

5G-устройства

в беспроводных решениях O-RAN

Сообщество O-RAN было создано для того, чтобы замотивировать разработчиков беспроводной связи двигаться в сторону новых исследований, создания принципиально нового оборудования, и для внедрения инноваций, позволяющих выполнить обещания, данные 3GPP в отношении технологии 5G [1]. Успех и экономическая целесообразность развития всей мобильной телефонии заключаются в наличии открытых источников информации о радиооборудовании и создании оптимизированных устройств с 5G-технологией. В этой статье будет рассмотрен процесс проектирования и разработки одного из таких энергоэффективных решений.

Брэд Брэннон (Brad Brannon)

Задачи 5G

Радиотехники и сетевые инженеры решают свои задачи разными методами. Например, для организации служб переноса данных на периферию сети применяются решетки MIMO и технология малых сот. Все это помогает увеличить объем и скорость передаваемой информации. Решетки MIMO используются в разнообразном радиооборудовании и позволяют не только увеличить пропускную способность, но и расширить зону покрытия.

Как и в предшествующей технологии макросот, радиоточки с решетками MIMO обеспечивают относительно большой радиус действия. Однако такие решетки действуют на более высоких частотах, обычно 2,6 ГГц и выше, и не слишком эффективны для работы в зданиях. Для обслуживания внутренних помещений и труднодоступных открытых площадок используются устройства, построенные по принципу малых сот. Поскольку количество внутренних и наружных помещений в населенных пунктах весьма велико, начиная от домашних хозяйств и заканчивая офисными зданиями, промышленными комплексами, коммерческими торговыми зонами и даже спортивными аренами, использование технологии малых сот становится критически важным для успешной эксплуатации 5G. Учитывая огромное количество модулей малых сот и разнообразие вариантов при развертывании, их обслуживание при эксплуатации обещает быть недорогим, что и станет ключевым фактором, способствующим развитию 5G.

Какие существуют технологии?

За последние годы эволюция технологий достигла уровня, позволяющего создавать раз-

личные решения 5G. По закону Мура, количество транзисторов, размещаемых на кристалле процессоров, удваивается каждые 24 месяца. Из этого следует, что со временем уменьшается себестоимость радиоэлектронных устройств за счет снижения расхода кремния в каждом элементе. Кроме того, появляется возможность интеграции в чип все более сложной функциональности. Теперь большинство требуемых алгоритмов управления могут выполняться непосредственно компонентами в схеме радиооборудования, это относится, например, к такой функции, как цифровое предварительное искажение (DPD). И чем интенсивнее развиваются технологии, тем больше появляется разнообразных возможностей.

Во-вторых, отраслевые сообщества разработчиков, такие как O-RAN Alliance [2], существуют во всех сферах беспроводной связи, причем не только для снижения затрат, но и для повышения эффективности цепочки поставок, попутно предлагая новые способы монетизации беспроводных сетей. Об этом заявлено в официальной документации сообщества [3].

Таким образом, деятельность разработчиков сосредоточена на создании устройств с параметрами, определенными 3GPP, с их последующей стандартизацией, тестированием и повсеместным внедрением.

Кроме того, в O-RAN определяют аппаратные требования и предоставляют проекты для O-CU, O-DU и O-RU (открытый централизованный блок, открытый распределенный блок и открытый радиоблок соответственно — функциональные блоки по спецификации O-RAN). В совокупности все это позволяет стандартизировать используемые процессоры для еще большего снижения стоимости.

В-третьих, в последние годы развитие радиотехники шло высокими темпами. Высокопроизводительное оборудование теперь доступно в различных исполнениях и соответствует заявленным 3GPP-стандартам. Кроме аналоговых и радиочастотных элементов, эти устройства снабжены модулями для выполнения важных алгоритмов, в частности DPD и уменьшение коэффициента усиления (CFR). В то время как элементная база теперь состоит преимущественно из тонкопленочных CMOS, в радиочастотной электронике также произошли изменения. Получили распространение недорогие радиочастотные компоненты (SiGe, SOI, GaN, GaAs и т. д.), с помощью которых можно создавать более современные схемотехнические решения.

Наконец, на вооружении у разработчиков имеются высокоэффективные схемы организации питания, например Power over Ethernet (PoE), а также управления, мониторинга и защиты. Все эти технологии обеспечивают невысокую стоимость платформ малых сот, которые могут быть эффективно развернуты во всей сети оператора для систем с разным уровнем энергопотребления.

Обзор системы

На рис. 1 показана типичная структурная схема малой соты 5G в конфигурации 4T4R (четыре передатчика и четыре приемника). На практике встречается множество других

конфигураций, например 2T2R, с диапазоном мощности от 24 дБм и выше. Этот рисунок послужит основой для остальной части статьи, в которой основное внимание уделено 5G-устройствам с легко изменяемыми параметрами в пределах спецификации O-RU.

Типы устройств

В последние годы трансивер преобразовался в многофункциональное устройство. Рассмотрим его работу подробнее на примере серии AUDI RadioVerse, включающей ряд приемопередатчиков с полосой пропускания до 200 МГц и имеющей дополнительные функции, такие как DPD.

Решения серии поддерживают работу с 5G-устройствами и соответствуют требованиям LTE и GSM RF, причем данная линейка постоянно модифицируется.

На рис. 2 показан блочный вариант одной из последних моделей — ADRV9029 в конфигурации 4T4R.

Модули от RadioVerse — это полноценные радиоустройства с полным набором функциональных возможностей для приема, передачи сигнала, его синтеза и синхронизации. В своем составе они также имеют конечный автомат и VGA, необходимые для запуска автоматического регулирования усиления.

Продукты рассматриваемой серии RadioVerse являются широкополосными до 6 ГГц, поэтому в них отсутствуют малошумящий усилитель

(LNA, Low-noise amplifier) и усилитель мощности (PA, power amplifier), которые должны быть выбраны исходя из полосы пропускания или частотного диапазона. Другими словами, для завершения проектирования радиоустройства на базе RadioVerse требуется только подобрать LNA и PA для конкретной схемы.

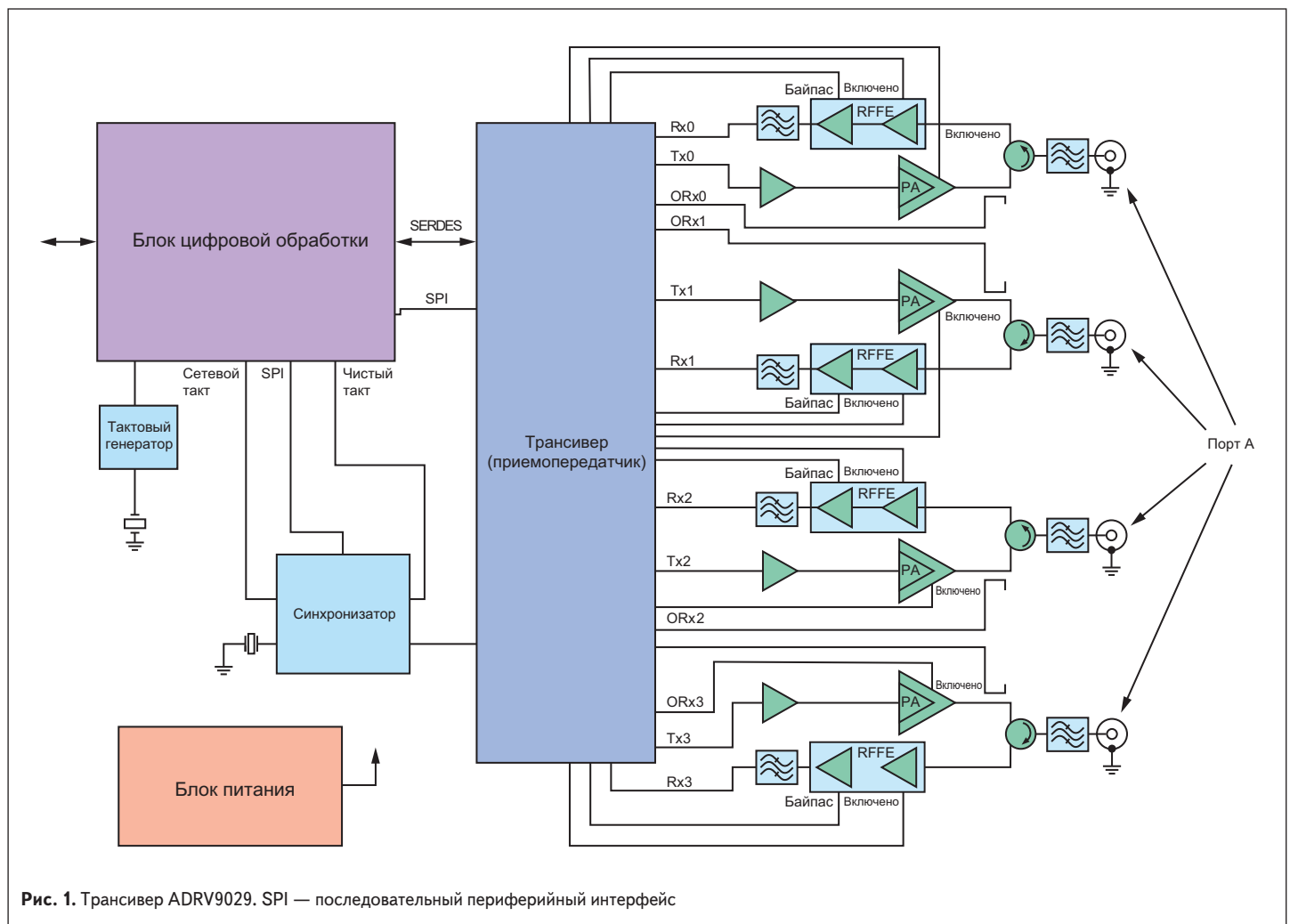
Далее будет описана схема обработки сигнала для малой соты 5G NR в режимах приема и передачи и дано некоторое представление о выборе этих устройств.

Пример схемы обработки сигнала для ресивера

Если ADRV9029 совместить с ADRF5545A, показанном на рис. 3, получится двухканальный ресивер. Можно использовать и ADRF5515 — с идентичной распиновкой.

Достаточно добавить немного пассивных элементов в обвязку, и получится очень компактная конструкция ресивера с превосходными параметрами (рис. 4). Ключевое преимущество данной архитектуры — минимальная мощность рассеивания такого устройства и легкая установка в любую систему, что в итоге приведет к очень низкой стоимости практической реализации.

Архитектура RadioVerse предусматривает отказ от многих составных частей схемы, обычно считающихся обязательными в конструкции ресивера. Здесь отсутствует некоторая часть радиочастотного усилителя, часть фильтров,



усилители основной полосы частот, аналоговые и цифровые фильтры каналов. Как правило, эти элементы наиболее крупные и мощные, и их отсутствие приводит к значительной экономии по сравнению с другими архитектурами.

Как показано на рис. 4, серия ресиверов с малой сотой состоит из циркулятора (для приложений TDD, или time division duplex, — с разделением по времени), ADRF5545A, фильтров

поверхностной и объемной акустических волн (SAW/BAW), балуна (симметрирующего трансформатора) и приемопередатчика. Учитывая отсутствие помех и низкий входной уровень IP1dB у ADRV9029 и других моделей линейки RadioVerse, дополнительных усилителей или преобразователей не требуется.

Используя эту схему обработки сигнала, можно поддерживать уровень шума всего

в 2 дБ. Схема содержит интегрированный радиочастотный интерфейс модуль первичной обработки (FEM), и хотя это приводит к незначительному повышению требований для антенных фильтров, с другой стороны, добавляет возможность интеграции других решений — например, таких как массовое развертывание устройств MIMO и TDD. Как правило, для конструкций FDD (frequency

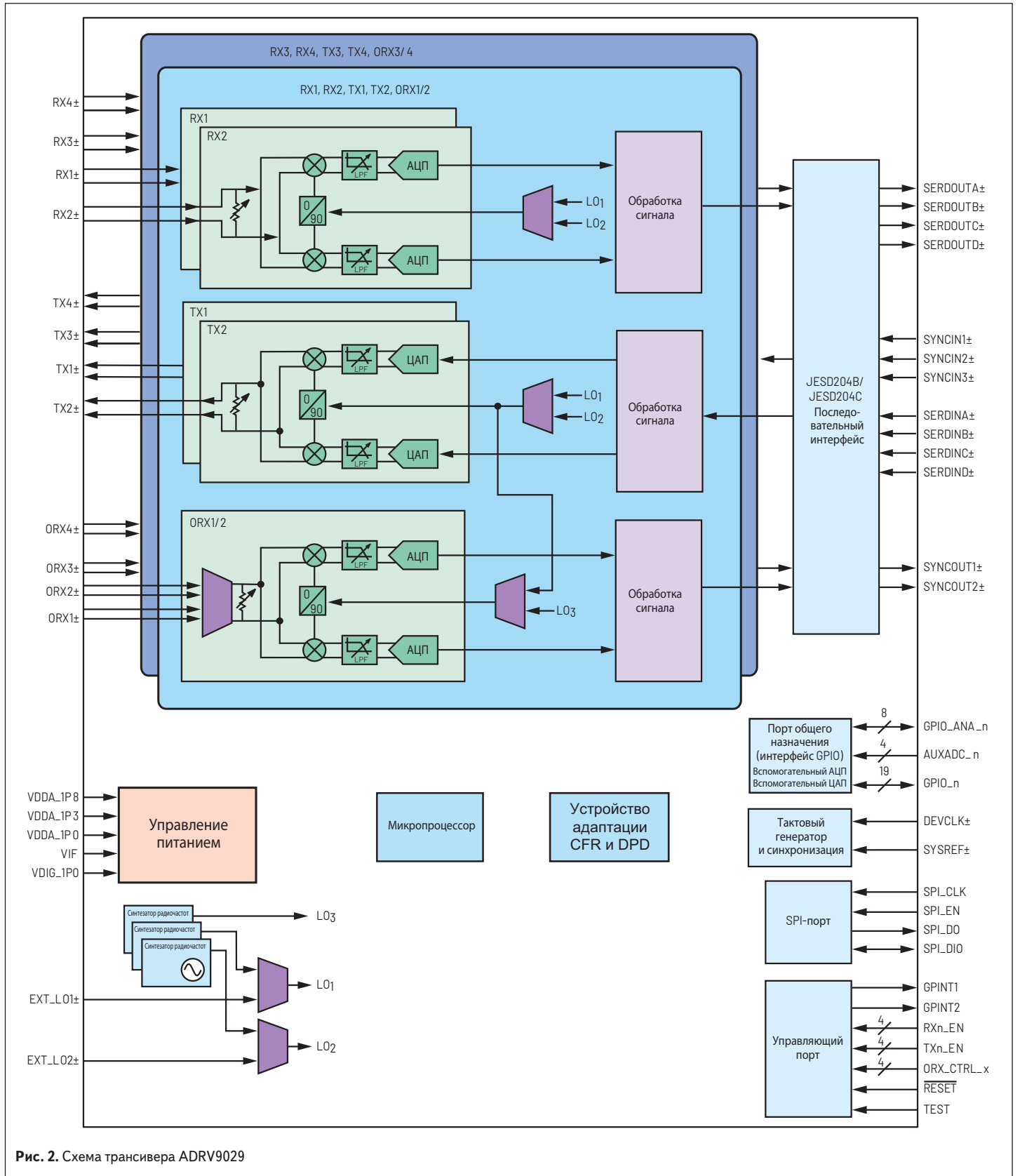


Рис. 2. Схема трансивера ADRV9029

division duplex, с частотным разделением) используется цифровое управление.

Если предположить, что потери до LNA составляют около 0,5 дБ, а потери узкополосного фильтра достигают 1 дБ, то, учитывая технические характеристики активных элементов, номинальный коэффициент шума NF во всей цепи ресивера должен составлять около 2 дБ. Если отношение сигнал/шум (SNR, Signal to noise ratio) и искажения равны 0 дБ, эталонная чувствительность будет составлять около -104,3 дБм для несущей G-FR1-A1-1 5G (~5 МГц). Этого должно быть достаточно (более чем с запасом) для удовлетворения требований 3GPP к проводимости для работы на большой площади в локальных сетях и схемах малых сот (табл. 1). В некоторых низкоэффективных устройствах технологии малых сот может использоваться одноступенчатый LNA, такой как GRF2093, за которым следует SAW-фильтр.

Кроме того, стандарт 38.104 спецификации 3GPP требует, чтобы в устройствах, работающих на уровне выше -52 дБм (широкий уровень), чувствительность приемника не снижалась более чем на 6 дБ. Исходя из зависимости коэффициента шума от входного уровня (рис. 5), при -52 дБм возникает гораздо меньше помех, чем при более низких уровнях. Фактически уровень помех не повышается сразу после -40 дБм, что оптимально для устройств, работающих с допуском -44 дБм.

В стандарте 7.4.2 общих требований блокировки спецификации 3GPP указано, что ресивер должен находиться в пределах интересующей полосы и работать с усилением -35 дБм (локальная зона) со смещением

±7,5 МГц при допустимом снижении чувствительности не более чем на 6 дБ. На рис. 5 показана эффективность аналоговой составляющей цепи: происходит снижение уровня шума всего на 0,9 дБ.

Другая интересная задача — требование 3GPP из раздела 7.5.2 о внеполосной блокировке. В этом случае на вход антенны подается сигнал -15 дБм. Для малой соты с частотой менее 200 МГц максимальное приближение этого сигнала к границе полосы составляет 20 МГц. Для проверки требуется развертка 1 МГц — 12,75 ГГц, исключая полосу в пределах 20 МГц от рабочей частоты. Существует несколько позитивных факторов такой схемы.

Во-первых, циркулятор имеет ограниченную полосу пропускания и отклоняет много внеполосных сигналов, но близость к нему не имеет существенного значения. Во-вторых, фильтр, показанный после ADRF5545A, обеспечивает некоторую фильтрацию — обычно приемлемо отклонение от диапазона 20 МГц ~ 20 дБ. Наконец, одной из уникальных и наиболее полезных функций семейства приемопередатчиков

Таблица 1. Стандарт 38.104 спецификации 3GPP для ресиверов

| | Широкий уровень, дБм | Средний диапазон, дБм | Местный уровень, дБм |
|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 5 МГц BW/15 кГц | -101,7 | -96,7 | -93,7 |
| 20 МГц BW/15 кГц | -95,3 | -90,3 | -87,3 |
| 50 МГц BW/30 кГц | -95,6 | -90,6 | -87,6 |
| 100 МГц BW/30 кГц | -95,6 | -90,6 | -87,6 |

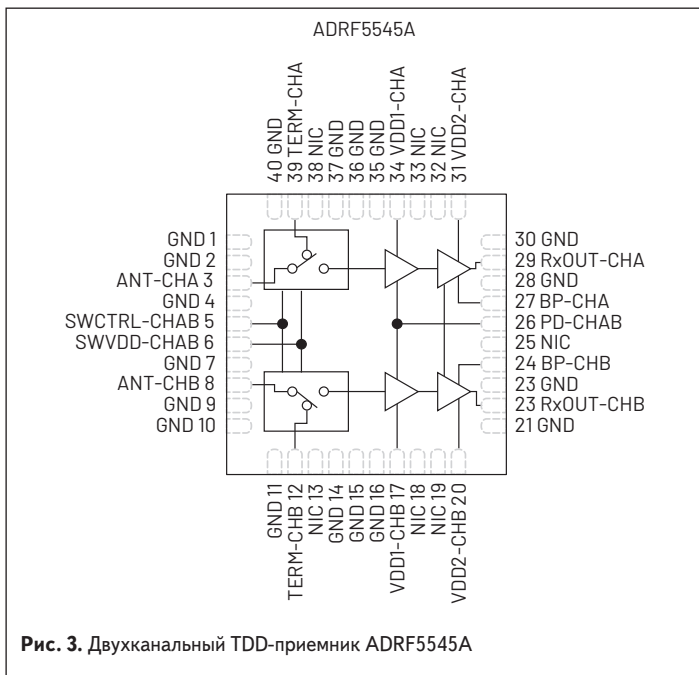


Рис. 3. Двухканальный TDD-приемник ADRF5545A

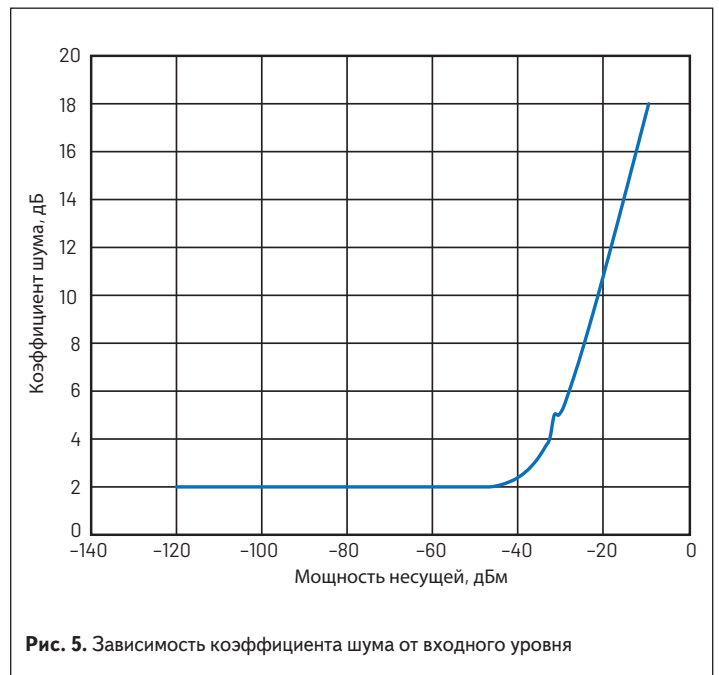


Рис. 5. Зависимость коэффициента шума от входного уровня

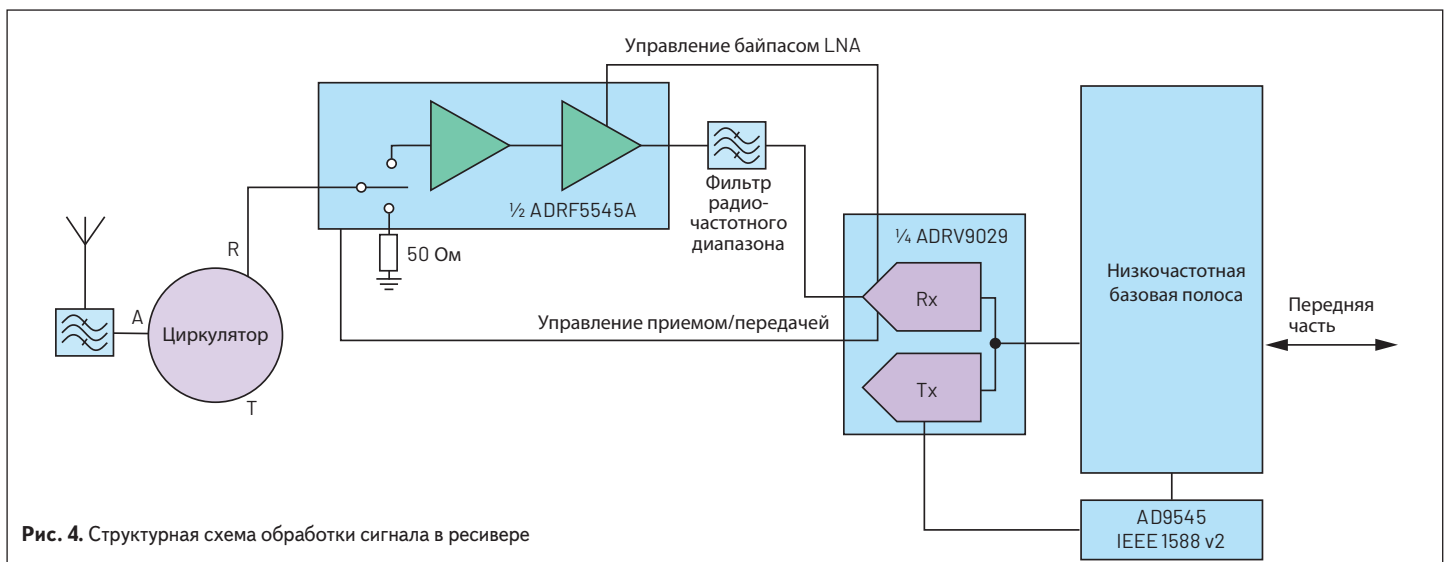
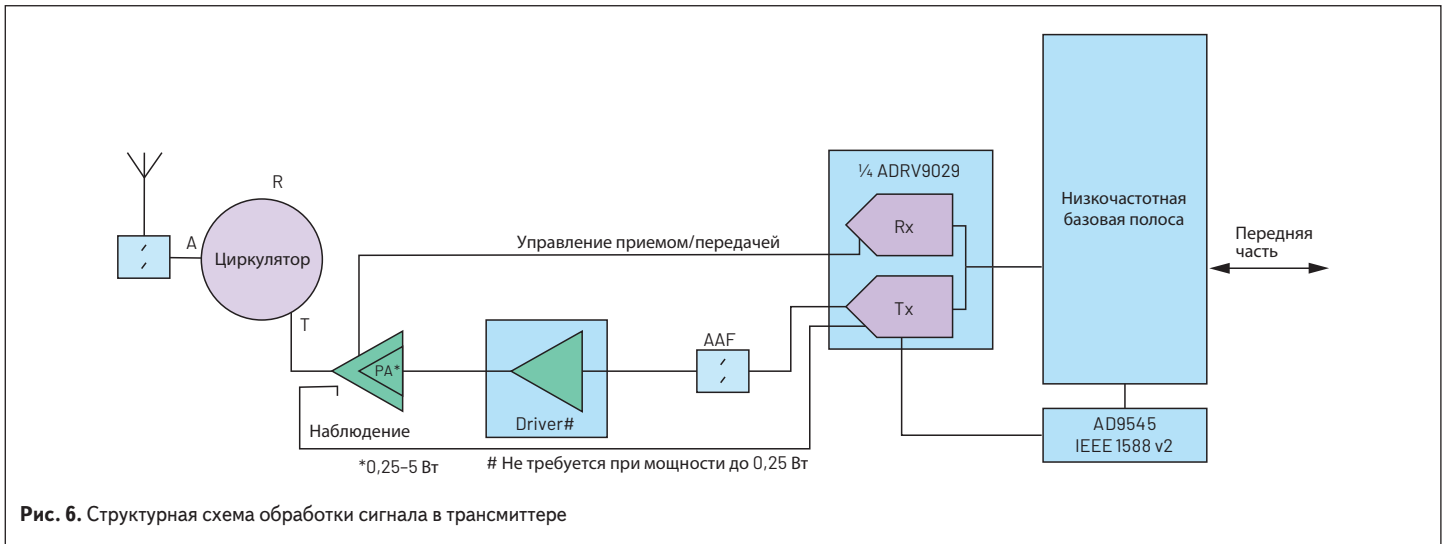


Рис. 4. Структурная схема обработки сигнала в ресивере



ADI, присущей данной архитектуре, является встроенное внеполосное подавление. На рис. 20 из инструкции по применению Analog Devices AN-1354 показано внутреннее внеполосное подавление в виде увеличения уровня сигнала для снижения чувствительности приемника. Согласно документу, частота развертки в любом направлении вокруг полосы пропускания показывает допустимость усиления сигнала при том же уровне чувствительности. Здесь видно, что вблизи границы диапазона возможно снижение чувствительности с 6 дБ примерно на 10 дБ. Помимо этого, встроенный фильтр значительно уменьшает внеполосные сигналы, которые не попадают обратно в полосу пропускания и в значительной степени ослабляются как встроенной, так и внешней фильтрацией.

Эти блоки производят фильтрацию от -15 дБм примерно до -40 дБм и до -45 дБм при полосе пропускания 20 МГц. При большей частоте понадобилась бы еще большая отбраковка сигнала. Но рис. 5 показывает, что это бесмысленно.

Более серьезная проблема — линейность интерфейсного модуля. На этом уровне можно

было бы ожидать чего-то значительного от устройств IM3. В зависимости от выбранного модуля FEM предпочтительно установить фильтр выбора полосы перед вторым LNA, чтобы защитить его от внеполосных сигналов, которые обычно создают мощные IM-устройства. Не на всех типах FEM можно установить промежуточный фильтр, поэтому реализован альтернативный вариант.

Для ограничения влияния интермодальности при больших внеполосных блокировках типичный FEM содержит байпасные переключатели второй ступени. Они помогают уменьшить усиления и обеспечивают защиту второй ступени от перехода в нелинейное состояние, как показано на рис. 3. Переключение коэффициента усиления LNA уменьшает SNR цепи на 1 дБ, но помогает сохранить общий динамический диапазон за счет ограничения интермодуляционных искажений, что компенсирует ухудшение характеристик. В целом это приводит к значению NF около 5,7 дБ в пределах требований к локальной площадке (малой ячейке). Остальные требования выполняются антенным фильтром, и отклонение может

быть определено на основе точки сжатия с низким коэффициентом усиления и FEM IP3-ресивера.

Пример схемы обработки сигнала трансмиттера

Если трансмиттер снабжен подходящим радиочастотным драйвером или модулем VGA, а также усилителем мощности, конструирование ячейки малой соты [4] не представляет большой сложности.

Добавление в схему нескольких пассивных элементов позволяет объединить эти устройства и получить компактный трансмиттер, схема обработки сигнала которого показана на рис. 6.

Как видно из рисунка, трансивер малых сот состоит из циркулятора, усилителя мощности, фильтра и приемопередатчика. Кроме того, выходной сигнал усилителя сравнивается с исходным, что применяется для контроля выходных искажений (а также для контроля коэффициента стоячей волны по напряжению антенны и ее прямой мощности). Это может использоваться с DPD для повышения эффективности передачи и снижения влияния паразитных связей.

Несмотря на то что можно использовать внешний DPD, в некоторых трансиверах серии ADI это устройство встроено и работает с добавочной мощностью до 350 мВт в зависимости от степени коррекции, необходимой для данного усилителя мощности. Менее мощные усилители потребуют меньшей коррекции и, следовательно, менее мощных DPD.

Интеграция устройств цифрового предварительного искажения также вдвое сокращает количество блоков SERDES, поскольку искажения устраняются с помощью цепи сравнения. Нагрузка передатчика уменьшается, поскольку расширение полосы пропускания для DPD полностью обрабатывается внутри приемопередатчика. Использование для этих целей FPGA неэффективно для малых сот и решеток MIMO, потому что обычно имеет в 10 раз большую мощность.

На рис. 7 и 8 показаны примеры DPD компании ADI, действующие в системах малых сот с ячейками малой и средней мощности.

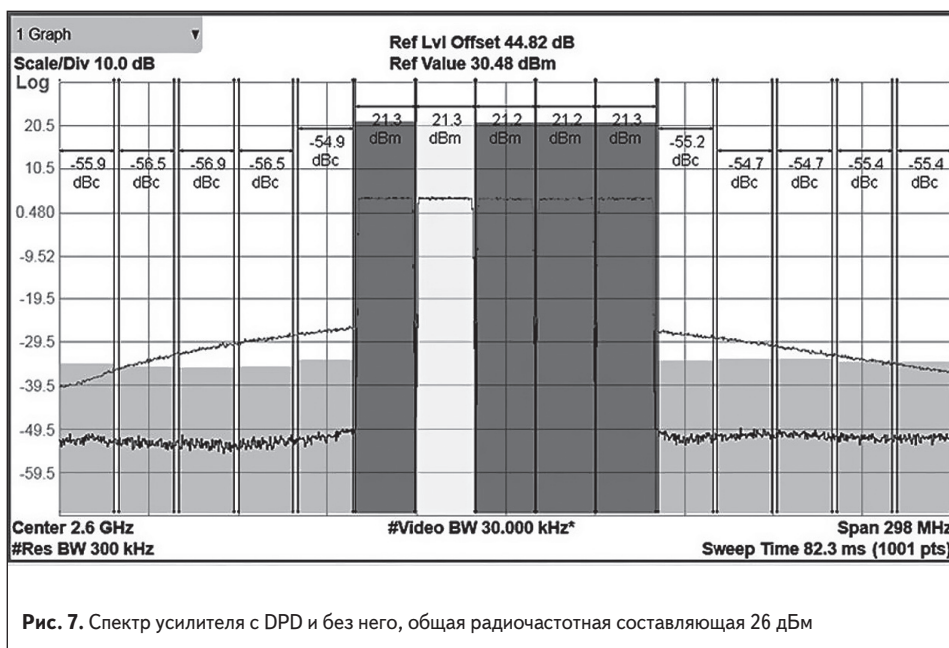


График построен для пяти операторов LTE, расположенных рядом друг с другом, при работе на частоте 20 МГц и общей частотой 100 МГц. Как правило, для LTE требуется ACLR (Adjacent Channel Leakage power Ratio — коэффициент (отношение) утечки мощности) не менее 45 дБ, причем ожидается, что нередко оборудование получит значение, превышающее указанную величину.

Как происходит совмещение ресивера и передатчика?

На рис. 9 показана полная схема обработки сигнала. Для повышения энергоэффективности в ней предусмотрена функция автоматического включения и выключения усилителей. Во время приема усилитель передатчика выключен, при переходе в режим передачи усилитель передатчика начинает работу, а соответствующее устройство в ресивере выключается.

Этот алгоритм можно использовать и для FDD, чтобы отключить неиспользуемые слоты, что также позволит экономить расход электроэнергии. Переключатель LNA необходим для изменения состояния входа и шунтирования противоположного сигнала.

Схема на рис. 9 предназначена для работы в одном диапазоне. Несмотря на то что трансивер охватывает все частоты до 6 ГГц, не все компоненты обладают такими возможностями. Например, LNA и PA обычно имеют определенную полосу пропускания и требуют подбора в зависимости от конкретных условий. Но эти устройства чаще всего взаимозаменяемые и имеют одинаковую распиновку. Таким образом, их можно использовать для работы во всех диапазонах, включая 5G.

Синхронизация

В зависимости от конфигурации возможно несколько вариантов настройки тактовой частоты. Если требуется точная временная синхронизация, необходим двухступенчатый синтез тактовых импульсов. На первом этапе происходит подключение к основной полосе частот с помощью ASIC, FPGA или контроллера

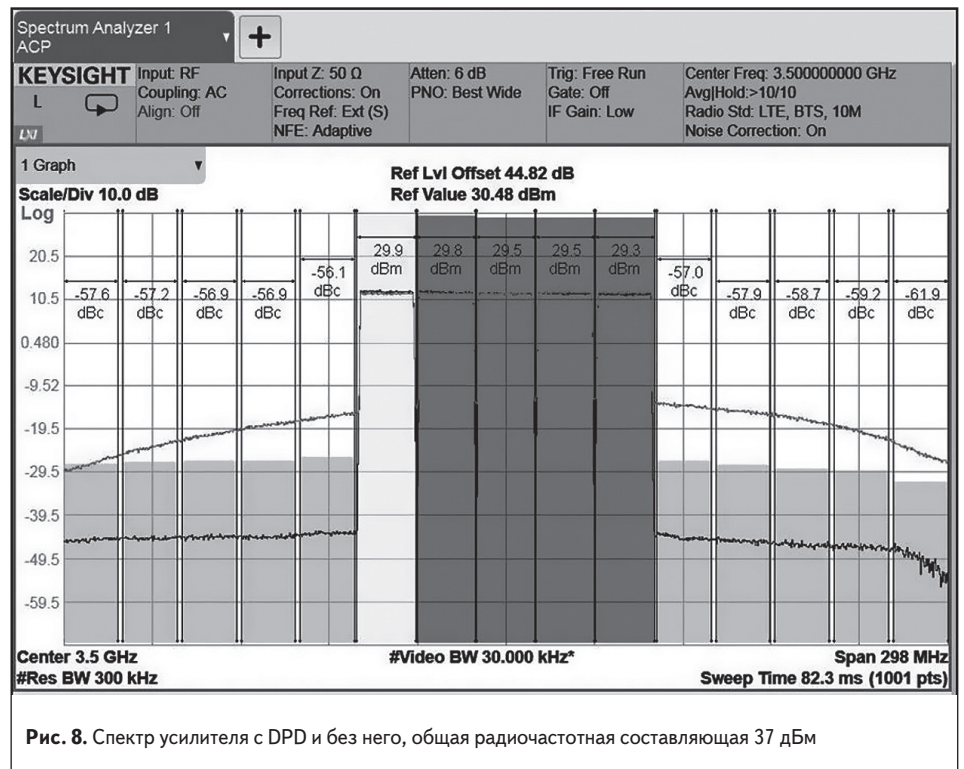


Рис. 8. Спектр усилителя с DPD и без него, общая радиочастотная составляющая 37 дБм

для правильного определения времени и согласования порядка оцифровки радиосигнала. Этот способ потребует обработки информации по протоколу точного времени (PTP) и гарантирует точную обработку радиокадров.

Семейство AD9545 оптимально для точной настройки частоты, фазы и времени основных часов радиоприемника. Преимущество семейства в том, что оно может быть сконфигурировано для временной работы без опорного сигнала и поддержания точности в случае неисправного или прерывистого опорного тактового сигнала при соединении с TCXO (кварцевым генератором с температурной компенсацией) или OCXO (кварцевым генератором с управлением от печи).

Вторым шагом, с которого можно начать, если точной синхронизации не требуется,

является распределение тактового сигнала. Распределительное устройство генерирует импульсы в диапазоне частот, на которых работает радиоустройство. Эти сигналы необходимы для правильной работы JESD, eCPRI, Ethernet, SFP и других стандартов обмена данными.

AD9528 обеспечивает низкие тактовые частоты фазового дрожания на 14 различных скоростях, поддерживает JESD204B/JESD204C и SYSREF.

На рис. 10 показан пример двухступенчатой блок-схемы синхронизации. Если точной синхронизации не требуется, AD9545 можно исключить и использовать только AD9528.

В зависимости от конкретных требований существует много других альтернативных конфигураций.

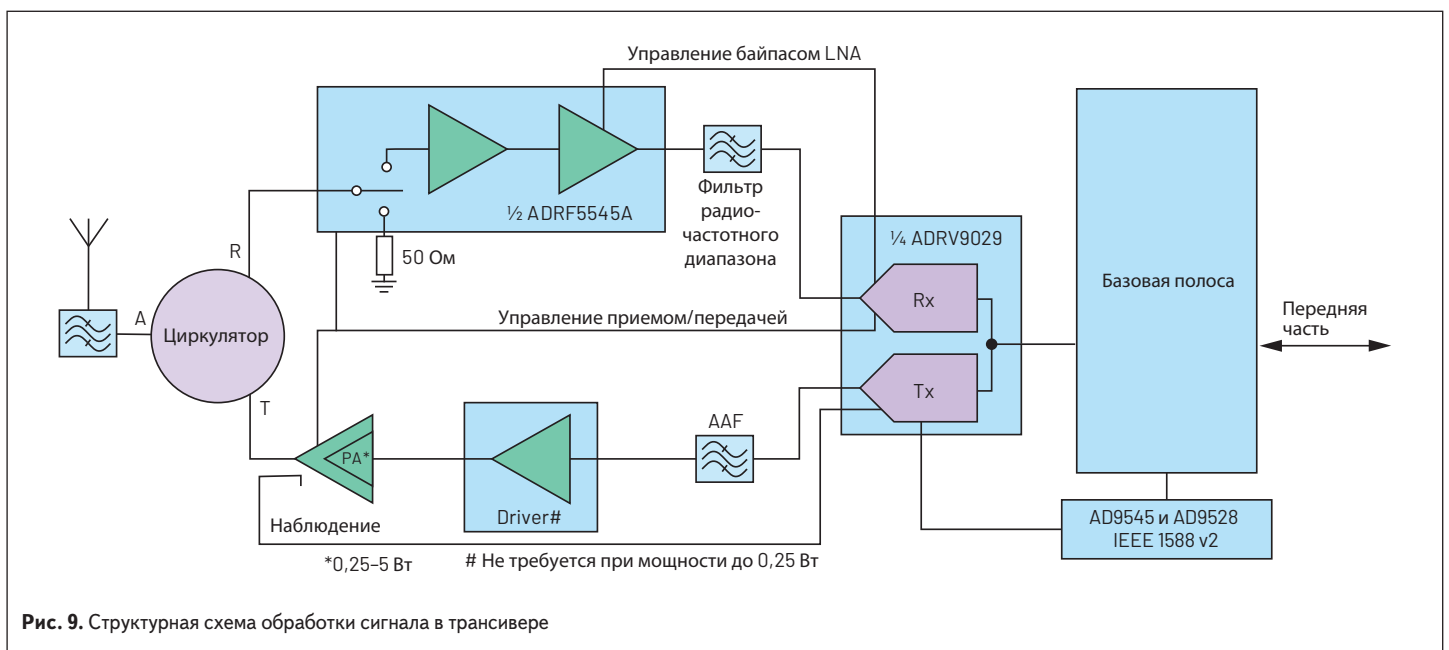


Рис. 9. Структурная схема обработки сигнала в трансивере

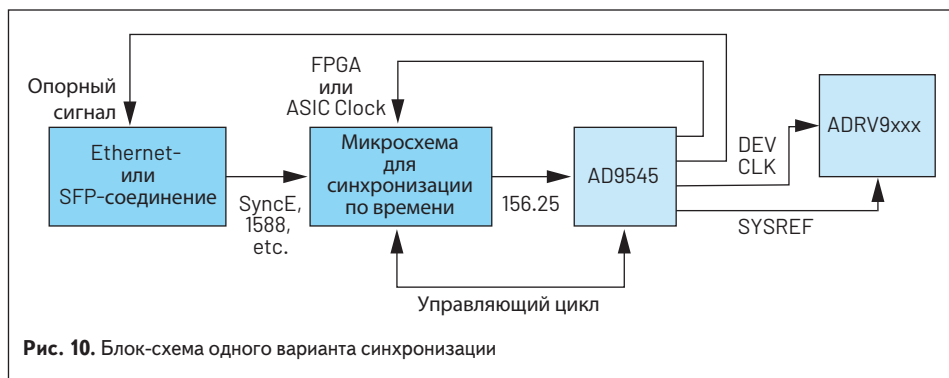


Рис. 10. Блок-схема одного варианта синхронизации

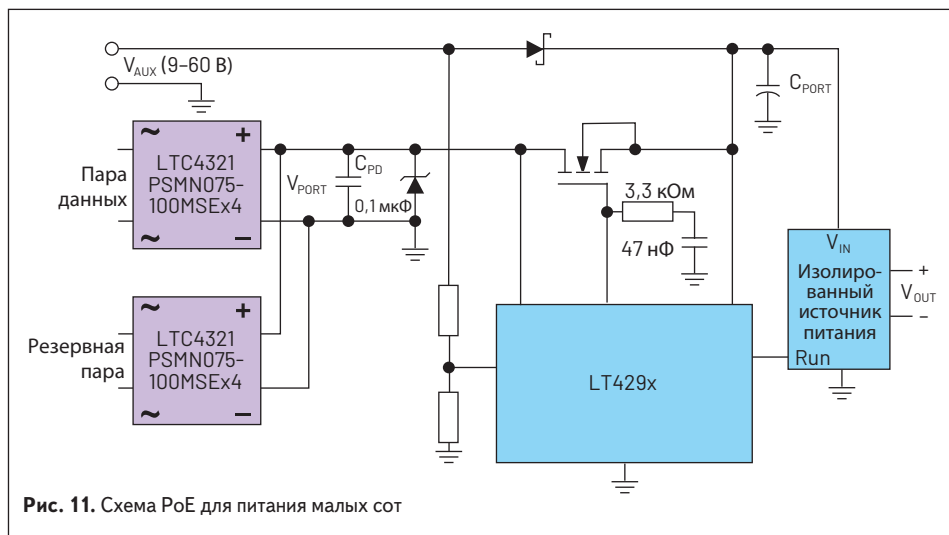


Рис. 11. Схема PoE для питания малых сот

Мощность

Общая мощность рассеяния определяется многими факторами. К этим факторам относятся: FPGA, добавленные функциональные элементы, тип выбранного трансивера, требуемая схема синхронизации и генерируемая радиочастотная мощность.

Стандартный SoC FPGA среднего диапазона, реализующий обработку CUS- и M-плоскостей O-RAN, с синхронизирующим стеком PTP IEEE 1588 v2, будет потреблять около 15 Вт.

Трансивер ADRV9029 имеет мощность рассеяния 5–8 Вт, в зависимости от конфигурации TDD или FDD, а также от числа включенных функций DFE.

Кроме того, необходимо учесть мощности тактового генератора, приемника, передатчика

и т. д. Пример в таблице 2 показывает факторы, влияющие на суммарную мощность системы без учета передатчиков (их мощность сильно варьируется в зависимости от класса).

Из таблицы видно, что общая мощность рассеяния радиоустройства за рабочий цикл приема-передачи 70:30 равна 26–29 Вт без учета усилителя мощности (несколько примеров мощностей рассеяния для него показаны в табл. 3). Поскольку усилители мощности, построенные на транзисторах, работают в линейном режиме, их КПД может составлять 20–50%. Именно здесь особо ярко заметно преимущество встроенных. При невысокой полосе пропускания и низкой мощности рассеяния в несколько десятков мВт DPD более чем компенсируется повышением эффективности усилителя мощности.

Таблица 2. Пример подсчета общей мощности рассеяния

| Устройство | Требуемое количество | TDD 70:30 Примерная мощность рассеяния (для 4T4R) |
|-----------------------------|----------------------|---|
| SoC FPGA среднего диапазона | 1 | ~15 Вт |
| ADRV9xxx | 1 | ~5 Вт |
| ADRF545A | 2 | 0,6 Вт |
| AD9545 | 1 | 0,7 Вт |
| AD9528 | 1 | 1,4 Вт |
| Драйвер усилителя мощности | 4 | 1,2 Вт |
| Другое | 1 | 2 Вт |
| Итого | 14 | 26–29 Вт |

Таблица 3. Рассеиваемая мощность при передаче

| Устройство | Требуемое количество | TDD 70:30 Примерная мощность рассеяния (для 4T4R) |
|-----------------|----------------------|---|
| +24 дБм/антенна | 4 | ~2,5 Вт |
| +37 дБм/антенна | 4 | ~4,7 Вт |

Для малых сот невысокой мощности усиление приблизительно 2,5 Вт приводит к увеличению мощности рассеяния до 30 Вт, что при питании от PoE делает возможным применение пассивного охлаждения.

Пример схемы представлен на рис. 11. Работа схемы основана на мостовом контроллере LT4321, который позволяет использовать в выпрямителе вместо диодов полевые транзисторы, что существенно повышает эффективность. Также в схеме используется LT4295. Следом возможна установка локальных регуляторов для обеспечения при необходимости мощности нагрузки более 90 Вт.

Помимо PoE, существуют и другие типы питающих устройств, способные работать совместно с системами малых сот. Это, например, серия микросхем ADP5054, специально разработанная для питания приемопередатчиков ADI, а также другие преобразователи и регуляторы LDO с низким уровнем шума (рис. 12).

Альтернативные схемы

Одной из главных особенностей рассматриваемой радиоархитектуры является ее гибкость, продиктованная рядом рыночных требований. Архитектура может быть использована в системах различного построения, включена поддержка FDD и TDD. Она одинаково эффективна во всех диапазонах и предпочтительна для малых сот в платформах решеток MIMO. Для изменения стоимости производства, размеров, веса и мощности имеются варианты компромиссов, для осуществления которых требуются лишь незначительные изменения в цепях передатчика и приемника.

Например, некоторые усилители мощности не требуют драйвера, поэтому могут использоваться без обвязки. Также в большинстве случаев малые соты работают с небольшой мощностью, поэтому циркулятор можно беспрепятственно заменить простым переключателем режима прием/передача. Наконец, для локального применения двухступенчатый LNA не нужен, вместо него можно установить простой одноступенчатый. В результате таких изменений конечное устройство становится дешевле, не теряя при этом своей эффективности. Альтернативная схема трансивера показана на рис. 13. Можно выполнять и другие изменения, создавая схемы для широкого диапазона частот и вариантов питания, в зависимости от конкретных задач.

Выводы

Рассмотренные устройства являются недорогими решениями при разработке коммуникационных приложений 5G, в том числе и во внедряемых стандартах O-RU O-RAN. Были рассмотрены, в частности, устройства из серии RadioVerse, а также радиочастотные усилители, генераторы/синхронизаторы такта с питанием по Ethernet. В совокупности такие устройства можно внедрять в сетевые системы построенных на базе технологий малых сот 5G макроячеек, микроячеек или антенных решеток MIMO. В сочетании с подходящим оборудованием и программным обеспечением FPGA, eASIC или ASIC может быть разработано законченное устройство O-RU (рис. 14). Указанная концепция — итог совместной

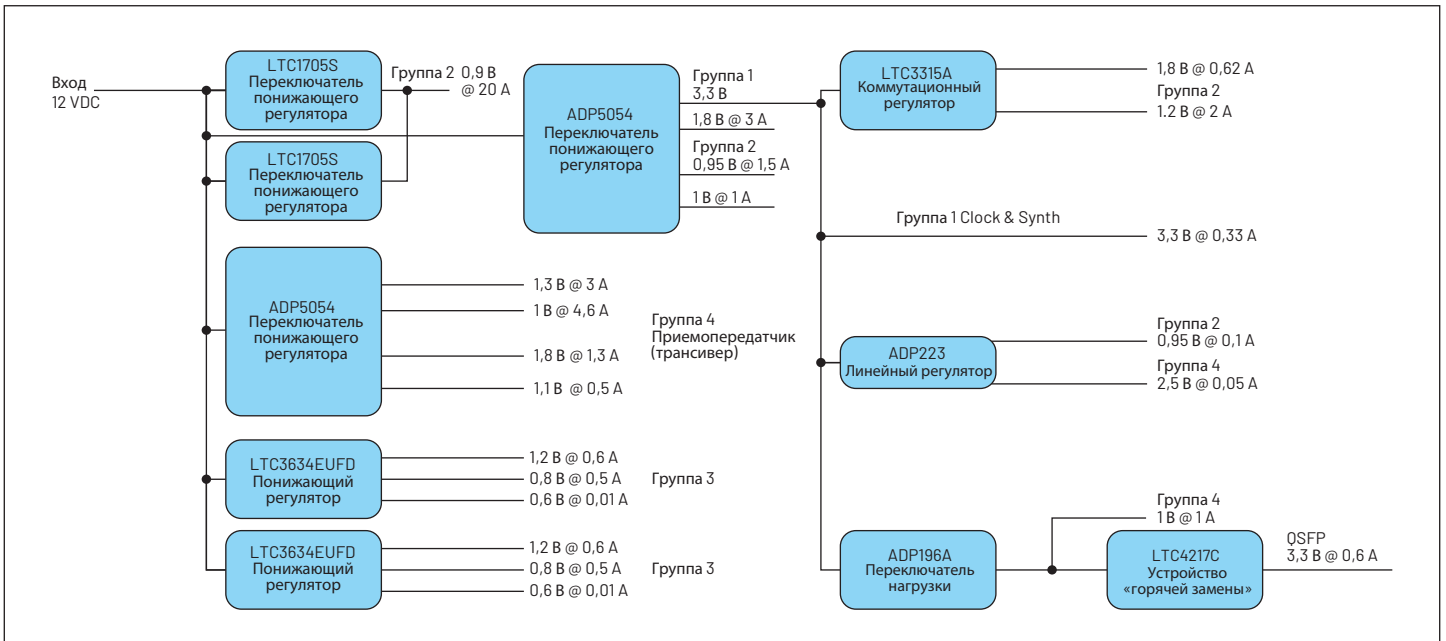


Рис. 12. Схема питания для устройств малых сот

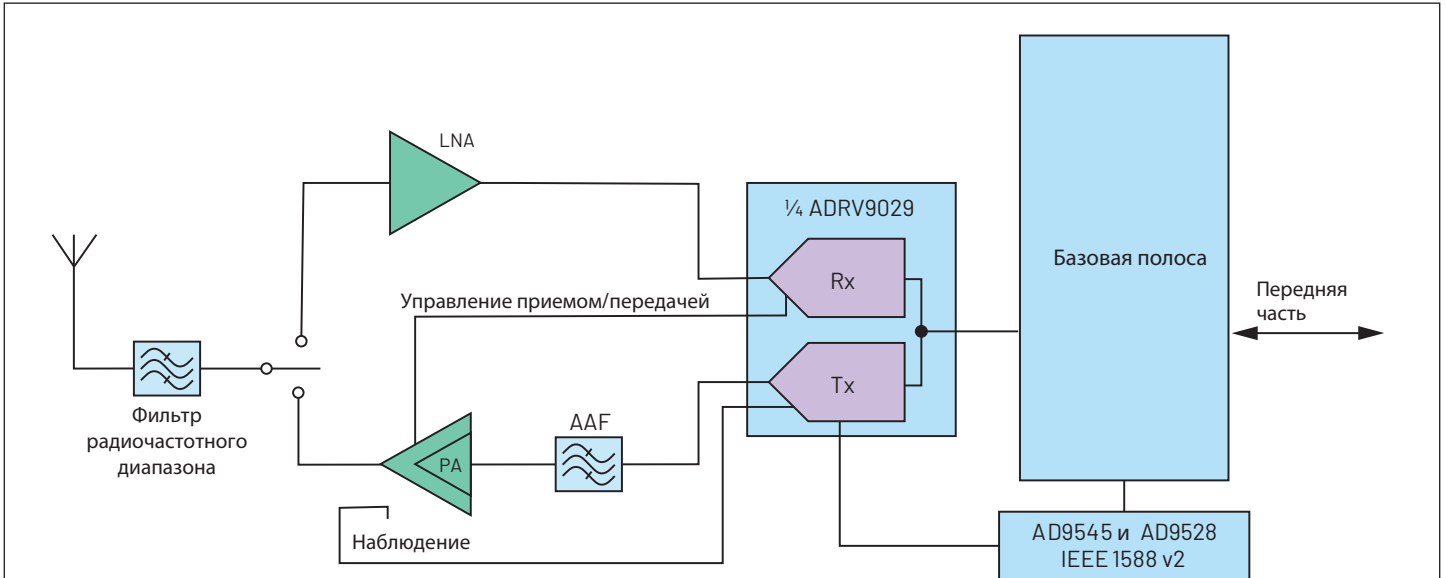


Рис. 13. Альтернативная схема обработки сигнала трансивером

разработки крупных промышленных компаний Intel, Comcores и Whizz Systems. Данное решение не только отвечает требуемым радиочастотным характеристикам, но и экономически выгодно и обладает энергоемкостью, необходимой для развертывания недорогих высокопроизводительных платформ O-RAN. ■

Литература

1. www.3gpp.org/ftp/specs/latest/Rel-15/38_series/
2. Официальный сайт O-RAN Alliance. www.o-ran.org/
3. O-RAN: Towards an Open and Smart RAN. O-RAN Alliance White Paper. www.static1.squarespace.com/static/5ad774cce74940d7115044b0/t/5bc79b371905f4197055e8c6/1539808057078/O-RAN+WP+Final+181017.pdf
4. Спецификация O-RAN. www.o-ran.org/specifications

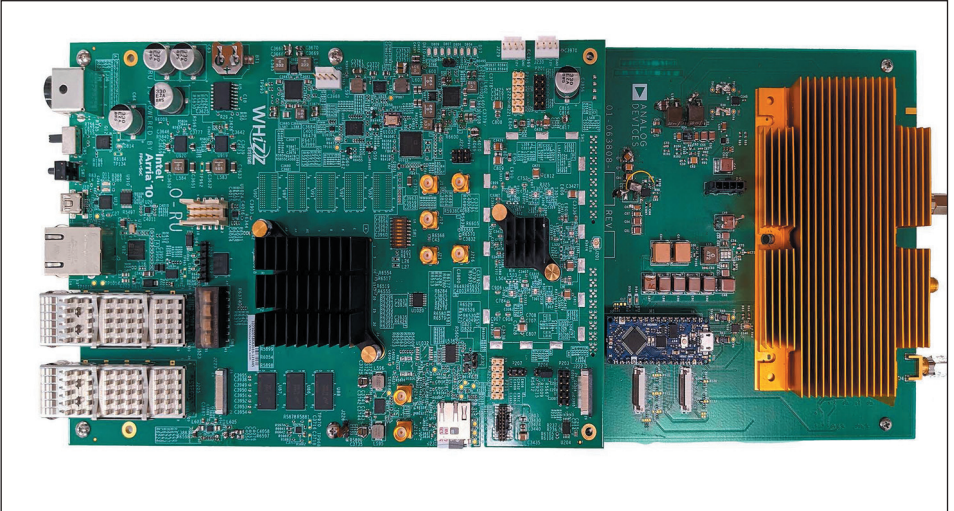


Рис. 14. 5G-устройство с радиочастотным интерфейсом