

Технологическая эволюция ВЧ-устройств

систем 5G миллиметрового диапазона

В статье рассмотрены три главные темы. В первой части мы обсудим некоторые из основных вариантов использования миллиметрового диапазона для связи и подготовим почву для последующего анализа. Во второй и третьей частях мы обратимся к архитектуре и технологии построения систем базовых станций миллиметрового диапазона. Во второй части обсудим технологию формирования диаграммы направленности и влияние мощности передатчика на выбор технологии его изготовления. Хотя формированию диаграммы направленности уделяется большое внимание в публикациях, не менее важен процесс преобразования сигналов для передачи их в диапазоне миллиметровых волн. Мы приведем пример преобразования сигналов для этой части системы и предложим некоторые новые компоненты от Analog Devices, представляющие интерес для разработчиков.

Томас Кэмерон (Thomas Cameron)
Перевод: Владимир Макаренко
Евгений Потемкин
eugeny.potemkin@eltech.spb.ru

Введение

Когда начиналась разработка стандарта 5G, 2020 год казался далеким. Теперь до 2020 года осталось совсем немного, и, по прогнозам, наступающее десятилетие будет десятилетием 5G. Каждый день в прессе появляется информация об испытаниях устройств и реклама будущих сетей 5G. Это очень волнующее время для индустрии беспроводных сетей. Сегодня отрасль 5G фокусируется в основном на улучшении мобильной широкополосной связи, направленной на увеличение пропускной способности сети с использованием методов формирования диаграммы направленности в средней и верхней области спектра частот. Появляются сообщения о применении систем 5G в промышленной автоматизации благодаря малой задержке сигналов в таких сетях.

Еще несколько лет назад шла дискуссия об использовании диапазона миллиметровых волн для мобильной связи и о проблемах, которые предстояло решить разработчикам радиоустройств [1]. Вскоре большую часть вопросов удалось прояснить, и начался быстрый прогресс в создании устройств для систем связи 5G — от начальных прототипов до успешных полевых испытаний, и теперь мы находимся на начальном этапе развертывания сетей 5G миллиметрового диапазона. Многие в фиксированной и мобильной связи сохранятся, но мы также увидим действительно мобильную связь на частотах миллиметрового диапазона в не столь отдаленном будущем.

Первые стандарты введены в действие, технологии быстро развиваются, и многое прояснилось в вопросах развертывания систем миллиметровых волн. Несмотря на значительный прогресс, разработчикам радиоаппаратуры еще предстоит решить немало сложных задач. Давайте рассмотрим некоторые из них.

Сценарии развертывания и особенности распространения радиоволн

При разработке технологии очень важно определить, как в конечном счете будет развернута система связи. На рис. 1 приведены примеры организации фиксированной и мобильной связи в диапазонах 39 и 28 ГГц в городской среде с плотной застройкой и пригороде, где плотность застройки намного меньше.

Формирование диаграммы направленности при использовании фиксированного беспроводного доступа (FWA — Fixed Wireless Access), обеспечивающего высокую пропускную способность каналов связи в пригородах, иллюстрирует рис. 1а. Базовая станция располагается на опоре линии электропередачи или на мачте и должна обеспечить покрытие большой территории, чтобы решение было экономически целесообразным. При такой организации оборудование потребителя находится вне здания, чтобы обеспечить наилучшие условия для связи.

Учитывая, что антенна базовой станции направлена вниз и расположение пользователей зафиксировано, не требуется большой угол охвата диаграммы направленности в вертикальной плоскости, но мощность передатчика должна быть довольно значительной — не менее 65 дБм EIRP (эффективная мощность излучения), чтобы обеспечить максимально широкую зону обслуживания существующей инфраструктуры.

На рис. 1б проиллюстрировано расположение базовой станции при плотной городской застройке. Базовая станция может находиться на крыше здания или на осветительной опоре, что потребует расширения угла охвата диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Это связано с тем,

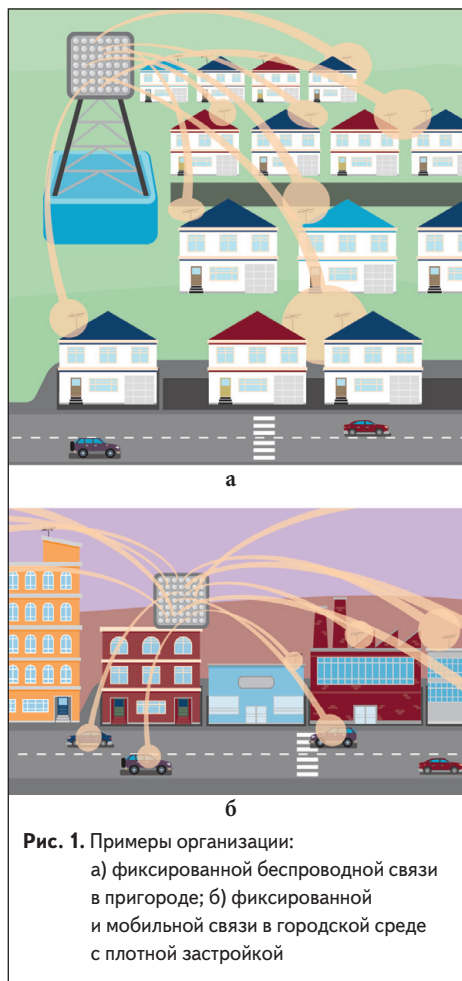


Рис. 1. Примеры организации:
а) фиксированной беспроводной связи в пригороде; б) фиксированной и мобильной связи в городской среде с плотной застройкой

что необходимо обслуживать мобильные устройства, расположенные на уровне земли (пешеходы и транспортные средства), а также устройства, размещенные в более высоких зданиях, чем то, на котором установлена базовая станция.

При такой конфигурации диаграммы направленности мощность передатчика, возможно, и должна быть меньше, но остекление многих построек вносит значительное затухание в сигнал, и поэтому однозначного ответа на данный вопрос нет. Основным выводом заключается в том, что не существует универсального решения. Сценарий развертывания сети 5G будет определять способ формирования диаграммы направленности антенны и выбор технологии связи.

Рассмотрим практический пример и получим простой бюджет связи, чтобы проиллюстрировать требования к мощности передатчика базовой станции миллиметровых волн, как показано в таблице. Дополнительные потери в тракте связи, по сравнению с потерями на частотах сотовых сетей, — серьезное препятствие, которое необходимо преодолеть при работе в диапазоне миллиметровых волн. Потери возникают при прохождении сигналов через стены зданий, листву, тела людей и другие препятствия.

Множество работ, опубликованных в последние годы, посвящено распространению сигналов в диапазоне миллиметровых волн. Превосходный обзор приведен в статье “Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a Focus on Propagation Models” [2]. В работе проведено сопоставление нескольких моделей, проиллюстрирована зависимость потерь в тракте от окружающей среды и сравнение сценариев, когда станция находится в поле зрения (Line Of Sight — LOS) и вне поля зрения (NLOS) приемника. Не вдаваясь в подробности, мы можем сказать, что в целом сценарий NLOS нужно рассматривать для фиксированной беспроводной связи, учитывая желаемую дальность связи и ландшафт местности.

Таблица. Пример реализации базовой станции 5G

Бюджетная связь на расстоянии 200 м в диапазоне 28 ГГц, полоса пропускания 800 МГц	Канал нисходящей связи (базовая станция)	Канал восходящей связи (пользователь)
Число элементов антенны	256	64
Полная мощность излучения, дБм	33	19
Коэффициент усиления антенны, дБ	27	21
Эффективная мощность изотропного излучения (EIRP), дБм	60	40
Потери тракта, дБ	135	135
Мощность сигнала в точке приема, дБм	-75	-95
Уровень теплового шума, дБм	-85	-85
Коэффициент шума приемника, дБ	5	5
Отношение сигнал/шум на входе приемника, дБ	5	-15
Усиление приемной антенны, дБ	21	27
Отношение сигнал/шум после приема с учетом усиления антенны	26	12

В качестве примера мы приводим базовую станцию с радиусом связи 200 м, расположенную в пригороде. Для данного случая диаграммы направленности мы приняли потери в тракте 135 дБ, предполагая, что приемная антенна расположена снаружи здания и находится вне поля зрения базовой станции. Если рассматривать расположение антенны внутри помещения, то потери в тракте возрастут не менее чем на 30 дБ. С другой стороны, если мы принимаем за основу сценарий LOS, то потери в тракте могут быть уменьшены до 110 дБ.

В нашем примере число элементов антенны базовой станции равно 256, а число элементов антенны пользователя — 64. Предполагается асимметричный способ организации связи. Базовая станция обеспечивает модуляцию 64QAM в нисходящем канале, а в восходящем канале используется модуляция 16 QAM.

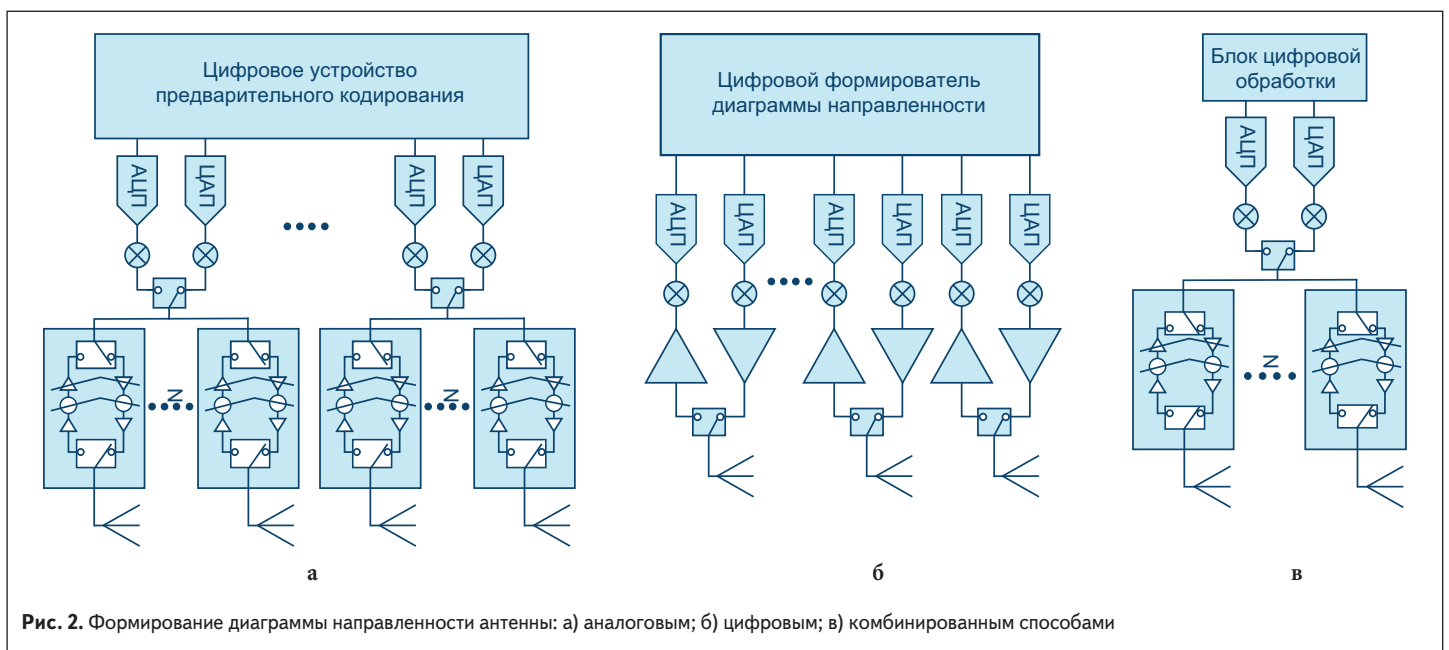
Канал восходящей связи может быть улучшен за счет увеличения мощности передатчика до разрешенных в данном регионе значений. При дальности связи 500 м потери тракта увеличиваются до 150 дБ, и для реализации такого сценария понадобятся более сложные устройства как в нисходящем, так и в восходящем канале. Кроме того, существенно возрастет потребление энергии.

Формирование диаграммы направленности в диапазоне миллиметровых волн

Теперь рассмотрим различные подходы к формированию диаграммы направленности антенны: аналоговый, цифровой и гибридный, как показано на рис. 2. Наверняка все знакомы с понятием аналогового способа формирования диаграммы направленности, поскольку в последние годы эта тема была довольно популярна в литературе.

В режиме передачи цифровые сигналы с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) преобразуются в аналоговые, которые затем преобразуются в сигналы ВЧ или ПЧ с использованием повышающих преобразователей частоты. В режиме приема преобразователи осуществляют понижение частоты принимаемых сигналов, преобразование их в цифровую форму с помощью АЦП и передачу в блок цифровой обработки.

В радиочастотном диапазоне (например, 28 ГГц) мы разделяем один канал на несколько подканалов, управляя фазой сигнала в каждом из них так, чтобы диаграмма направленности формировалась в дальнем поле в направлении предполагаемого пользователя (как в режиме передачи, так и в режиме приема). Это позволяет управлять одним лепестком диаграммы



направленности в каждом канале данных. Теоретически при использовании такой архитектуры мы можем обслуживать одного пользователя в каждый момент времени.

Цифровой формирователь диаграммы направленности реализует тот же принцип, но фазовый сдвиг сигналов осуществляется в цифровой форме (рис. 2б). Затем цифровые сигналы с различной задержкой подаются на ЦАП, с их помощью преобразуются в аналоговые, которые через повышающие преобразователи и усилители мощности (в режиме передачи) направляются на элемент антенны. В режиме приема сигнал от этого элемента антенны через малошумящий усилитель, понижающий преобразователь и АЦП вводится в блок цифровой обработки. Проще говоря, каждый приемопередатчик связан с элементом одиночной антенны. Но на практике к одному приемопередатчику может быть подключено несколько элементов антенны, в зависимости от желаемой формы сектора диаграммы направленности.

Цифровой подход обеспечивает наивысшую пропускную способность и гибкость системы, а также позволяет применить многопользовательскую систему ММО в диапазоне миллиметровых волн, аналогично системам, работающим в средней полосе частот. Его реализация достаточно сложна, а учитывая доступные в настоящее время технологии и элементную базу, это приводит к значительному энергопотреблению как в радиочастотных, так и в цифровых цепях. Тем не менее по мере дальнейшего развития технологий цифровое формирование диаграммы направленности будет использоваться и в диапазоне миллиметровых волн.

Самый практичный и эффективный подход к формированию диаграммы направленности в ближайшем времени — гибридный цифро-аналоговый формирователь (рис. 2в), который, по существу, объединяет цифровое предварительное кодирование и аналоговое формирование диаграммы направленности, чтобы создать несколько лепестков в пространстве одновременно (пространственное мультиплексирование).

Путем фокусирования узких лепестков диаграммы в направлении предполагаемых пользователей базовая станция может повторно применять один и тот же частотный диапазон для одновременного обслуживания нескольких пользователей на заданном временном интервале. Хотя в литературе сообщается о нескольких различных подходах к построению гибридных формирователей, показанный здесь подход с использованием подрешеток наиболее практичен с точки зрения реализации и, по сути, является повторением аналоговых формирователей диаграммы направленности. В настоящее время системы, о которых идет речь, на практике поддерживают 2–8 цифровых потоков, используемых для одновременной поддержки отдельных пользователей или, в качестве альтернативы, для предоставления двух или более уровней ММО меньшему количеству пользователей.

Теперь немного углубимся в выбор технологий для построения аналогового формирователя диаграммы направленности, базового блока, на основе которого строится гибридный формирователь диаграммы направленности, как показано на рис. 3. Для этого мы разделили аналоговую систему формирования диаграммы направленности на три блока: цифровой, блок

преобразования цифрового сигнала в аналоговый сигнал миллиметрового диапазона и собственно формирователь диаграммы направленности. Это не тот способ, с помощью которого реализуется система на практике. Все компоненты высокочастотной части системы будут размещены в непосредственной близости друг от друга, чтобы уменьшить потери, но причина такого разделения вскоре станет очевидной.

Способ построения формирователя диаграммы направленности определяется многими факторами, включая форму и радиус действия сегмента, уровень мощности, потери в тракте, тепловые шумы и т. д. При реализации системы связи могут понадобиться различные уровни мощности передачи, необходимые для решения сценариев развертывания, начиная от небольших сот и заканчивая макросотом.

В то же время преобразование цифровых сигналов в аналоговые сигналы миллиметрового диапазона волн на базовой станции требует намного меньше усилий и может быть реализовано на базе текущей спецификации для базовых станций [3]. Другими словами, разработчик может снова использовать один и тот же приемопередатчик вместе с несколькими конфигурациями формирователя диаграммы направленности. Это немногим отличается от современных систем сотовой радиосвязи, где малосигнальная часть системы является общей для всех платформ, а внешний интерфейс приспособлен для каждого случая использования.

Мы наметили прогресс возможных технологий для преобразования цепочки сигналов при переходе от цифрового сигнала к сигналу в антенне. Безусловно, цифровой и смешанный

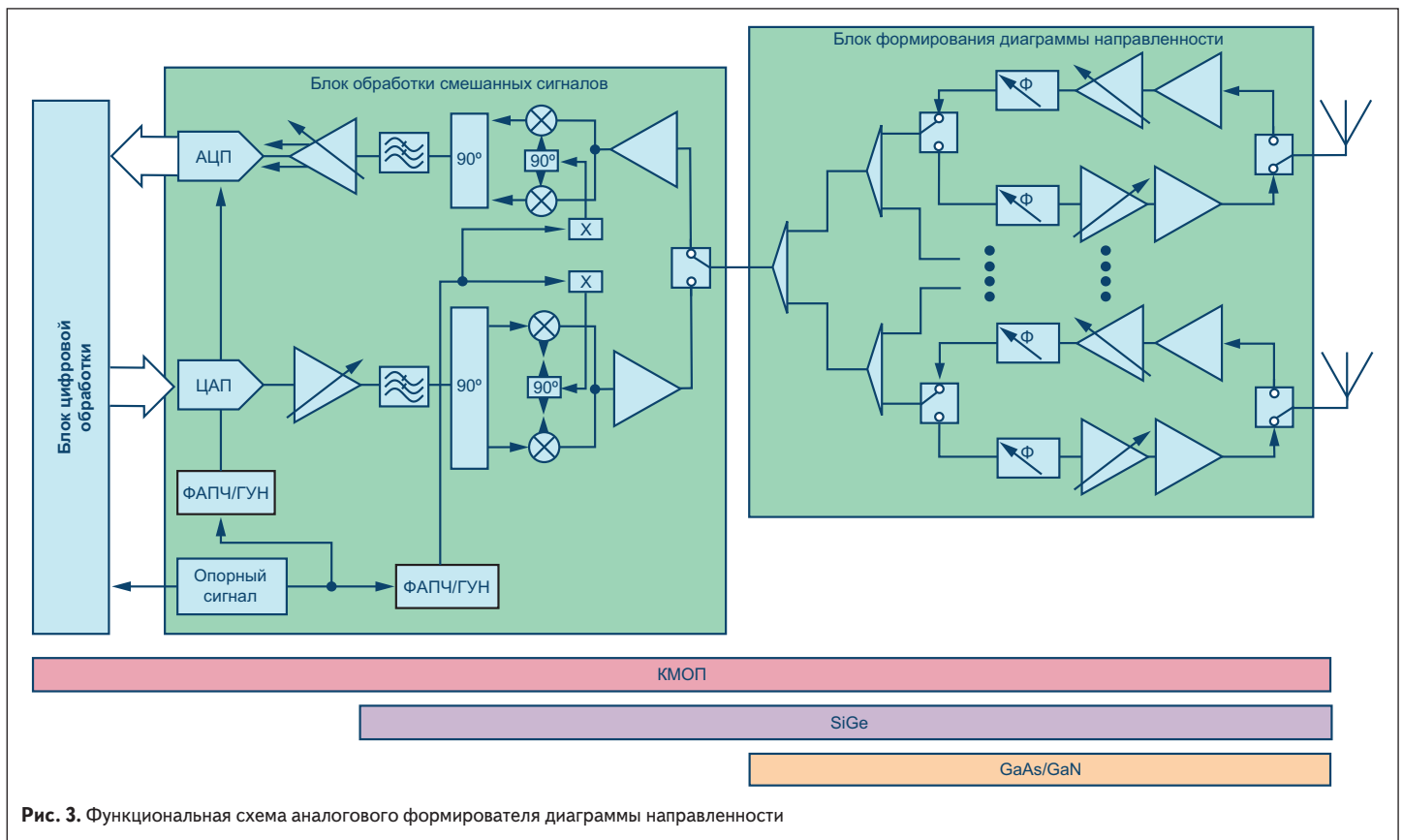


Рис. 3. Функциональная схема аналогового формирователя диаграммы направленности

сигналы формируются с помощью КМОП-устройств. В зависимости от требований базовой станции вся цепочка узлов для обработки сигнала может быть разработана с помощью КМОП-технологии или, что более вероятно, с использованием сочетания технологий для обеспечения оптимальной производительности. Например, обычной конфигурацией является применение КМОП-преобразователей данных совместно с высокопроизводительным преобразованием ПЧ в ВЧ на основе технологии SiGe. Как будет показано далее, формирователь диаграммы направленности может быть реализован на основе нескольких технологий, согласно системным требованиям. В зависимости от выбора размера антенны и требований к мощности передатчика возможна реализация формирователя на одном кремниевом кристалле, или это может быть комбинация интегрального формирователя диаграммы направленности с дискретными усилителями мощности и малошумящими усилителями.

Анализ взаимосвязи между мощностью передатчика и выбором технологии представлен в работах [4, 5] и не будет здесь повторяться. Однако чтобы подвести итог этого анализа, мы включили для иллюстрации график на рис. 4. Выбор технологии усилителя мощности основан на комбинированном учете требуемой мощности передатчика, усиления антенны (количества элементов антенны) и возможности формирования сигнала необходимой мощности.

Как показано на графике, требуемая излучаемая эффективная мощность может быть достигнута с помощью меньшего количества элементов антенны с применением технологий II-V во внешнем интерфейсе (подход с низкой интеграцией) или с использованием подхода с высокой интеграцией на основе кремния. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, а практическая реализация сводится к инженерному компромиссу габаритов, массы, энергопотребления и стоимости. Чтобы сгенерировать сигнал мощностью 60 дБм для случая, приведенного в таблице 1, анализ, выполненный в презентации “Architectures and Technologies for the 5G mm Wave Radio” [5], показал, что оптимальный размер антенны составляет 128–256 элементов. При этом меньшему числу элементов антенны соответствует использование усилителя мощности на основе технологии GaAs, в то время как большему числу элементов антенны — полностью интегрированное решение на основе кремниевой технологии формирования диаграммы направленности.

Теперь давайте рассмотрим проблему с другой точки зрения. Эффективная мощность 60 дБм обычно указывается для фиксированной радиосвязи. Но это число может быть больше или меньше в зависимости от желаемого радиуса действия базовой станции и состояния окружающей среды. Принимая во внимание большие различия в сценариях развертывания, независимо от того, много ли на территории зеленых насаждений, состоит ли она из узких улиц или широких открытых пространств, будет иметь место большой разброс потерь

в радиоканале, с которыми приходится бороться в каждом конкретном случае. Например, в плотной городской застройке, где предполагается прямая видимость базовой станции, величина эффективной мощности может составлять всего 50 дБм.

Существуют определения и опубликованы спецификации, а также пределы мощности передачи, рекомендованные FCC (Федеральная комиссия связи США) по классам оборудования [3, 6], и здесь мы следуем терминологии 3GPP для базовых станций [3]. Как показано на рис. 5, класс оборудования в какой-то степени определяет выбор технологии для создания усилителя мощности. Хотя это и не является точной наукой, мы видим, что технология КМОП хорошо подходит для реализации мобильного пользовательского оборудования (мобильного телефона) и при относительно низком количестве антенн позволяет до-

стичь необходимой мощности передатчика. Оборудование этого типа должно иметь высокую степень интеграции и быть энергоэффективным. Локальная базовая станция для малых сот и пользовательское оборудование имеют схожие требования и охватывают целый ряд технологий: от КМОП для низкого уровня требований к мощности передатчика до сочетания SiGe и КМОП для более высокого уровня мощности. Для базовых станций среднего радиуса действия идеальна технология SiGe и КМОП, позволяющая реализовать компактный форм-фактор. На верхнем уровне, для базовых станций глобальной сети, существует ряд технологий, которые могут быть применены, и это сводится к компромиссу размера антенны и стоимости технологии. Хотя SiGe и КМОП можно применять в диапазоне мощности 60 дБм, усилители мощности GaAs или GaN более практичны для высокой мощности.

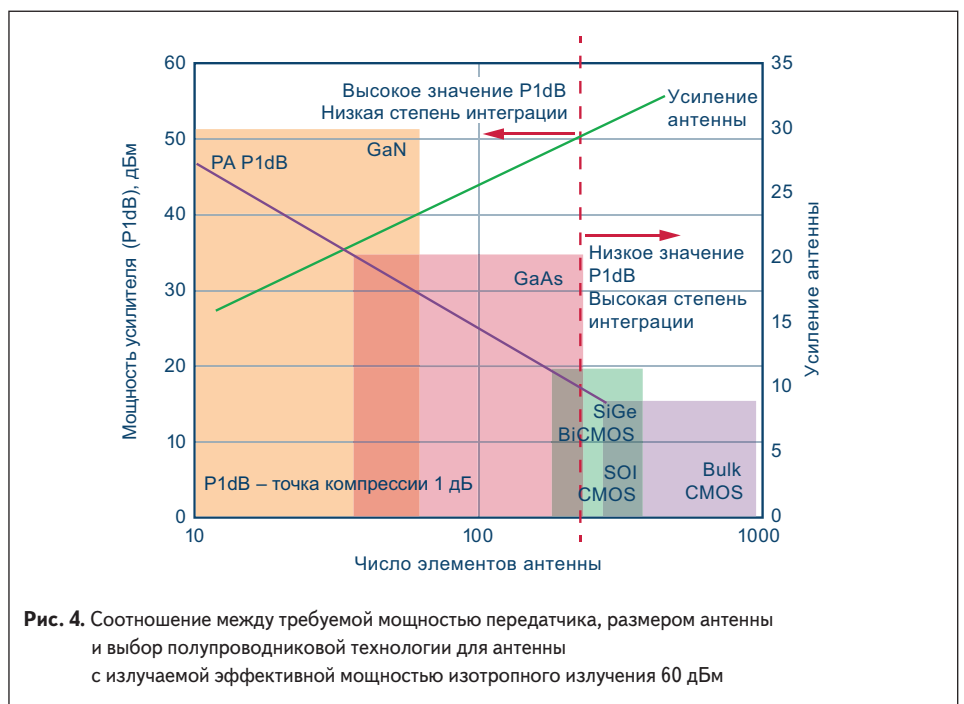


Рис. 4. Соотношение между требуемой мощностью передатчика, размером антенны и выбор полупроводниковой технологии для антенны с излучаемой эффективной мощностью изотропного излучения 60 дБм

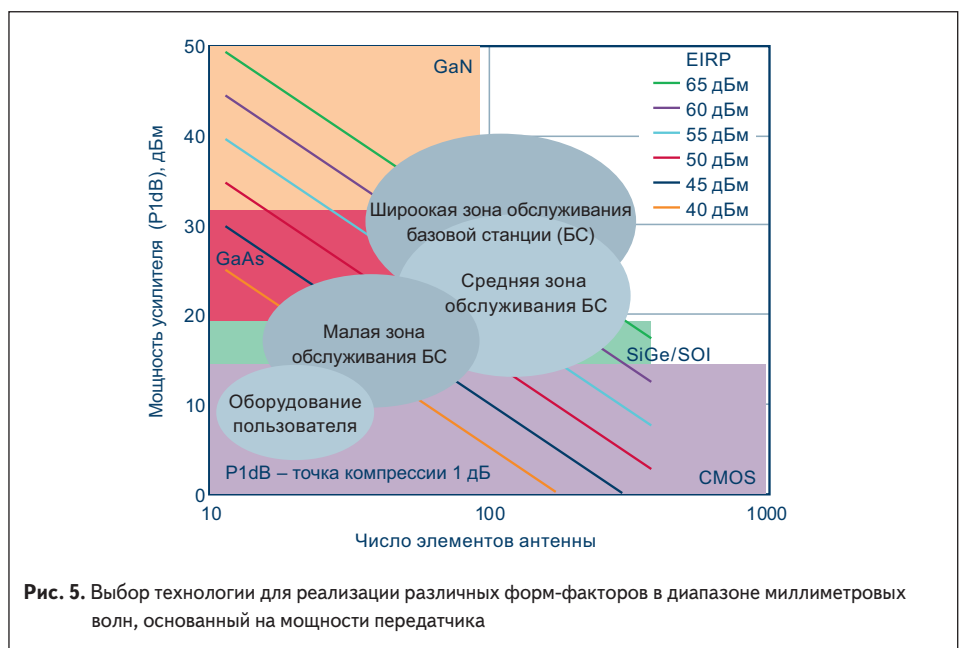


Рис. 5. Выбор технологии для реализации различных форм-факторов в диапазоне миллиметровых волн, основанный на мощности передатчика

На рис. 5 показано, как продолжают совершенствоваться существующие технологии. Как упоминалось в презентации “Architectures and Technologies for the 5G mmWave Radio” [5], одной из ключевых задач для разработчика является снижение энергопотребления усилителями мощности миллиметрового диапазона.

По мере появления новых технологий и архитектуры усилителей мощности приведенные на рис. 5 кривые будут смещаться, и для базовых станций высокой мощности будут доступны более высокоинтегрированные структуры. Хороший обзор достижений в технологии изготовления усилителей мощности представлен в презентации “A Short Survey on Recent Highly Efficient cmWave 5G Linear Power Amplifier Design” [7].

Подводя итог разделу о формирователях диаграммы направленности, давайте еще раз вспомним, что в настоящее время не существует универсального подхода к построению таких устройств и необходимо разрабатывать различные внешние интерфейсы для разных вариантов использования в зависимости от назначения устройства.

Радиотракт миллиметровых волн: от цифрового сигнала к ВЧ-сигналу миллиметрового диапазона и обратно

В этом разделе рассмотрим более подробно способы построения радиотрактов для преобразования цифровых сигналов в ВЧ-сигналы диапазона миллиметровых волн и для реализации обратного преобразования. Очень важно осуществлять цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразование с высокой точностью, чтобы в последующих системах можно было реализовать методы модуляции высокого порядка, такие как 64 QAM и, возможно, 256 QAM. Одна из главных проблем для новых систем связи — пропускная способность. Системы 5G, работающие в диапазоне

миллиметровых волн, должны обеспечивать полосу пропускания 1 ГГц или даже шире в зависимости от того, какие требования к каналу передачи информации формируются на практике. В то время как полоса пропускания 1 ГГц в диапазоне 28 ГГц характеризует сравнительно низкую относительную пропускную способность (3,5%), та же самая полоса пропускания в диапазоне 3 ГГц реализуется намного более сложно и требует новых технологических и конструктивных решений.

На рис. 6 приведена функциональная схема преобразования цифровых сигналов в ВЧ-сигналы миллиметрового диапазона, выполненная на широкополосных компонентах компании Analog Devices, предназначенных для обработки смешанных сигналов.

Эта сигнальная цепочка позволяет осуществлять обработку высокочастотных сигналов в полосе частот 800 МГц диапазона 28 ГГц, обеспечивая чрезвычайно низкий уровень вектора ошибки. Подробнее об этой сигнальной цепочке и ее характеристиках можно узнать из видео Analog Devices “5G Millimeter Wave Base Station” [8].

Итак, рассмотрим преобразователи сигналов. В примере на рис. 6 входной ВЧ-сигнал преобразуется в промежуточную частоту (ПЧ), чье значение выбирают в диапазоне частот до 3 ГГц (в некоторых случаях выше), исходя из сложности реализации фильтра промежуточной частоты (ФПЧ) и АЦП. Преобразование в цифровой код с помощью АЦП осуществляется на промежуточной частоте. Для работы на таких высоких частотах компания Analog Devices выпускает аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Кратко опишем их характеристики.

AD9172 — высокоэффективный сдвоенный 16-разрядный ЦАП с цифровой обработкой сигналов и максимальной частотой дискретизации 12,6 ГГц. ЦАП имеет 8-разрядный порт JESD204B, обеспечивающий скорость передачи данных 15 Гбит/с, и встроенный умножитель

частоты тактового сигнала. Поддерживает работу с многополосными широкополосными сигналами в диапазоне до 6 ГГц.

В приемном тракте используется сдвоенный 14-разрядный АЦП AD9208 с максимальной частотой дискретизации 3 ГГц. АЦП имеет встроенные буферные усилители и устройства выборки/хранения, что упрощает работу с устройством. Полоса пропускания аналоговой части не менее 9 ГГц. Это позволяет обрабатывать аналоговые сигналы с шириной полосы частот до 4,5 ГГц.

Как в приемной, так и в передающей части используются широкополосные усилители с цифровым управлением, которые осуществляют не только усиление сигналов, но и преобразование несимметричного сигнала в симметричный и наоборот, благодаря чему можно обойтись без симметрирующих устройств. На функциональной схеме (рис. 6) в передающем тракте использован усилитель ADL5335, а в приемном — ADL5569.

Для формирования сигнала промежуточной частоты в приемном тракте установлен понижающий преобразователь ADMV1014, а в передающем — повышающий ADMV1013. Эти преобразователи предназначены для работы в диапазоне 24,5–43,5 ГГц. Такая широкая рабочая полоса частот предусматривает их использование во всех определенных в настоящее время диапазонах частот 5-мм волн (диапазоны 3GPP n257, n258, n260 и n261).

И тот и другой преобразователь поддерживают работу с ПЧ до 6 ГГц и два режима преобразования частоты. Как показано на рис. 6, оба устройства содержат встроенный 4-кратный умножитель частоты, частота на входе которого может изменяться в пределах 5,4–11,75 ГГц. ADMV1013 поддерживает как прямое преобразование из I/Q-составляющих в ВЧ-сигнал, так и преобразование в сигнал с одной боковой полосой. Коэффициент усиления преобразователя 14 дБ, уровень интермодуляционных искажений тре-

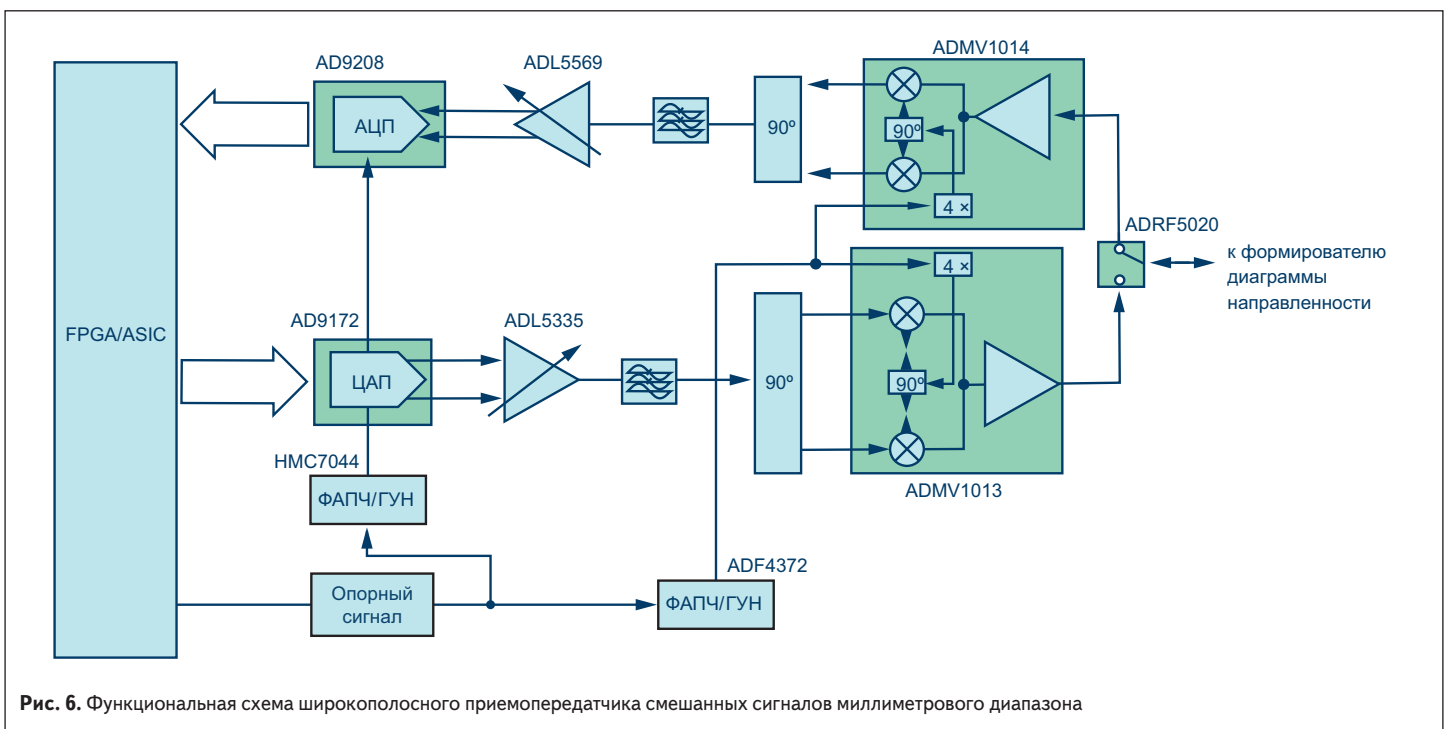


Рис. 6. Функциональная схема широкополосного приемопередатчика смешанных сигналов миллиметрового диапазона

тьего порядка IP3 24 дБм. При формировании однополосного сигнала вторая боковая полоса ослабляется не менее чем на 25 дБ.

ADMV1014 поддерживает преобразование ВЧ-сигналов с одной и двумя боковыми полосами в составляющие I/Q с понижением частоты. Коэффициент преобразования 20 дБ, коэффициент шума 3,5 дБ, уровень интермодуляционных искажений третьего порядка IP3 составляет –4 дБм, подавление боковой полосы 28 дБ.

Коммутацию антенны в режимах передачи/приема осуществляет широкополосный переключатель ADRF5020, отличающийся низкими потерями (не более 2 дБ) и большим переходным затуханием — 60 дБ на частоте 30 ГГц.

И наконец, рассмотрим источник сигналов стабильной частоты. Учитывая, что задающий генератор вносит большой вклад в значение вектора ошибки, в диапазоне миллиметровых волн в качестве гетеродина важно использовать источник сигналов с очень низким фазовым шумом. ADF4372 — это широкополосный синтезатор на основе системы ФАПЧ с дробным коэффициентом деления, который имеет лучшие в отрасли параметры. Интегрированный генератор, управляемый напряжением (ГУН), со сверхнизким фазовым шумом обеспечивает работу синтезатора в диапазоне частот 62,5 МГц — 16 ГГц. Спектральная плотность фазового шума ГУН на частоте 8 ГГц составляет –111 дБн/Гц при отклонении от центральной частоты на 100 кГц и –134 дБн/Гц — при отклонении 1 МГц.

Для любого разработчика функциональная схема, приведенная на рис. 6, служит хорошей отправной точкой с учетом особенностей работы

в диапазонах частот 28 и 39 ГГц. Она пригодна для использования в системах с различными вариантами формирования диаграммы направленности антенны, требующими применения широкополосных приемопередатчиков. Компания Analog Devices предлагает большое число компонентов (RF, Microwave, and Millimeter Wave Products Selection Guide /), предназначенных для работы в частотных диапазонах миллиметровых волн.

Выводы

В последние годы значительного прогресса добились разработчики систем и устройств, предназначенных для эксплуатации в диапазонах миллиметровых волн и прошедших путь от лабораторных образцов до полевых испытаний и коммерческого развертывания таких систем в ближайшие месяцы. Развитие таких систем связи при различных вариантах их использования требует гибкого подхода к построению систем формирования диаграммы направленности антенн. Для реализации этих задач существуют различные технологии и методы. Преобразование широкополосных сигналов в цифровой код и обратно предполагает внедрение передовых технологий. Технологии на основе кремния быстро развиваются для удовлетворения растущих требований при обработке смешанных сигналов. В статье представлен пример реализации устройства для обработки смешанных сигналов, лежащих в диапазоне миллиметровых волн, на основе современных компонентов.

Поскольку экосистема 5G продолжает развиваться, Analog Devices будет совершенствовать свои передовые технологии и решения для обработки сигналов, чтобы помочь клиентам

создавать различные системы для новых рынков систем 5G, функционирующих в диапазонах миллиметровых волн. ■

Литература

1. Cameron T. 5G Opportunities and Challenges for the Microwave Industry // *Microwave Journal*. 2016. February 12.
2. Rappaport T. S., Xing Y., MacCarthy G. R., Jr., Molisch A. F., Melios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—with a Focus on Propagation Models // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. November 2017. Special Issue on 5G.
3. 3GPP 38.104 technical specification. Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (Release 15).
4. Cameron T. RF Technology for the 5G Millimeter Wave Radio. Analog Devices, Inc., November 2016.
5. Cameron T. Architectures and Technologies for the 5G mmWave Radio. ISSCC 2018, Session 4, mmWave Radios for 5G and Beyond, February 2018.
6. Fact Sheet: Spectrum Frontiers Proposal to Identify, Open up Vast Amounts of New High Band Spectrum for Next-Generation (5G) Wireless Broadband.
7. Lie D. C., Mayeda J., Lopez J. A Short Survey on Recent Highly Efficient cm-Wave 5G Linear Power Amplifier Design. 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Boston, MA, August 2017.
8. 5G Millimeter Wave Base Station. Analog Devices, Inc.