2986	14.93
2k	2048×1152	2359296	3400	17.0
4k	4096×2160	8847360	12740	63.7

Таблица 2. Полоса частот в зависимости от используемого вида модуляции

Тип	Полоса частот, МГц			Скорость передачи данных с компрессией, Мбит/с
	QPSK	16QAM	64QAM	
VGA	1.375	0.6875	0.4583	2.2
720p	4.1250	2.0625	1.3750	6.6
1080p	9.3125	4.6563	3.1042	14.9
2k	10.6250	5.3125	3.5417	17.0
4k	39.8125	19.9063	13.2708	63.7

руемыми усилителями, АЦП, ЦАП, синтезаторы высокочастотных высокоточных тактовых сигналов, перестраиваемые цифровые фильтры, устройства управления и пр., наличие которых позволяет создавать программно-управляемые радиосистемы любой сложности под управлением внешнего процессора, в роли которого, как правило, используется мощный цифровой сигнальный процессор или программируемые логические матрицы типа FPGA.

В приемопередатчиках AD9361/3/4, AD9371/5, ADRV9008/9 в полной мере реализованы принципы концепции SWaP+C (Size, Weight, Power, Cost), продвигаемой ведущими компаниями (Analog Devices, Xilinx, Texas Instruments и др.) по производству интегральных компонентов. Габаритные размеры, масса, мощность и стоимость (Size, Weight, Power, Cost) – наиболее важные характеристики, учитываемые при выборе компонентов для надежных мобильных устройств. Оптимизация параметров ВЧ-компонентов позволяет ускорить их внедрение в высокоэффективные радиосистемы мобильной связи, в том числе аэрокосмические и оборонные системы, и в результате снизить, к примеру, вес солдатского снаряжения или увеличить эффективность использования топлива.

Сравнительно низкая потребляемая мощность дает возможность зачастую отказаться от применения принудительного охлаждения, при этом повышается надежность и уменьшаются эксплуатационные затраты.

В цифровых радиосистемах с использованием метода прямого преобразования частоты необходимо обеспечить высокоскоростной обмен данными между АЦП и ЦАП трансиверов и host-процессором, а также с устройством управления режимами работы. Для реализации высокоэффективных портативных устройств, поддерживающих технологию Massive MIMO, приемопередатчики должны содержать несколько приемных и передающих каналов.

Настройка конфигурируемых пользователем трансиверов (т.е. параметров цифровых и аналоговых блоков обработки сигналов, интерфейса ввода/вывода и пр.) осуществляется с использованием последовательного интерфейса SPI (Serial Peripheral Interface), работающего в трехпроводном или четырехпроводном режимах. В первом случае используется двунаправленная линия ввода/вывода данных, во втором – отдельные линии ввода и вывода данных.

Обмен данными между радиотрансиверами и внешними устройствами осуществляется с приме-

нением высокоскоростных стандартных интерфейсов JESD207 и JESD204B, предложенных Комитетом, специализирующимся в области разработки электронных устройств (Joint Electronic Device Engineering Council – JEDEC). Компания Analog Devices – член JEDEC-комитета.

Стандарт JESD207 (Radio Front End – Baseband Digital Parallel (RBDP) Interface) был опубликован в 2007 году. В стандарте приведены рекомендации по организации параллельного интерфейса для обмена данными между радиочастотными ИМС и host-процессором.

Ввод/вывод цифровых данных осуществляется через двунаправленную шину данных, состоящую из двух параллельных портов (P0 и P1), которые поддерживают работу как с несимметричными сигналами (CMOS), так и с дифференциальными сигналами (LVDS). Предусмотрена возможность конфигурирования портов для реализации разных режимов обмена данными. Основные характеристики интерфейса JESD207 приведены ниже:

- максимальная тактовая частота 90 МГц (что соответствует 180 мега выборкам/с в режиме DDR)
- разрядность шины данных 10 или 12 бит
- максимальная скорость передачи данных 1.8 или 2.2 Гбит/с.

Применение высокоскоростного последовательного интерфейса JESD204B для обмена данными между трансиверами и host-процессором позволяет значительно уменьшить число линий ввода/вывода, особенно в сложных системах типа M-MIMO, и упростить трассировку проводников на печатной плате.

Стандарты последовательного интерфейса для преобразователей данных JESD204/204B/204C (табл. 3) были предложены чтобы сократить количество линий ввода/вывода данных между быстродействующими преобразователями сигналов (АЦП и ЦАП) и другими устройствами, например, FPGA. Меньшее число линий связи упрощает проектирование топологии печатной платы и позволяет значительно уменьшить ее размеры, не оказывая влияния на технические характеристики системы в целом. Это особенно важно для преодоления ограничений на габаритные размеры, массу и стоимость для таких приложений как беспроводные сети связи (GSM, EDGE, W-CDMA, LTE, CDMA2000, WIMAX, TD-SCDMA), радиосистемы типа SDR, портативные измерительные и медицинские приборы ультразвуковой диагностики, радиолокационные системы и пр.

Рассматриваемые в статье приемопередатчики

Таблица 3. Максимальные скорости передачи данных, рекомендованные в стандартах JESD204

Стандарт	JESD204	JESD204A	JESD204B
Год выпуска	2006	2008	2011
Максимальная скорость передачи данных, Гбит/с	3.125	3.125	12.5

содержат несколько приемных и передающих каналов. Это основной приемник (Rx), приемник обзора (Observation Receiver – ORx) и сниффер (Sniffer Receiver – SnRx), или другими словами сканер.

Последний реализован только в трансиверах AD9371/75. Как правило, при наличии нескольких входных усилителей сигнал с выхода любого из них может быть подключен к приемному тракту, что позволяет использовать радиотрансиверы в системах с несколькими частотными диапазонами и несколькими антеннами. В аналоговом перемножителе (смесителе) осуществляется перенос частоты входного сигнала в полосу пропускания приемника. Квадратурные составляющие выходного комплексного сигнала смесителя усиливаются и после предварительной фильтрации подаются на вход АЦП.

В приемных каналах реализована система автоматической регулировки усиления (Automatic Gain Control – AGC), предусмотрен также режим изменения коэффициента усиления в ручном режиме. Кроме того, имеются блоки компенсации смещения постоянной составляющей, измерения уровня принимаемого сигнала (Receive Signal Strength Indicator – RSSI) и коррекции рассогласования квадратурных составляющих.

В передающих каналах содержатся все блоки, необходимые для реализации передатчика с прямым преобразованием частоты. Аналоговые квадратурные сигналы с выхода ЦАП фильтруются для подавления побочных спектральных составляющих. Отфильтрованные аналоговые сигналы подаются в смесители для преобразования частоты. Высокочастотный сигнал с выхода смесителей поступает на выходные усилители. Каналы передачи также содержат блоки автоматической калибровки и измерения уровня выходного сигнала.

На рис. 4 приведен вариант типичной структуры устройства обработки и передачи данных по радиоканалу с использованием трансивера ADRV9009.

Предлагаемая компанией Analog Devices технология проектирования RadioVerse представляет собой универсальную платформу, которую можно ис-



Рис. 4. Вариант типичной структуры устройства обработки и передачи данных по радиоканалу с использованием трансивера ADRV9009

пользовать при разработке радиоустройств для широкого спектра приложений, что позволяет снизить стоимость проектирования, сократить сроки разработки, а также затраты на оборудование. Выпускаемые в настоящее время компанией Analog Devices аппаратные решения для приемопередатчиков AD9361/3/4, AD9371/5 и ADRV9008/9 с поддержкой технологии RadioVerse представляют собой различные варианты радиомодулей, которые можно использовать как для оценки возможностей микросхем трансиверов, так и при проектировании прототипов устройств. Для полноценной работы с модулями и оценочными платами предлагается соответствующее программное обеспечение, драйверы устройств и пр. Компания Analog Devices предлагает несколько аппаратных решений с высокой степенью интеграции, выпускаемых в виде аналоговых модулей. Это, например, оценочные комплекты ADRV-DPD1/PCBZ, EVAL-ADRV9009-W/PCBZ (рис. 5) и ADRV9375-N/PCBZ, которые без затруднений подключаются к существующим высокопроизводительным отладочным платформам на базе FPGA, образуя единую полнофункциональную среду проектирования для создания прототипов радиосистем EVAL-ADRV9008/9



Рис. 5. Оценочный комплект ADRV-DPD1/PCBZ

типа SDR.

Разработанный в партнерстве с компанией Benetel Ltd. отладочный модуль ADRV-DPD1/PCBZ габаритными размерами 88×83 мм поддерживает работу с беспроводными системами форматом 2×2 MIMO. Полоса пропускания 20 МГц (LTE), выходная мощность по каждому каналу 250 мВт (24 дБм), по-

требуемая мощность – 10 Вт.

Сегодня на рынке можно найти предложения аппаратных решений и радиомодулей типа FMC (Flexible Manufacturing Cell) разных производителей. Это, например, Epiq Solutions, PanaTeQ и др. Использование этих модулей позволяет проводить анализ возможностей типовых проектов, а также осуществлять разработку прототипов устройств и законченных систем на их базе. Среди них модуль FMC-ZU2RF-A (размерами всего 69×76.5 мм) компании PanaTeQ с использованием трансивера ADRV9009 или модуль Sidekiq X2 компании Epiq Solutions, созданный на базе трансивера AD9371

(рис. 6).

Разработка высокоэффективных радиосистем на основе микросхем AD9361/3/4, AD9371/5, ADRV9008/9 едва ли возможна без использования предлагаемой компанией Analog Devices технологии RadioVerse. На рис. 7 приведен вид рабочих окон программного пакета, поддерживающего технологию RadioVerse, на рис. 8 – вариант структуры комплекса по отладке прототипа устройства с использованием оценочного комплекта Evaluation Kit ZYNQ-7000 ZC706 part number EK-Z7-ZC706 (Xilinx) и ADRV9375-N/PCBZ, реализованного на базе трансиверов AD9371/5.

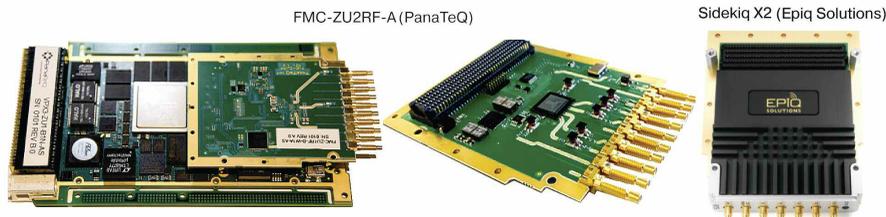


Рис. 6. Модули FMC-ZU2RF-A и Sidekiq X2

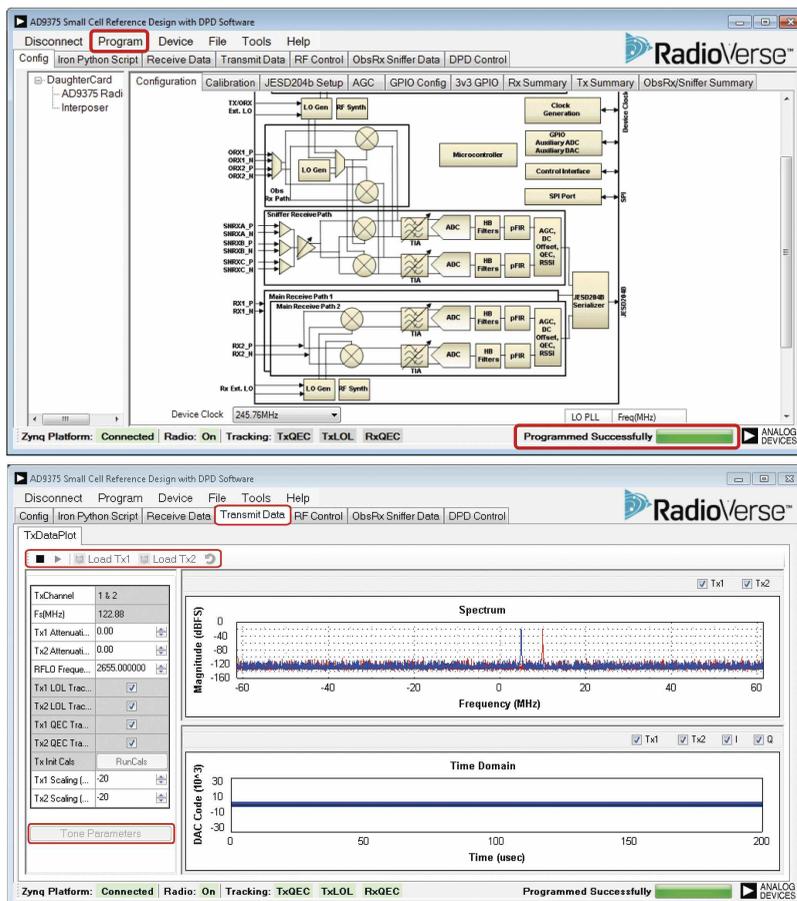


Рис. 7. Вид рабочих окон программного пакета, поддерживающего технологию RadioVerse

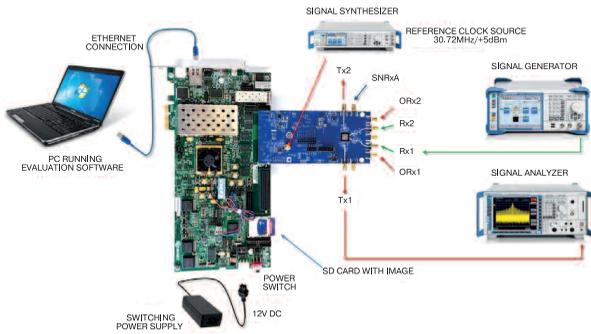


Рис. 8. Вариант структуры комплекса по отладке прототипа устройства с использованием оценочного комплекта ADRV9375-N/PCBZ

Компания Analog Devices постоянно расширяет и совершенствует среду разработки RadioVerse с учетом партнерских отношений с ведущими поставщиками микросхем усилителей мощности, в том числе с компаниями NXP Semiconductors N.V. и Skyworks Solutions, Inc., предоставляя тестовые отчеты для систем, построенных на базе трансивера AD9375 и усилителей разной выходной мощности.

Основные технические параметры широкополосных приемопередатчиков компании Analog Devices приведены в табл. 4. Микросхемы AD9361/63/64, AD9371/75 поддерживают работу как в режиме дуплексной (двусторонней) связи с временным разделением каналов (Time Division Duplex – TDD), так и в режиме дуплексной связи с частотным разделением каналов (Frequency Division Duplex – FDD), и характеризуются малыми значениями (-40 дБ) амплитуды вектора ошибки (Error Vector Magnitude – EVM), а также коэффициента шума (Noise Figure – NF), минимальное значение которого составляет всего 2 дБ.

AD9361

В радиочастотном приемопередатчике AD9361 (рис. 9) реализовано два приемных и передающих канала, содержащие соответственно 12-разрядные Σ - Δ АЦП и 12-разрядные ЦАП. Каждый из двух основных приемников (Rx) содержит 6 дифференциальных входов, каждый передатчик (Tx) – 4 дифференциальных выхода. Приемопередатчик AD9361 ориентирован на работу на несущей частоте от 70 МГц до 6.0 ГГц и полосе пропускания до 56 МГц,

Таблица 4. Основные параметры широкополосных приемопередатчиков

Тип	Частота несущей, МГц	Rx/Tx	Полоса пропускания приемника, МГц	Интерфейсы	Коэффициент шума, (тип.), дБ	Напряжение питания, В	Тип корпуса (размеры, мм)
ADRV9009	75...6000	2/2	0...200	JESD204B, SPI	14	1.3, 1.8, 3.3	196-CSP_BGA (12x12x1.27)
AD9375	300...6000		8...100		12		
AD9371							
AD9364	70...6000	1/1	0.2...56	JESD207 (CMOS/LVDS), SPI	2.5		144-CSP_BGA (10x10x1.7)
AD9363	325...3800	2/2	0.2...20				
AD9361	70...6000		0.2...56				

Продолжение таблицы 4.

Тип	DPD	MIMO/M-MIMO	EVM	NF (тип.), дБ	Подавление зеркального канала, дБ	FDD	TDD	Sniffer (SnRx)	Цена (в партии 1000 шт.), \$
ADRV9009	—	+/+	43	12	75	—	+	—	319
AD9375	+	+/-	40	13	75	+	+	+	325
AD9371					50	+	+	—	130
AD9364	—	—	40	2.5	75	+	+	+	245
AD9363					50	+	+	—	80
AD9361					50	+	+	—	175

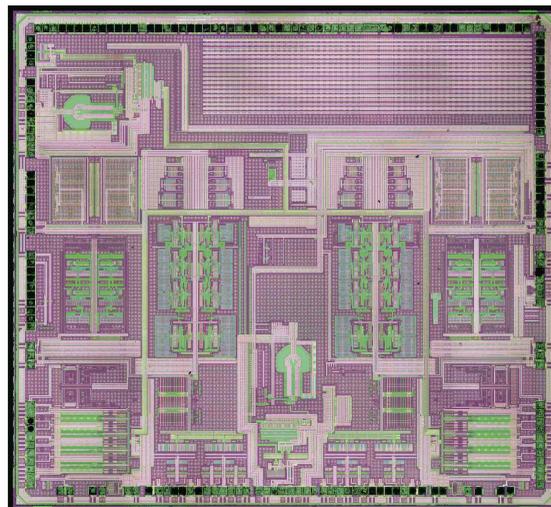
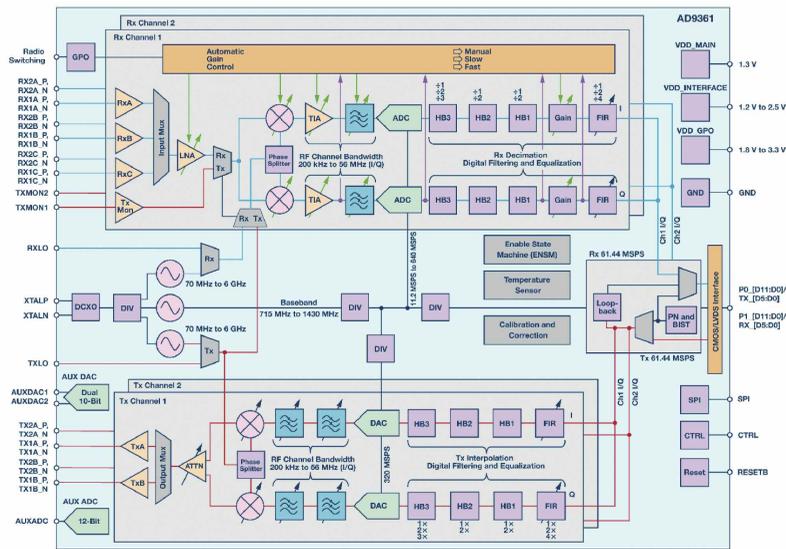


Рис. 9. Структура и топология приемопередатчика AD9361

AD9363 – на несущей частоте 0.325...3.8 ГГц и полосе пропускания до 20 МГц. Встроенный энергоэффективный синтезатор частоты (гетеродин) с дробным коэффициентом деления реализован на базе системы фазовой автоподстройки частоты (Phase-Locked Loop – PLL). Шаг перестройки частоты гетеродина – 2.3 Гц. В микросхеме содержится также вспомогательный 12-разрядный АЦП и два 10-разрядных ЦАП. Типовое значение коэффициента шума приемника – 2 дБ (на частоте 800 МГц), 3 дБ (2.4 ГГц) и 3.8 дБ (3.5 ГГц), что обеспечивает высокую чувствительность приемника. Максимально допустимый уровень пиковой мощности на входе малошумящих усилителей равен 2.5 дБм.

Широкополосный передатчик с улучшенной линейностью характеризуется небольшим значением вектора ошибки (-40 дБ). Уровень шума передатчи-

ка менее -157 дБм/Гц. В трансивере AD9361 обеспечивается также уровень изоляции каналов, необходимый для систем дуплексной передачи с частотным разделением каналов.

Высокоскоростной обмен данными трансиверов AD9361/3/4 с внешними устройствами осуществляется с использованием 12-разрядных параллельных портов (P0 и P1) в соответствии с рекомендациями стандарта JESDC207. Структура параллельного интерфейса с host-процессором приведена на рис. 10. Максимальная частота тактового сигнала 61.44 МГц. Управление режимами работы трансивера осуществляется через SPI-порт.

Типовая потребляемая мощность менее 1.5 Вт. Микросхемы изготавливаются в корпусе 144-CSP_BGA размерами 10×10 мм и предназначены для эксплуатации в диапазоне температур -40...85 °C

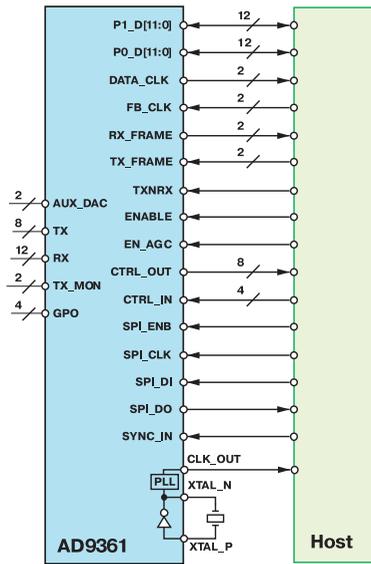


Рис. 10. Структура параллельного интерфейса трансивера AD9361 с host-процессором

при температуре кристалла не выше 110 °С.

AD9375

Радиотрансивер AD9375 (рис. 11) компании Analog Devices признан победителем в номинации “полупроводники” на организованной журналами Microwave Journal, Signal Integrity Journal и Microwave Journal China конференции EDI CON China 2018 (Electronic Design Innovation Conference), состоявшейся на выставке с аналогичным названием. Некоторые параметры трансиверов AD9371/75 даны в табл. 5.

AD9375 – первый широкополосный радиоча-

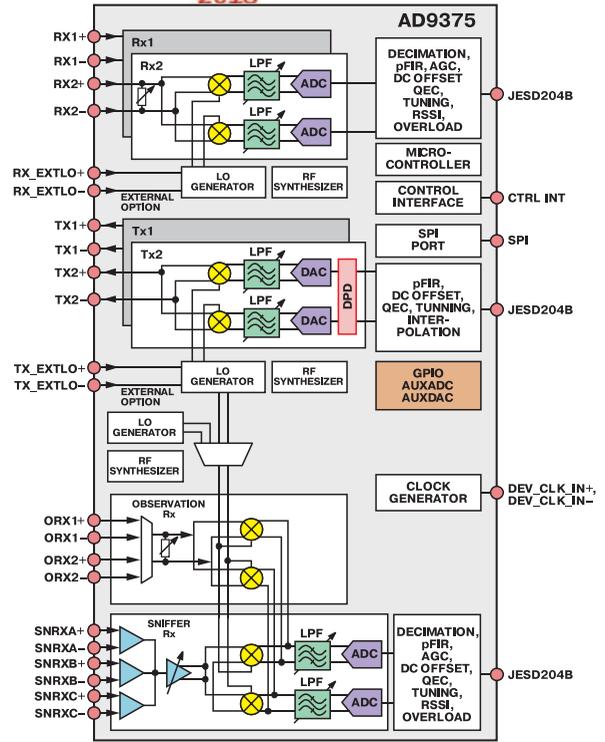


Рис. 11. Структура приемопередатчика AD9375

Таблица 5. Некоторые параметры трансиверов семейства AD936х/7х

Параметр	AD9371	AD9375	AD9361		
Точка пересечения по интермодуляционным составляющим третьего порядка по выходу (OIP3), дБм (на частоте МГц)	27 (700), 27 (2600), 25 (3500), 25 (5500)	27 (700), 27 (2600), 25 (3500), 25 (5500)	23 (800), 19 (2400), 17 (5500)		
Параметр	AD9371		AD9375		AD9361
	Rx	ORx	Rx	ORx	Rx
Точка пересечения по интермодуляции второго порядка по входу (IIP2), дБм (на частоте МГц)	65 (700), 65 (2600), 65 (3500), 57 (5500)	65 (700), 65 (2600), 65 (3500), 60 (5500)	65 (700), 65 (2600), 65 (3500), 57 (5500)	65 (700), 65 (2600), 65 (3500), 60 (5500)	40 (800), 45 (2400), 42 (5500)
Точка пересечения по интермодуляции третьего порядка по входу (IIP3), дБм (на частоте МГц)	22 (700), 22 (2600), 20 (3500), 20 (5500)	22 (700), 22 (2600), 18 (3500), 18 (5500)	22 (700), 22 (2600), 20 (3500), 20 (5500)	22 (700), 22 (2600), 18 (3500), 18 (5500)	18 (800), 14 (2400), 17 (5500)

стотный приемопередатчик для работы в диапазоне частот 0.3...6 ГГц, в котором содержится блок DPD (Digital Predistortion). В этом блоке в соответствии с адаптивным алгоритмом выполняется цифровое предискажение (коррекция) передаваемого сигнала, что позволяет, в конечном счете, повысить эффективность передатчика и значительно снизить суммарный уровень энергопотребления системы.

В сетях, созданных на базе новых стандартов беспроводной связи, можно передавать больше данных в фиксированном диапазоне частот, однако их недостаток – высокая чувствительность к искажениям усилителя мощности базовой станции. Эти искажения ухудшают качество сигнала и снижают трафик. Наличие нелинейных искажений приводит к тому, что увеличение мощности выходного сигнала передатчика приводит не к уменьшению вероятности ошибки при приеме цифрового сигнала, а к ее увеличению.

Для компенсации этого эффекта необходимо ограничивать мощность сигнала или использовать более мощные усилители, чтобы обеспечить надежный прием сигнала в той же зоне. Однако более мощные усилители – это большее энергопотребление, что увеличивает эксплуатационные расходы.

В процессе работы усилителя мощности (Power Amplifier – PA) в нелинейном режиме возникают интермодуляционные искажения, которые проявляются в образовании комбинационных частотных составляющих как в полосе полезного сигнала, так и вблизи нее, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум выходного сигнала усилителя и появлению в спектре излучаемого сигнала паразитных составляющих кратных частоте несущей. В современных радиопередающих устройствах применяются цифровые системы компенсации (коррекции) нелинейных искажений, в которых за счет введения расчетных предварительных искажений передаваемого сигнала обеспечивается линейаризация тракта передачи и, соответственно, снижение искажений.

На рис. 12 приведены передаточные характеристики реального и идеального усилителей мощности. При максимальной энергоэффективности усилителя уровень искажений наибольший. Чтобы добиться большей выходной мощности с меньшими искажениями следует увеличить линейный участок передаточной характеристики.

Суть DPD-метода заключается в коррекции сигнала на входе усилителя мощности, выполняемой на основе данных, полученных в результате измерения характеристик входного и выходного сигналов.

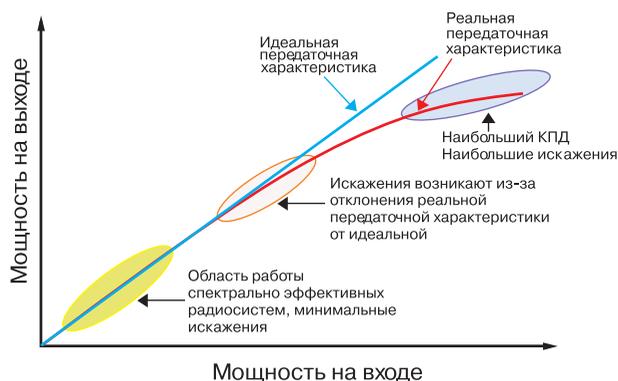


Рис. 12. Идеальная и реальная передаточные характеристики усилителя мощности

Введение коррекции препятствует возникновению искажений в выходном радиосигнале и позволяет получить практически линейную передаточную характеристику. В общем случае для снижения интермодуляционных искажений выходного сигнала усилителя мощности перед ним включается дополнительный блок (DPD), в котором осуществляется умышленное искажение передаваемого сигнала, что, в конечном счете, позволяет снизить (компенсировать) искажения результирующего сигнала на выходе усилителя мощности. Существует множество алгоритмов компенсации нелинейных искажений, базирующихся на моделях разной сложности.

Микросхема GC5322 (Texas Instruments) – один из примеров интегрированного на кристалле блока DPD. На рис. 13 приведен вариант структуры передатчика с использованием микросхемы GC5322. Напряжение питания – 1.2, 1.8 и 3.3 В, потребляемая мощность – 2.5 Вт (типичное значение). Микросхема изготавливается в корпусе 352-PBGA размерами 27×27 мм.

Компания Analog Devices выпускает микросхему AD6641, ориентированную на использование в качестве широкополосного обзорного приемника (250 МГц) совместно с DPD-блоком. Для дискретизации входного сигнала в микросхеме содержится 12-разрядный АЦП с частотой выборки 500 MSPS. Передача данных в DPD-блок осуществляется через последовательный (SPI, SPORT) или параллельный 12-разрядный интерфейс с использованием буферной памяти типа FIFO объемом 16К×12 бит. Микросхема изготавливается в корпусе типа 56-LFCSF размерами 8×8 мм, потребляемая мощность менее 695 мВт при максимальной частоте выборки, стоимость 147\$ (в партии 100-499 шт.).

Один из вариантов, часто применяемых в оборудовании базовых станций, – это реализация алго-

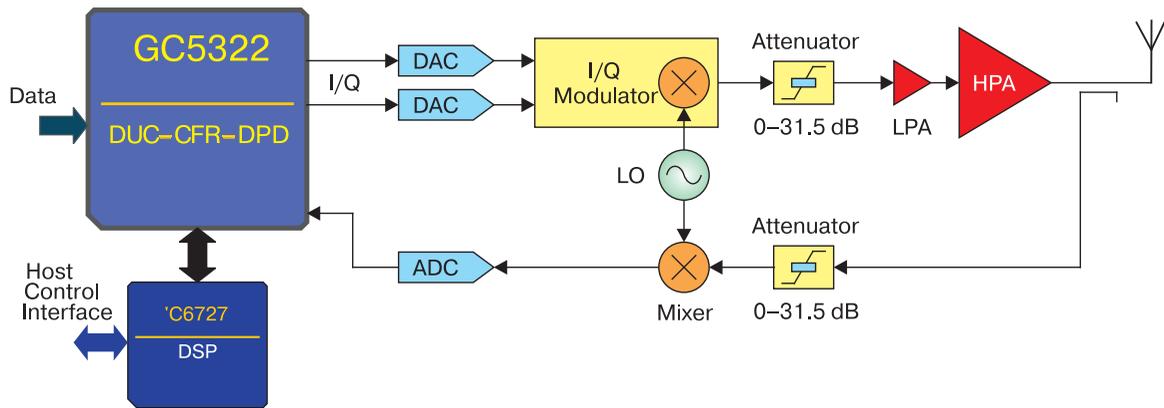


Рис. 13. Вариант структуры радиопередатчика с использованием микросхемы GC5322

ритмов компенсации средствами программируемой логики (рис. 14). В этом случае часть потребляемой энергии расходуется для поддержания интенсивного высокоскоростного обмена данными между FPGA и трансивером. Существенно снизить энергозатраты можно в случае реализации DPD-блока в трансивере (рис.14), что также дает возможность сократить число линий связи. При этом потребляемая трансивером мощность увеличивается всего на 100 мВт. Наибольший эффект от использования DPD-блока трансивера наблюдается при существенном росте числа каналов.

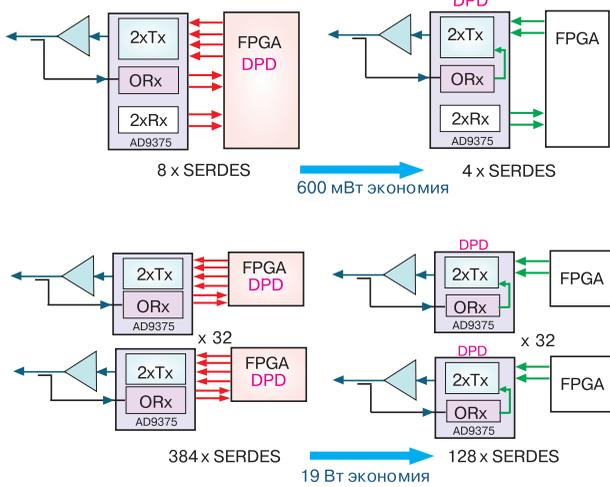


Рис. 14. Варианты размещения DPD-блока

Встроенный в трансивер AD9375 блок DPD обеспечивает более высокую эффективность усилителя мощности при сохранении линейности его передаточной характеристики. Блок DPD оптимизирован для работы при выходной мощности от 250 мВт до 10 Вт (среднеквадратическое значение) и полосе пропускания до 40 МГц.

Вследствии нелинейности передаточной характеристики происходит нежелательное расширение

спектра выходного сигнала, что обусловлено возникновением интермодуляционных искажений. На рис. 15 приведены спектры выходного сигнала при полосе пропускания 20 и 40 МГц в случае наличия и отсутствия DPD-блока [9]. В качестве усилителя мощности использовался усилитель SKY66297 компании SkyWorks.

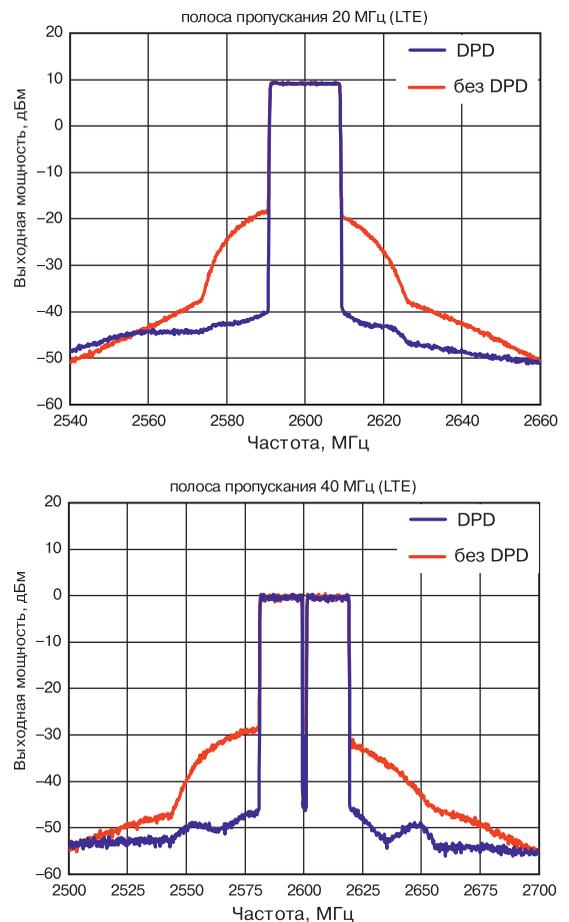


Рис. 15. Спектр выходного сигнала при полосе пропускания 20 и 40 МГц при включении и отключении DPD-блока

На web-сайте компании Analog Devices предлагается использовать DPD-калькулятор [12], дающий возможность рассчитать параметры и эффективность системы в случае использования встроенного в трансивер DPD-блока.

В приемопередатчиках AD9371/75 обмен данными с АЦП приемника и ЦАП передатчика осуществляется с использованием высокоскоростного цифрового интерфейса JESD204B. Максимальная скорость передачи данных с использованием одной дифференциальной пары – 6144 Мбит/с.

ADRV9009

Микросхемы ADRV9008/9 во многом являются модернизацией трансиверов семейств AD936x /7x, от которых они отличаются более широкой полосой пропускания и большим динамическим диапазоном. Параметры и возможности трансиверов ADRV9008/9 соответствуют рекомендациям существующих стандартов сотовой связи. Их преимущество – универсальность, основанная на уникальном сочетании высокой производительности, низкой потребляемой мощности и малых габаритных размеров.

Структура универсального приемопередатчика ADRV9009 приведена на рис. 16. Микросхема предназначена для работы в диапазоне частот от 75 МГц до 6 ГГц и обеспечивает возможность приема радиосигналов, с полезной шириной спектра до 200 МГц, а также синтез радиосигнала передатчика с максимальной полосой до 450 МГц. Максимальная полоса пропускания обзорного приемника (ORx) 450 МГц.

Обмен данными со встроенными АЦП и ЦАП осуществляется через высокоскоростной цифровой интерфейс JESD204B. Максимальная скорость передачи данных с использованием одной дифференциальной пары – 12.288 Гбит/с. Типовая потребляемая мощность приемопередатчика ADRV9009 – менее 5 Вт.

Кроме универсального приемопередатчика

ADRV9009 предлагаются также микросхема приемника (ADRV9008-1) и передатчика (ADRV9008-2). Отличия характеристик микросхем ADRV9008/9 даны в табл. 6. Микросхема ADRV9009 поддерживает работу в режиме TDD, ADRV9008 – в режиме FDD. Трансиверы ADRV9008/9 отличаются малым значением амплитуды вектора ошибки (-43 дБ), а также содержат блоки исправления ошибок квадратурного кодирования (Quadrature Error Correction – QEC), корректировки смещения постоянной составляющей и блок АРУ (AGC – Automatic Gain Control), что позволяет минимизировать ошибки преобразования сигналов, возникающие при сложных видах квадратурной модуляции.

В трансивере ADRV9009 реализован принцип радиоприема на основе алгоритма прямого преобразования с нулевой промежуточной частотой (Zero Intermediate Frequency – ZIF), который отличается рядом преимуществ. В том числе благодаря его применению удалось увеличить подавление внеполосных помех до 75 дБ (Rx).

В трансивере ADRV9009 содержатся все необходимые компоненты для реализации цифрового высокочастотного тракта: от маломощных усилителей на входе до АЦП на выходе и от ЦАП на входе до усилителей мощности на выходе.

Встроенная полнофункциональная система фазовой автоподстройки частоты обеспечивает возможность синтеза тактовых сигналов на базе делителя частоты с дробным коэффициентом деления для трактов передатчика и приемника. Содержится также вспомогательный синтезатор тактовых сигналов, используемых для работы преобразователей сигналов, цифровых фильтров и блоков последовательного интерфейса.

В передатчике используют инновационный модулятор прямого преобразования, обеспечивающий высокую точность модуляции и низкий уровень шума. Максимальная мощность передатчика в диапазоне частот 75... 600 МГц составляет 9 дБм, в диа-

Таблица 6. Некоторые характеристики микросхем ADRV9008/9

Тип	Два приемника	Два передатчика	Обзорный приемник (ORx)	FDD	TDD	Подавление зеркального канала (Rx), дБ	NF (тип.), дБ
ADRV9009-BBCZ	+	+	+	-	+	75	12
ADRV9008-1BBCZ	+	-	-	+	-	-	-
ADRV9008-2BBCZ	-	+	+	+	-	-	-

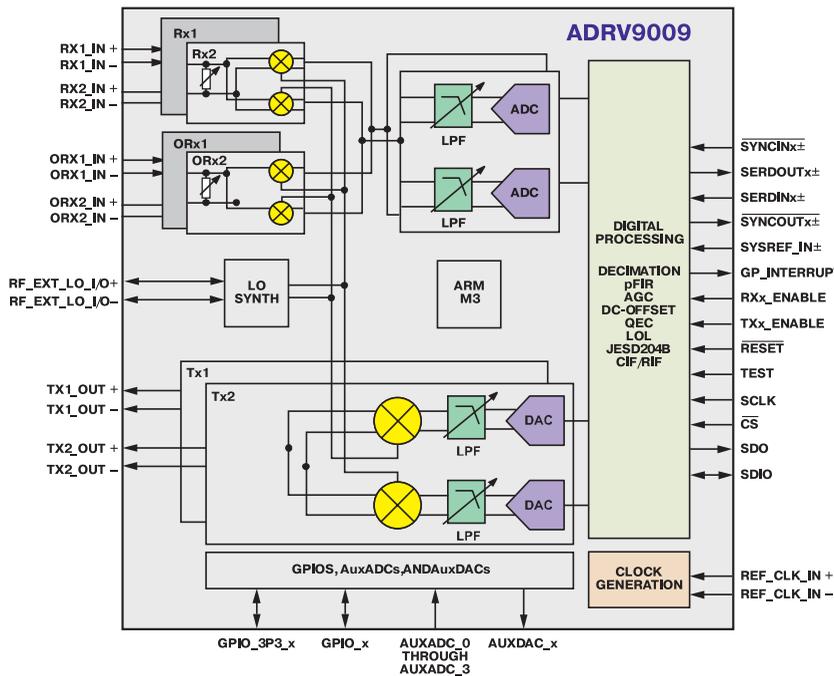


Рис. 16. Структура универсального трансивера ADRV9009

Таблица 7. Параметры обзорного усилителя (ORx) трансивера ADRV9009

Параметр	AD9009 (ORx)	
Относительный уровень второй гармоники (HD2), дБн	-80	
Относительный уровень третьей гармоники (HD3), дБн	-70	
Динамический диапазон (SFDR), дБ	70	
Уровень составляющих интермодуляционных искажений, дБн	третьего порядка (IM3)	-62
	пятого порядка (IM5)	-80
	седьмого порядка (IM7)	-80
Подавление зеркального канала, дБ	65	

пазоне 4.8...6.0 ГГц – 4.5 дБм.

В табл. 7 приведены параметры, характеризующие уровень искажений сигнала в усилителе обзорного приемника (ORx), который представляет собой широкополосный приемник прямого преобразования с двумя дифференциальными входами (ORX1, ORX2).

В трансивере ADRV9009 реализована возможность автоматического и ручного управления аттенуатором, коррекции уровня смещения постоянной составляющей, коррекции ошибок квадратурного кодирования, а также цифровой фильтрации, что упрощает обработку данных в host-процессоре. Принятые сигналы в приемнике оцифровываются с использованием Σ - Δ АЦП и в дальнейшем подвер-

гаются необходимой фильтрации. Кроме того, в микросхеме ADRV9009 реализован вспомогательный 12-разрядный АЦП и 10-разрядный ЦАП.

Напряжение питания ядра 1.3 и 1.8 В. Предусмотрены режимы работы с пониженным уровнем энергопотребления. Микросхемы ADRV9009 изготавливаются в корпусе 196-CSP_BGA размерами 12×12 мм и предназначены для эксплуатации при температуре кристалла не выше 110 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня крайне сложно представить окружающий нас мир без сетей беспроводной связи, которые в буквальном смысле опутывают всю планету.

Новости, прикладная информация, прогноз погоды и пр. – все это на слуху благодаря беспроводным соединениям, которые выполняются, в том числе, вследствие применения в радиоприемном тракте микросхем широкополосных радио-приемопередатчиков, АПЦ, ЦАП, усилителей, микросхем управления электропитанием, а также формирования и распределения тактовых сигналов и пр. Основная особенность современных радиоприемников, которая достигнута благодаря усовершенствованию полупроводниковой технологии, – возможность конфигурирования радиочастотного тракта. Т.е. выбор частоты несущей, полосы пропускания, коэффициента усиления и т.п. выполняется на программном уровне, что открывает новые возможности при создании портативных мобильных устройств нового поколения. Применение конфигурированных трансиверов позволяет существенно уменьшить габаритные размеры проектируемых систем связи, снизить уровень энергопотребления и сократить сроки разработки новых изделий.

Одна из актуальных областей применения широкополосных радиотрансиверов – средства радиоэлектронной борьбы, которые являются важнейшим видом оружия в современных военных действиях. Традиционно в процессе радиоэлектронной борьбы осуществляется воздействие радиопомехами на радиоэлектронные средства систем управления, связи и разведки противника. Один из видов радиоэлектронной борьбы – радиоэлектронная разведка (Signal Intelligence – SIGINT), т.е. сбор разведывательной информации в результате приема и

анализа электромагнитного излучения.

Стандартная задача радиоэлектронной разведки – это сканирование заданного частотного диапазона с помощью сканирующего радиоприемника. Цель – мониторинг и анализ радиосигналов в интересующем диапазоне частот. Продолжительность сканирования заданного частотного диапазона – весьма критическая характеристика приемника. Суммарная длительность сканирования естественно зависит от ширины анализируемой полосы частот, а также от полосы пропускания приемного тракта, времени обработки сигнала в приемнике (T_D) и длительности процесса перестройки несущей частоты ($T_{НОР}$). Все эти характеристики определяют исключительно параметрами трансиверов.

В заключение в табл. 8 [4] приведены сравнительные характеристики рассматриваемых трансиверов (AD9361/71, ADRV9009) при сканировании полосы частот 3 ГГц. Длительность ($T_{НОР}$) перестройки несущей частоты (Hop time) определяется переходными характеристиками системы фазовой автоподстройки частоты и управляемого напряжением генератора (Voltage-Controlled Oscillator – VCO).

Суммарная продолжительность сканирования определяется из простого выражения

$$T = N \times (T_D + T_{НОР}),$$

где $N = CW/BW$, т.е. N – это отношение анализируемой полосы частот к полосе пропускания приемного тракта.

Таблица 8. Сравнительные характеристики трансиверов в приложениях радиоразведки

Параметр	AD9361		AD9371	ADRV9009
	Режим быстрой перестройки частоты	Стандартный режим перестройки частоты		
Анализируемая (сканируемая) полоса частот (CW), ГГц	3			
Полоса пропускания тракта ($BW = 0.8 \times IQRate$), МГц	40	40	100	200
Длительность перестройки по частоте ($T_{НОР}$), мкс	15	250	1000	70
Скорость IQ-выборок (IQRate), MSPS	50	50	125	250
Число необходимых перестроек по частоте (N)	75	75	30	15
Минимальный размер блока БПФ	16384		16384	65536
Время обработки сигнала в приемнике (T_D), мкс	328	328	262	262
Продолжительность сканирования ($T = N \times (T_D + T_{НОР})$), мс	25.7	43.3	37.8	5

Дополнительную информацию о ВЧ-приемопередатчиках компании Analog Devices можно найти в сети Интернет по адресу www.analog.com или в фирме VD MAIS – официальном дистрибьюторе компании Analog Devices.

ЛИТЕРАТУРА

1. High definition, low delay, SDR-based video transmission in UAV applications.
2. ADRV9008/ADRV9009 Integrated wideband RF transceiver platform.
3. 200 MHz bandwidth, Software-Defined Radio (SDR) solution with enhanced frequency agility.
4. Design challenges for aerospace and defense SDR (Software Defined Radio).
5. AD9363 Integrated programmable RF transceiver.

Simplify your system design and standardize

6. ADRV9009 Integrated dual RF transmitter, receiver, and observation receiver.

7. <https://www.analog.com/ru/applications/technology/sdr-radioverse-pavilion-home/wideband-transceivers/digital-pre-distortion.html>

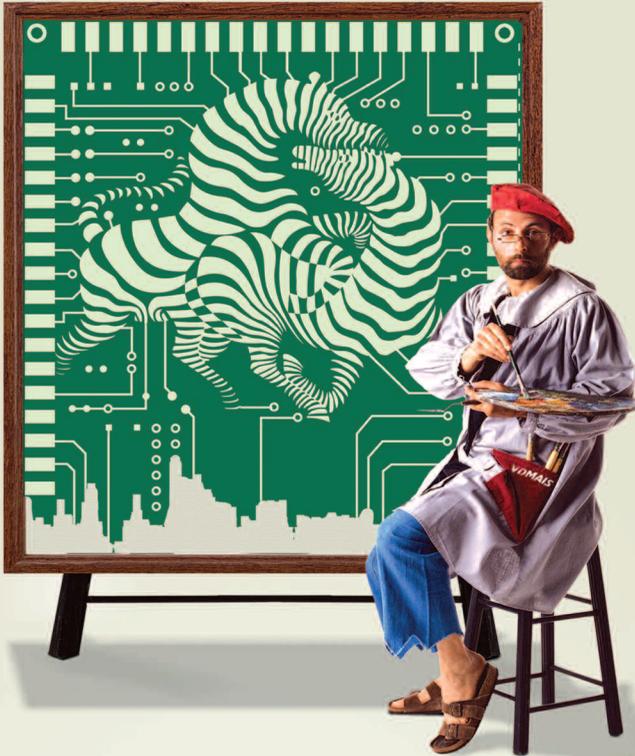
8. <https://limemicro.com/technology/>

9. <https://www.maximintegrated.com/en/products/comms/wireless-rf/MAX2580.html>

10. GC5322 Wideband digital pre-distortion transmit IC solution.

11. AD9375 Integrated, Dual RF Transceiver with Observation Path.

12. <http://beta-tools.analog.com/dpdc/calculator>.



[От ремесла к искусству]

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

■ проектирование

Проектирование печатных плат в НПФ VD MAIS – это:

- многолетний опыт конструирования и знание специфики:
 - разработки электронных устройств
 - технологии производства печатных плат
 - различных CAD-CAM систем проектирования (P-CAD, Mentor Graphics, CAM-350 и пр.)
- полная реализация возможностей изготовителя печатных плат и контрактного производства VD MAIS
- качество работы, соответствующее ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, IATF 16949:2016 и ISO 13485:2016.



VD MAIS

PCB Professionally

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (032) 245-5478, (048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua