

# ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ СЕТЕЙ 5G, КОНТРОЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ, А ТАКЖЕ СПЕЦПРИМЕНЕНИЙ

До недавнего времени обработка сигналов с частотой более нескольких десятков МГц была весьма затруднительной, и зачастую для этого требовались дорогостоящие решения, основанные на громоздких параллельных радиосистемах. В связи с этим уже давно назрела необходимость упрощения данной технологии и использования метода одновременной обработки максимально возможной полосы пропускания. Такие продукты, как AD9213, предоставляют возможность высокоточной оцифровки сигналов с частотой намного выше 2 ГГц, что делает этот АЦП идеальным кандидатом для применения в системах, где требуется широкая мгновенная полоса пропускания, в том числе в осциллографах, анализаторах спектра и широкополосных/многополосных радиосистемах.

## ВВЕДЕНИЕ

С момента развития радиоэлектроники одним из самых больших препятствий для разработчиков радиосистем было ограничение полосы пропускания. Сначала первопроходцы в этой области считали, что частоты выше нескольких сотен кГц не представляют никакого интереса из-за ограниченного детектора. Такие пионеры в области радиоэлектроники, как Бранли, Фессенден, Маркони, и многие другие пытались бороться с этим явлением, пока Армстронг и Леви не усовершенствовали гетеродинную структуру, открыв доступ к более высоким частотам спектра благодаря преобразованию с понижением частоты до таких частот, с которыми могли работать детекторы того времени. Хотя благодаря гетеродинам стали доступны более высокие частоты, полоса пропускания все еще была относительно ограниченной.

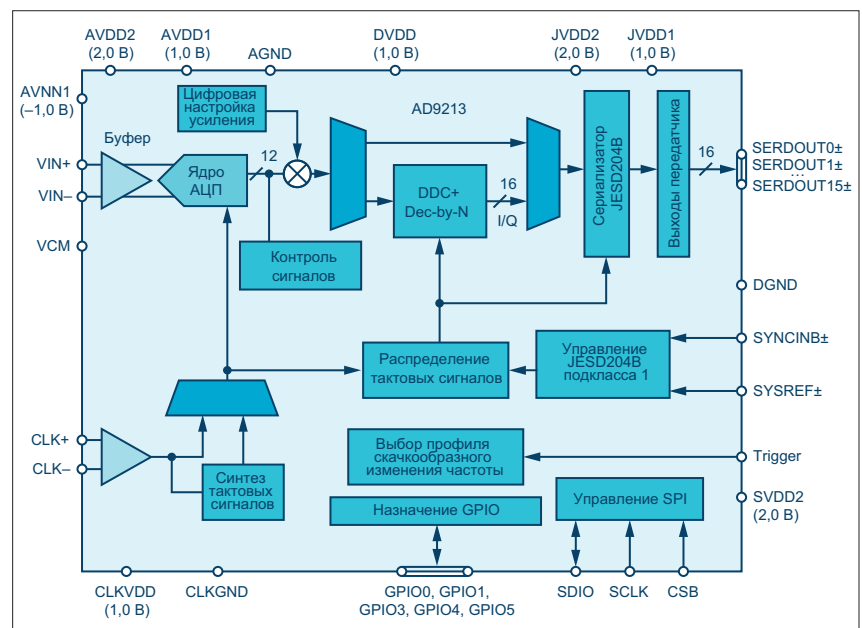
До недавнего времени обработка сигналов с частотой, превышающей несколько десятков МГц, была весьма затруднительной, и для этого требовались дорогостоящие решения, основанные на громоздких параллельных радиосистемах. В связи с этим уже давно назрела необходимость упрощения этой технологии и использования метода одновременной обработки максимально возможной полосы пропускания. В течение последних десятилетий эту потребность постепенно удавалось удовлетворять по мере развития процессов производства полупроводников и архитектур

монолитных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Если взять временной промежуток от скромных начинаний в начале 90-х до сегодняшнего дня, то можно сказать, что возможности прямого преобразования (дискретизации) ВЧ-сигналов АЦП увеличились примерно с 20-МГц полосы Найквиста более чем до 5 ГГц благодаря созданию таких продуктов, как AD9213.

С появлением AD9213 (рис. 1) с широкой мгновенной полосой пропускания открывается множество новых возможностей для инженеров, разрабатываю-

щих не только приемники для контрольно-измерительной аппаратуры, но и радиостанции с прямым преобразованием ВЧ-сигналов, оборудование радиоэлектронной разведки и радары.

Стандартные высокоскоростные АЦП представляют сложность в вопросе достижения высоких рабочих характеристик всей системы, поскольку состоят из нескольких ядер АЦП, которые работают параллельно с целью повышения полной частоты дискретизации. Каждый из этих преобразователей должен быть тщательно синхронизи-



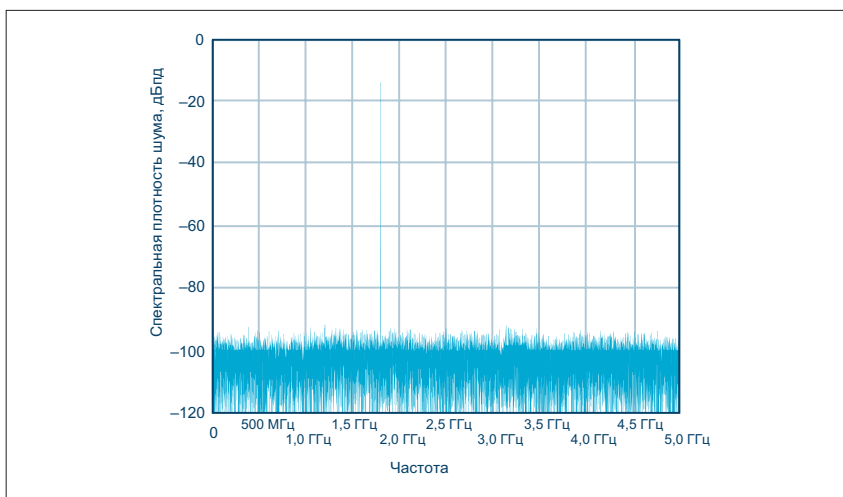
▲ Рис. 1. 12-разрядный ВЧ АЦП AD9213 со скоростью 10,25 GSPS

зирован и согласован, и даже в таком случае небольшие ошибки между преобразователями приводят к появлению различных артефактов спектра [1–3]. Кроме того, АЦП должны точно отслеживать аналоговые входные сигналы и с высокой точностью дискретизировать и оцифровывать их, чтобы не допустить нормальное линейное искажение. АЦП с чередованием и неиспользуемая полоса пропускания представляют собой две задачи, которые значительно усложняют разработку широкополосных АЦП для приложений, где требуется высокая точность, например, для современных радиосистем и контрольно-измерительного оборудования.

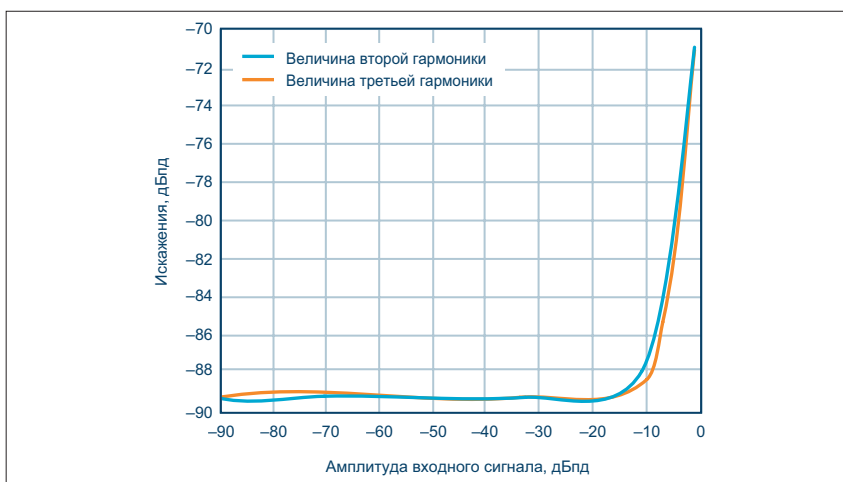
AD9213 справляется с этими задачами благодаря высокой линейности при любых значениях сигнала, которая достигается за счет реализации в микросхеме функций дизеринга и калибровки, что позволяет работать с высокочастотными сигналами с высокой точностью. При входном непрерывном сигнале с частотой 4 ГГц спектральная плотность шума составляет  $-152$  дБпд/Гц (дБпд — децибел полного диапазона) (рис. 2), а динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, как правило, лучше 65 дБн, включая вторую и третью гармоники. Эти характеристики приемлемы для создания приемников контрольно-измерительного оборудования для сетей 5G.

В дополнение к высоким характеристикам, достигаемым на высоких частотах, поведение гармоник низкого порядка примерно соответствует тому, что можно было бы ожидать от линейного устройства. То есть гармоники ведут себя в соответствии с математической моделью простого полинома, что нехарактерно для АЦП [4]. Это важно, поскольку такое свойство позволяет одинаково эффективно работать как с большими, так и малыми сигналами.

Как показано на рис. 3, вторая и третья гармоники соответствуют спрогнозированному переходному процессу, основанному на уровне входного сигнала, и после достижения минимального уровня шума измерения больше не возникают никаких изменений при более низких входных уровнях. Это позволяет расположить такие доминирующие паразитные составляющие вне полосы при выборе частотного плана. Паразитные составляющие четвертого порядка и выше не играют большой роли. В гетеродинных структурах необходимо тщательно планировать паразитные составляющие ВЧ-смесителя, чтобы избежать появления помех. То же самое верно и для структур с прямым преобразованием ВЧ-сигнала.



▲ Рис. 2. Спектральная плотность шума



▲ Рис. 3. Кривые второй и третьей гармоник AD9213

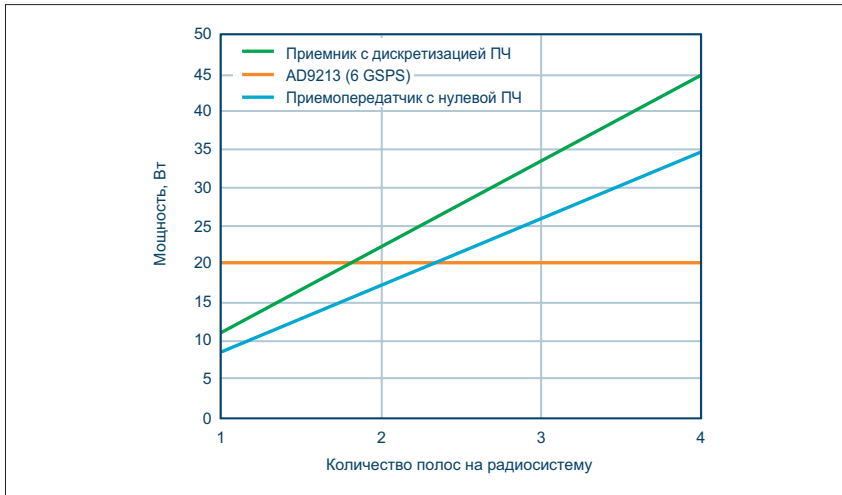
### ГДЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНА СТРУКТУРА С ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ВЧ-СИГНАЛА?

Структура с прямым преобразованием ВЧ-сигнала является интересной альтернативой другим радиоархитектурам. Исторически сложилось так, что мощность преобразователя данных должна была быть очень высокой, чтобы достичь характеристик, подходящих для создания радиосистем. Предыдущие исследования показали, что для недорогих маломощных решений предпочтительны радиоархитектуры с нулевой ПЧ, такие как AD9371. Доказательством этому послужило то, что со временем все серийные сотовые телефоны, решения Bluetooth и аналогичные устройства перешли на данную архитектуру. Это системы с ограниченной полосой пропускания, но не обязательно с ограниченными рабочими характеристиками. Для систем, которым требуется произвольно узкая полоса пропускания, архитектура с нулевой ПЧ почти всегда будет оптимальным решением. Но в системах, где требуется произвольно широкая полоса пропускания, например, в измерительных приборах, радарх и системах широ-

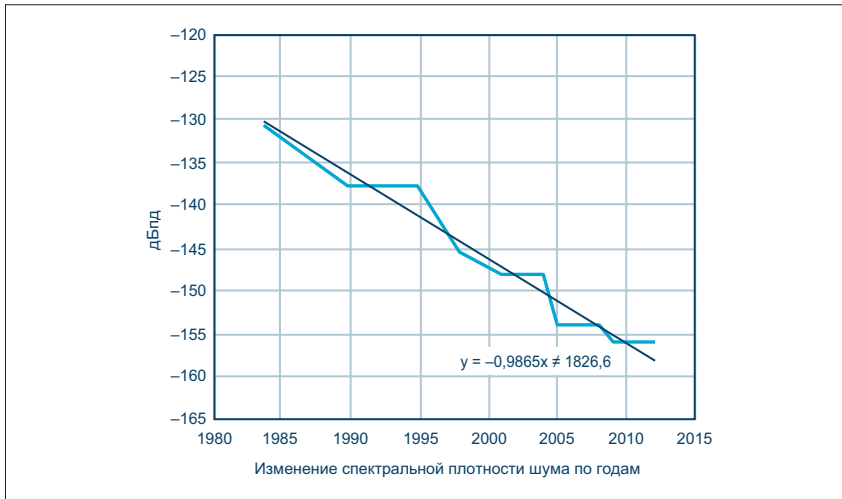
кополосной связи, архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала уже давно стала желанным вариантом. В этих системах подразумевается, что присущие другим архитектурам низкая стоимость и высокая энергоэффективность приносятся в жертву в угоду более широкой полосе пропускания системы.

Следовательно, если выбрана архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала, то она предназначена для охвата максимально широкой полосы пропускания с целью обеспечения высоких рабочих характеристик радиосистемы. Новые ВЧ АЦП, такие как AD9213, разработаны для обеспечения сверхбыстрой частоты дискретизации более 10 GSPS и полосы дискретизации более 8 ГГц, что позволяет реализовать архитектуру прямого преобразования ВЧ-сигнала во многих системах.

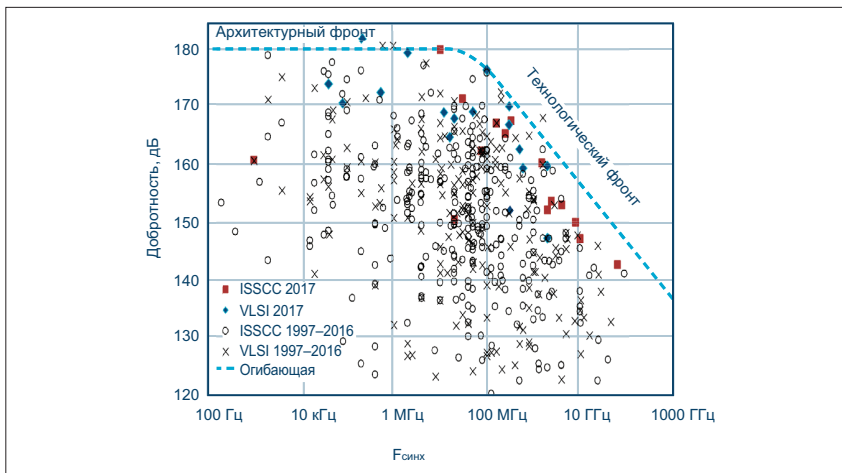
Многим службам радиосвязи выделено менее 75 МГц на полосу. При использовании АЦП со скоростью 10 GSPS эффективное применение спектра составит менее 2% от ширины полосы Найквиста. Согласно нескольким исследованиям, энергоэффективность архитектуры прямого преобразования ВЧ-сигнала



▲ Рис. 4. Зависимость энергопотребления от ширины полосы пропускания в зависимости от архитектуры для четырех трактов приема



▲ Рис. 5. История изменения спектральной плотности шума высокоскоростных преобразователей



▲ Рис. 6. График зависимости добротности от частоты преобразования

примерно в два раза ниже, чем у архитектуры с нулевой ПЧ. Для повышения общей эффективности в радиосистемах архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала имеет возможность дискретизации сигналов более чем одной полосы за раз.

На рис. 4 показано, что традиционные архитектуры, в частности архитектура с дискретизацией ПЧ и архитектура

с нулевой ПЧ, потребляют значительно меньше энергии в узкополосном диапазоне по сравнению с архитектурой прямого преобразования ВЧ-сигнала. Только когда вы приближаетесь к ширине полосы пропускания, которая будет равна как минимум двум полосам решений с дискретизацией ПЧ или с нулевой ПЧ, будет заметно преимущество архитектуры прямого преобразования ВЧ-

сигнала в плане энергоэффективности. Иными словами, архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала по сравнению с решением с нулевой ПЧ или с дискретизацией ПЧ при работе в системах с ограниченной полосой пропускания будет рассеивать мощность, более чем в два раза превышающую рассеиваемую мощность любого другого решения, а также будет стоить вдвое дороже.

За последние три десятилетия спектральная плотность шума уменьшалась примерно на 1 дБ в год согласно измерениям характеристик коммерческих устройств, и этот показатель был немного лучше по результатам академических исследований [5]. В этот период основное внимание уделялось характеристикам переменного сигнала, в том числе ширине полосы пропускания и отношению сигнал/шум. Тем не менее за последние несколько лет рабочие характеристики преобразователей достигли точки, в которой они оптимальны для большинства систем, и теперь акцент начал смещаться в область вопросов, связанных с рассеиванием мощности и площади кремниевых структур (стоимости) (рис. 5).

На рис. 6 представлен график, на котором по горизонтальной оси отложена частота дискретизации, а по вертикальной оси — добротность. Каждый год разрабатываются более быстрые преобразователи. Устройства, которые в данный момент находятся на острие развития технологий, как правило, являются передовыми в плане частоты дискретизации и исторически имеют более высокое энергопотребление и более низкую добротность. После того как технический прогресс преодолевает рубеж конкретной частоты дискретизации, новые устройства с этой частотой будут обладать более высокой добротностью, а также меньшим энергопотреблением, меньшими размерами кристалла и меньшей стоимостью по сравнению с уже другими более инновационными устройствами. Согласно последнему анализу Б. Мурманна, преобразователь AD9213 находится на технологическом рубеже, а значит, последующие преобразователи этого класса будут иметь меньшее энергопотребление и другие преимущества.

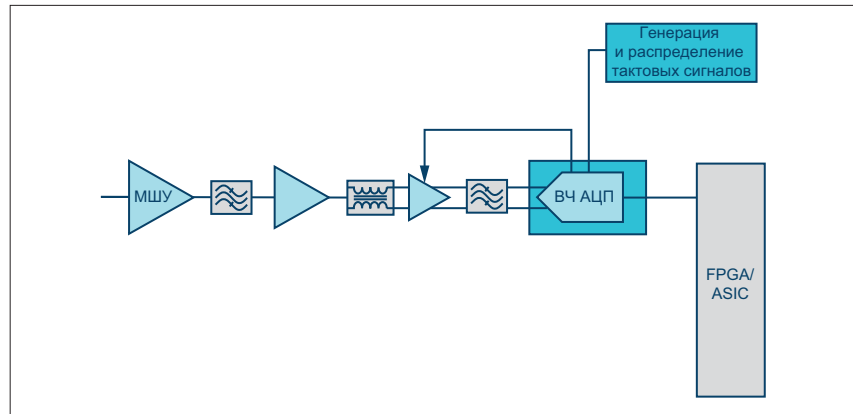
Данная тенденция приводит к весьма интересному факту. Поведение ВЧ-мощности во входном каскаде определяется физикой, которая переносит мощность от антенного разъема на вход АЦП и, таким образом, не является эластичной в том смысле, в каком закон Мура определяет цифровую функциональность. Таким образом, по мере того как мощность и, следовательно, энергопотребление преобразователя продолжают падать в течение следующих нескольких поколений, основными потребителями

мощности будут усилители, и их рассеиваемая мощность останется примерно такой же, как сегодня, когда энергопотребление АЦП, в том числе интерфейса, начнет значительно уменьшаться.

На рис. 7 показана базовая архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала, состоящая из цепочки усилителей и соответствующей схемы фильтрации. Как и ожидалось, здесь нет каскадов преобразования частоты, только усилители, используемые для увеличения уровней сигнала, необходимых для преодоления порога шума в самом АЦП, и ВЧ-фильтры для предотвращения нежелательного наложения спектров внутри самого преобразователя.

Что касается фильтрации, здесь существует два подхода. Во-первых, можно использовать наиболее широкополосный фильтр, стараясь предотвратить наложение спектров. Например, создать широкополосный фильтр, который будет охватывать до 80% полосы Найквиста и сможет покрывать первую или вторую зоны Найквиста с поддержанием высоких характеристик. В большинстве случаев было бы неразумно иметь полосу пропускания, которая пересекает зоны Найквиста из-за наложения спектров, но есть случаи, когда это уместно в точно определенных ситуациях.

Второй подход заключается в обеспечении работы АЦП с двумя или более полосами пропускания. Ключевым преимуществом высокоскоростных АЦП является то, что высокая частота дискретизации дает широкий выбор при частотном планировании и размещении аналоговых сигналов. В случае многодиапазонных радиоприемников для каждого ВЧ-усилителя могут быть установлены стандартные высокочастотные ПАВ-фильтры для фильтрации каждой полосы отдельно, а затем сигналы этих полос суммированы в АЦП для последующей дискретизации.



▲ Рис. 7. Базовая архитектура прямого преобразования ВЧ-сигнала

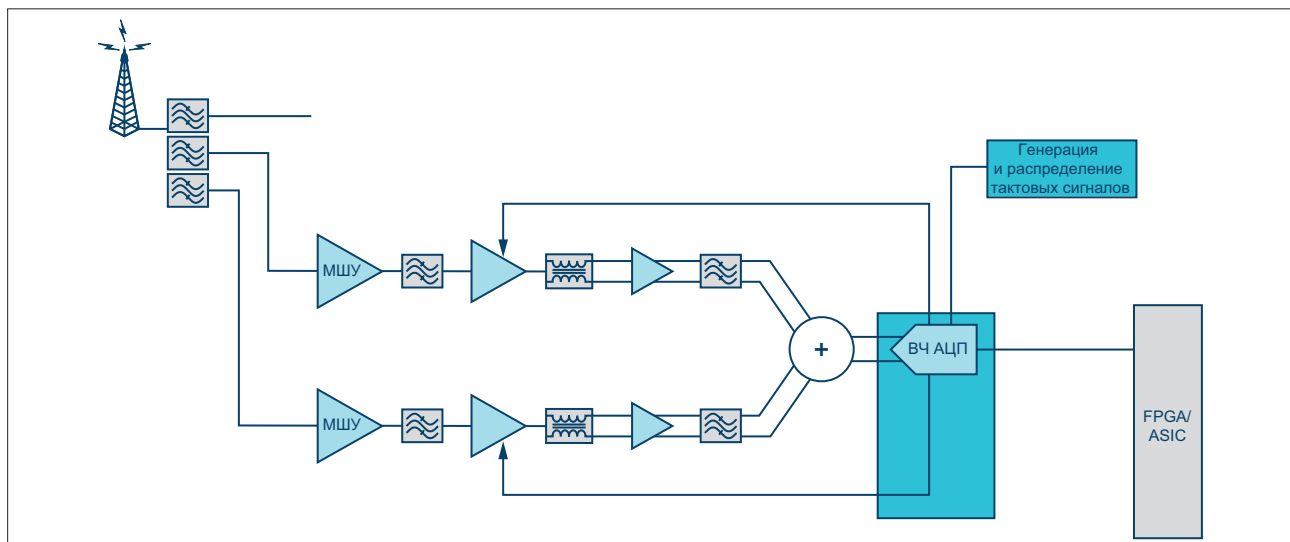
дующей дискретизации. Допускается, что каждая из этих полос может попасть в отдельные зоны Найквиста, если они не накладываются друг на друга по одной и той же частоте. Наличие отдельных усилителей для каждой полосы позволяет оптимизировать усиление для каждой из них, что сводит к минимуму межполосную десенсбилизацию (снижение чувствительности) и существенно улучшает рабочие характеристики. Однако, как отмечалось ранее, ВЧ-мощность может быть значительной, в связи с чем для многодиапазонных радиосистем лучше использовать другие варианты (рис. 8).

В некоторых случаях можно отдельно отфильтровать несколько полос, но при этом их сигналы могут быть усилены посредством одной цепи ВЧ-усилителей. Это обеспечивает свое преимущество, при котором мощность, проходящая по ВЧ-цепи, оптимизируется за счет использования одного каскада усиления. Тем не менее характер работы с различными полосами должен как-то меняться. Таким образом, если в одной полосе будет присутствовать большой сигнал, для которого потребуются регулировка усиления, это повлияет на параметры работы с другой полосой. Во многих случаях это приемлемо

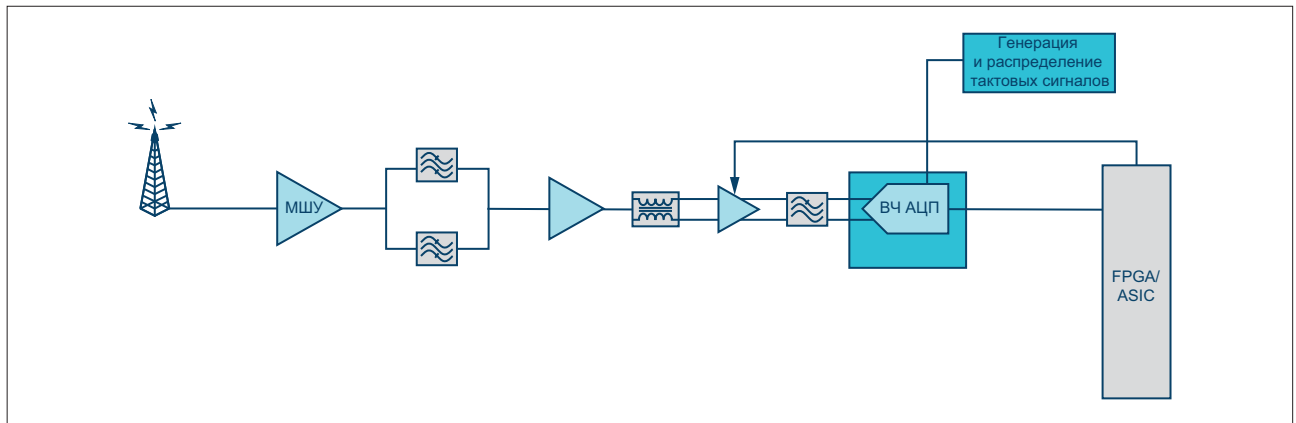
с учетом требуемых относительных динамических диапазонов. Одна из таких реализаций представлена на рис. 9. Хотя подобная система предназначена для работы с диапазонами частот сотовых телефонов, ее легко адаптировать для других применений, в том числе для широкополосных контрольно-измерительных приборов, например, анализаторов спектра и высокочастотных осциллографов.

Конкретная реализация такой системы представлена на рис. 10. В рамках данной реализации входные и выходные согласующие цепи для ПАВ-фильтров были тщательно спроектированы таким образом, что при резонансе в одной полосе схема на стороне обработки другой полосы будет представлять собой разомкнутую цепь. Следует отметить, что согласующая цепь содержала не только элементы с сосредоточенными параметрами, но и линии передачи. Таким образом, взаимодействие между двумя разными трактами ВЧ-схемы было минимизировано.

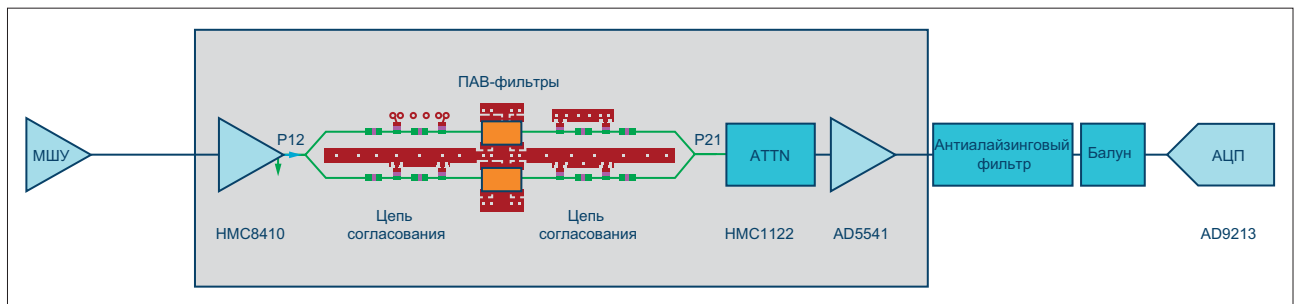
При тщательном проектировании системы можно добиться довольно эффективной работы. Характеристики прямой передачи показаны на рис. 11. В данном случае характеристики каждого отдельного ПАВ-фильтра не изменяются



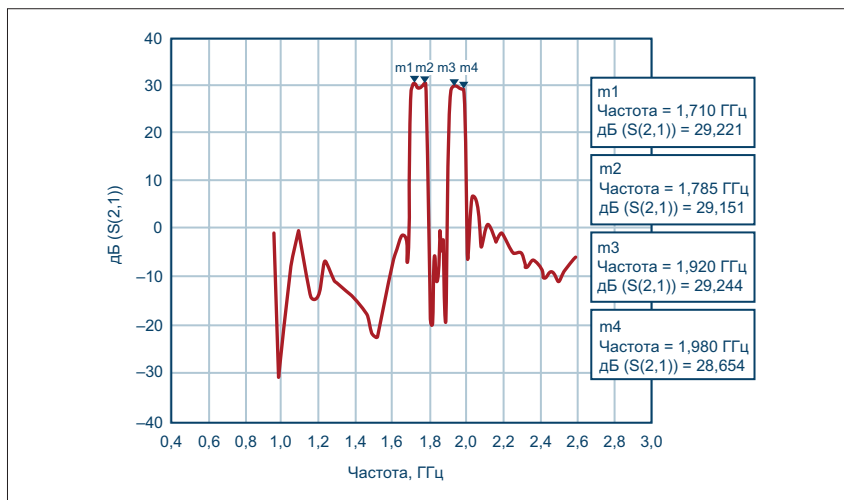
▲ Рис. 8. Пример многодиапазонной радиосистемы



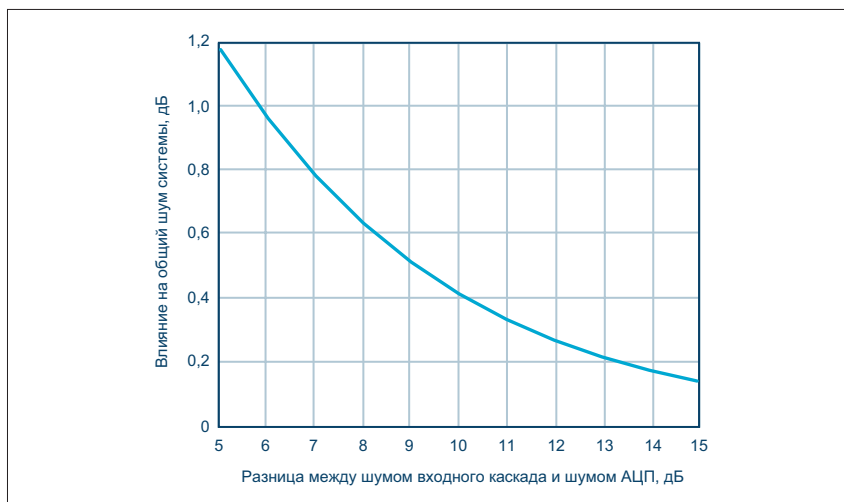
▲ Рис. 9. Упрощенная система прямого преобразования ВЧ-сигнала, работающая с несколькими полосами частот



▲ Рис. 10. Реализация с двумя ПАВ-фильтрами



▲ Рис. 11.  $S(2,1)$  – коэффициент передачи «падающей волны» от входа к выходу цепи с двумя ПАВ-фильтрами



▲ Рис. 12. Зависимость влияния шума от разницы в уровне шумов

и не влияют на другие. Здесь диапазон 1 и диапазон 3 параллельны. При выборе других полос или диапазонов частот данный метод все равно остается рабочим.

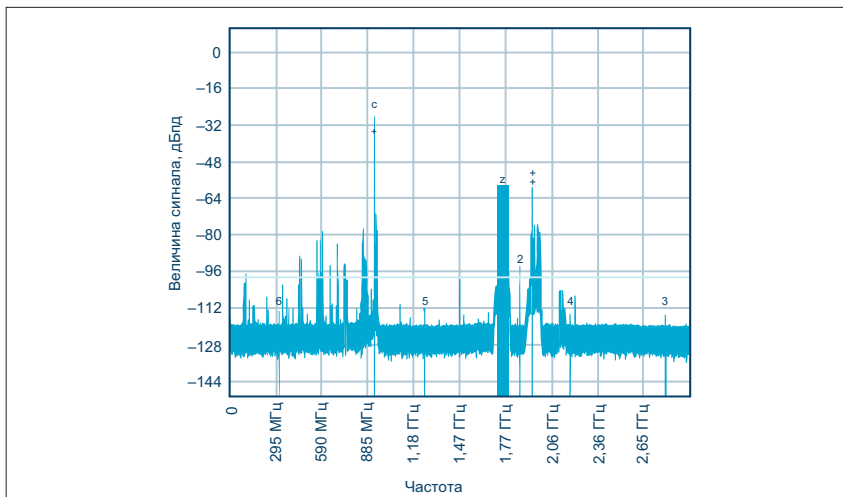
Что касается планирования уровня сигнала, следует иметь в виду несколько моментов. При проектировании системы с использованием АЦП одно из первых правил, которым необходимо следовать, заключается в том, что перед АЦП нужно реализовать усилитель с достаточным усилением, чтобы шум входного каскада преобладал над шумом АЦП. Хотя АЦП продолжают совершенствоваться, все же шум от АЦП не является гауссовским по своей природе и может ухудшать рабочие характеристики любой системы, в которой он присутствует [4]. На рис. 12 показана зависимость влияния на общий шум системы от разницы между шумом входного каскада и шумом АЦП. В данном случае основная рекомендация заключается в поддержании шума входного каскада более чем на 10 дБ выше, чем у АЦП. Если следовать этой рекомендации, то шум, вносимый АЦП в общий шум системы, будет меньше 0,4 дБ. Это гарантирует поддержание рабочих характеристик на ожидаемом уровне.

Согласно технической документации на AD9213, типичное значение спектральной плотности шума этого АЦП составляет  $-152$  дБпд/Гц. При номинальном полном диапазоне 7 дБм это значение составит  $-145$  дБм/Гц. Тепловой шум входного каскада должен быть на уровне 135 дБм/Гц, что соответствует коэффициенту усиления плюс минимальный уровень шума не менее 39 дБ. Схема, представ-

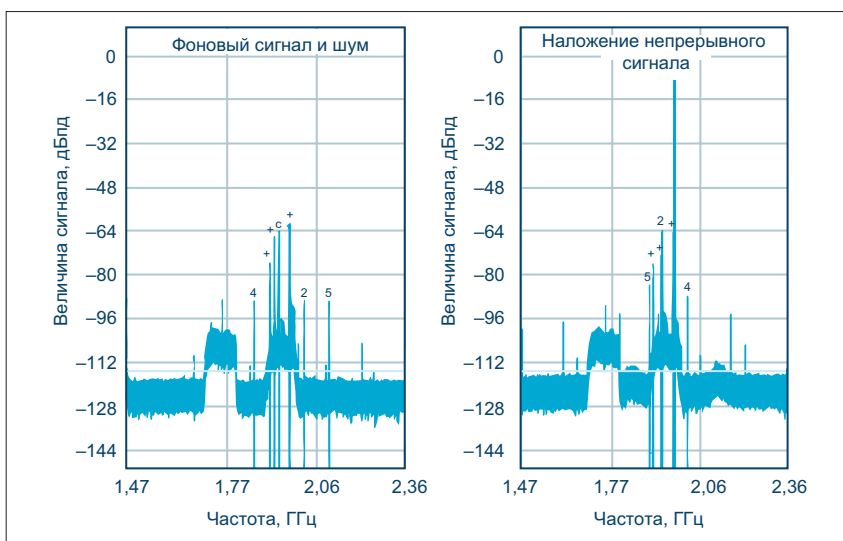
ленная на рис. 10, обеспечивала усиление 43 дБ и минимальный уровень шума 3 дБ, что увеличивало общий входной шум до  $-128$  дБм/Гц. При отсутствии входного сигнала разница между этими двумя параметрами составляет около 19 дБ при максимальном усилении. По мере увеличения входного сигнала минимальный уровень шума АЦП повышается на несколько дБ из-за джиттера используемого источника тактовых сигналов.

На рис. 13 представлены результаты измерения усиления радиосистемы, спроектированной на основе AD9213, при ее работе в радиозфере. Поскольку это очень широкополосная радиосистема с полосой пропускания более 2 ГГц и минимальной фильтрацией, она может воспринимать многие сигналы. В левую половину спектра входят частоты примерно до 900 МГц, в том числе мощные ЧМ-сигналы и сигналы телевизионного вещания. Выше этого уровня видны минимальные частоты до полосы пропускания двух ПАВ-фильтров, охватывающих 2,1 ГГц (диапазон 1 стандарта UMTS) и 1,8 ГГц (диапазон 3 стандарта UMTS). Диапазон 3 обозначен затемненной областью, но в обоих диапазонах можно видеть повышение минимального уровня шума, что вполне ожидаемо из-за избыточного шума входного каскада, проходящего через фильтры. Поскольку эти измерения были сделаны в США, в диапазоне 3 было обнаружено очень мало сигналов, но диапазон 1 захватывает часть нисходящего канала диапазона 2. Выше этого уровня антиалайзинговый фильтр устраняет все оставшиеся сигналы, вследствие чего минимальный уровень шума остается незначительным.

Увеличение масштаба графика двух полос частот, отфильтрованных с помощью параллельных ПАВ-фильтров, дает более подробную картину. На рис. 14 показано сравнение фонового шума (слева) с наложением практически полномасштабного непрерывного сигнала (справа). Глядя на минимальный уровень широкополосного шума, а не на две полосы пропускания, можно увидеть, что минимальный уровень шума немного возрастает, когда происходит наложение большого непрерывного сигнала. Это происходит из-за джиттера тактового сигнала, сворачивающегося с аналоговым входным сигналом [6]. Затем при сравнении минимального уровня шума в двух полосах какого-либо увеличения минимального уровня шума в обеих полосах не обнаружено, поскольку тепловой шум от входного каскада снижает уровень собственных шумов АЦП при подаче большого сигнала. Если внимательно посмотреть на исходные данные, то становится видно увеличение минимального уровня шума в полосе пропускания при-



▲ Рис. 13. Измерение усиления радиосистемы в эфире



▲ Рис. 14. До и после

мерно на 0,3 дБ, что соответствует разнице в уровне шумов 11 дБ согласно рис. 12.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя радиосистемы с гетеродинной структурой и сегодня остаются весьма распространенным явлением, широкополосные АЦП уже достигли такого уровня, что теперь они могут применяться в различных системах для прямого преобразования ВЧ-сигнала, в которых раньше использовались архитектуры с преобразованием частоты. Как было показано в статье, в настоящее время для создания широкополосных систем с прямым преобразованием ВЧ-сигнала существуют новые возможности. Такие продукты, как AD9213, позволяют реализовать высокоточную оцифровку сигналов с частотой намного выше 2 ГГц, что делает этот АЦП идеальным кандидатом для применения в системах, где требуется широкая мгновенная полоса пропускания, в том числе в осциллографах, анализаторах спектра и широкополосных/многополосных радиосистемах. Хотя раньше и считалось, что прямое преобразование сигналов с частотой

свыше 1 ГГц невозможно, AD9213 смог преодолеть эти ограничения и АЦП будущих поколений смогут дискретизировать сигналы с гораздо большими частотами. Преобразователи продолжают развиваться и совершенствоваться, расширяя границы рабочих характеристик и эффективности, что делает их оптимальным решением для применения в широкополосных системах. ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Manganaro G., Robertson D. H. *Interleaving ADCs: Unraveling Mysteries//Analog Dialogue*. 2015. Vol. 49.
2. Harris J. *The ABCs of Interleaved ADCs*. EDN Network, 2013.
3. Harris J. *Further into the Alphabet with Interleaved ADCs*. EDN Network, 2013.
4. Bannon B. *A pplication Note AN-410: Aperture Uncertainty and ADC System Performance*. Analog Devices, Inc., 1995.
5. Murmann B. *ADC Performance Survey 1997–2016*. [www.web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html](http://www.web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html).
6. Brannon B., Alan Barlow. *Application Note AN-501: Aperture Uncertainty and ADC System Performance*. Analog Devices, Inc., 2006.