АБДУЛРАХМАН М. С. АХМЕД (Abdulrahman M. S. Ahmed), **ЗОРАН АНУСИЧ** (Zoran Anusic), **ГРЕГ ДУРНАН** (Greg Durnan)
Перевод и дополнения: **ВЛАДИМИР РЕНТЮК**

ТРЕБОВАНИЯ К ШИРОКОПОЛОСНЫМ УСИЛИТЕЛЯМ МОЩНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМ В mMIMO-ПРИЛОЖЕНИЯХ

В предлагаемой статье обсуждаются некоторые требования к усилителям мощности (УМ), используемым для приложений с множеством входов и выходов технологии Massive MIMO.

Итак, рассмотрим некоторые требования к усилителям мощности (УМ), предназначенным для приложений с множеством входов и выходов Massive MIMO[1], хотя в общем случае — это многоэлементная антенная система, но, по сути, для данной сферы здесь мы имеем дело с управляемой активной антенной решеткой (далее — mMIMO). Все требования основаны на опыте работы авторов статьи с этим приложением. Одни требования относятся к схемотехническому решению УМ, то есть к топологии, другие — к его модельному ряду, то есть мощности и конкретному конструктивному исполнению. В статье показана важность оценки поведения усилителя в условиях перехода от амплитудной к фазовой модуляции (AM/PM) и ее влияние на обеспечение его линейности. (В оригинале статьи использован термин «линеаризуемость», то есть возможность реализации на практике заданной линейности. И хотя этот термин входит в обиход, далее по тексту оставлены более привычные названия — «обеспечение линейности» и «линейность». — Прим. переводчика.) Также будет обсуждаться влияние на широкополосную линейность УМ конфигурации и установок измерения, будут описаны проблемы, и предложены решения. Основное внимание будет уделено схемотехнике УМ на силовых транзисторах, выполненных на основе нитрида галлия (GaN). Будет продемонстрирована коммерчески доступная линейка мощных 50-омных асимметричных усилителей Догерти с очень эффективной широкополосной цифровой коррекцией предыскажений (digital predistortion, DPD) вплоть до полосы в 200 МГц.

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы соответствовать постоянному росту скоростей передачи данных будущих систем беспроводной связи, УМ должны иметь возможность передавать многочастотные и многорежимные сигналы, которые занимают полный частотный диапазон спектра, заданного для того или иного типа радиосвязи, при этом обеспечивая высокую мощность, эффективность и требования к линейности. Независимо от ширины полосы сигнала линейность УМ с системой DPD должна соответствовать требованию линейности, указанному в стандартах 3GPP[2].

Для характеристики качества передатчиков систем связи третьего поколения WCDMA введен коэффициент ACLR (Adjacent Channel Leakage power Ratio). Этот коэффициент определен 3GPP в стандартах WCDMA, где сказано следующее: «Коэффициент (отношение) мощности, просачивающейся в соседний канал ACLR (Adjacent Channel Leakage power Ratio), — это отношение средней мощности, сосредоточенной на частоте назначенного канала (assigned channel), к средней мощности, сосредоточенной на частоте соседнего канала (adjacent channel) — определение дано согласно 3GPP TR 21.905 «Vocabulary for 3GPP Specifications». В обоих случаях средняя мощность вычисляется с помощью измерительного фильтра, имеющего характеристику «корня приподнятого косинуса» (Root Raised Cosine, RRC) с коэффициентом крутизны, равным 0,22, в полосе частот, равной чиповой скорости (chip rate)».

Одним из требований к линейности УМ является то, что коэффициент (отношение) мощности, просачивающейся в соседний канал, не должен быть хуже, чем –45 дБн (дБн — отношение мощности сигнала к сигналу несущей, выраженное в децибелах) [1]. В общем, если УМ можно легко линеаризовать с помощью системы DPD, это приведет к повышению эффективности всей системы в целом. Следовательно, разработчик УМ должен сосредоточить внимание на линейности УМ и максимизации его эффективности (в первую очередь имеется в виду КПД).

Здесь необходимо отметить, что ранее вместо параметра ACLR использовался коэффициент мощности в соседнем канале ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) — мера расширения паразитного попадания сигнала в соседние каналы, вызванные нелинейностью тестируемого устройства. Этот параметр используется для оценки степени искажения, вызванной нелинейностью усилителей и в целом тракта передачи всех РЧ-блоков. Можно сказать, что коэффициент ACP обеспечивает их предрасположенность к созданию устройств, использующих РЧ-канал системы радиосвязи.

В общем виде коэффициент ACPR определяется как выраженное в децибелах отношение величины P1 в определенной полосе частот (BW1) на центральной частоте рабочего канала к величине мощности P2, определенной в конкретной полосе (BW2) при заданной расстройке (F) от несущей частоты рабочего канала (fc). Пояснения о различиях в коэффициентах ACPR и ACLR показаны на рис. 1 [5].

В этих широкополосных приложениях характеристики УМ зависят от огибающей и частоты. Эта огибающая и частотная зависимость являются специфическим явлением памяти, что означает, что выходной сигнал активного устройства является не только функцией мгновенных значений входного сигнала, но и функцией предыдущих значений [2]. Повышенная скорость передачи данных позволит увеличить количество пользователей и ускорить передачу данных, что приведет к повышению качества обслуживания (рис. 2).

[1] Massive MIMO — технология, в которой количество пользовательских терминалов намного меньше, чем количество антенн базовой станции (мобильной станции). Особенностью Massive MIMO является применение многоэлементных цифровых антенных решеток с количеством антенных элементов 128, 256 и более.
[2] 3GPP (3rd Generation Partnership Project) — партнерский проект развития связи 3-го поколения, созданный при сотрудничестве группы телекоммуникационных компаний Organization Partners, для стандартизации спецификаций систем связи 3G на основе развивающихся сетей GSM.

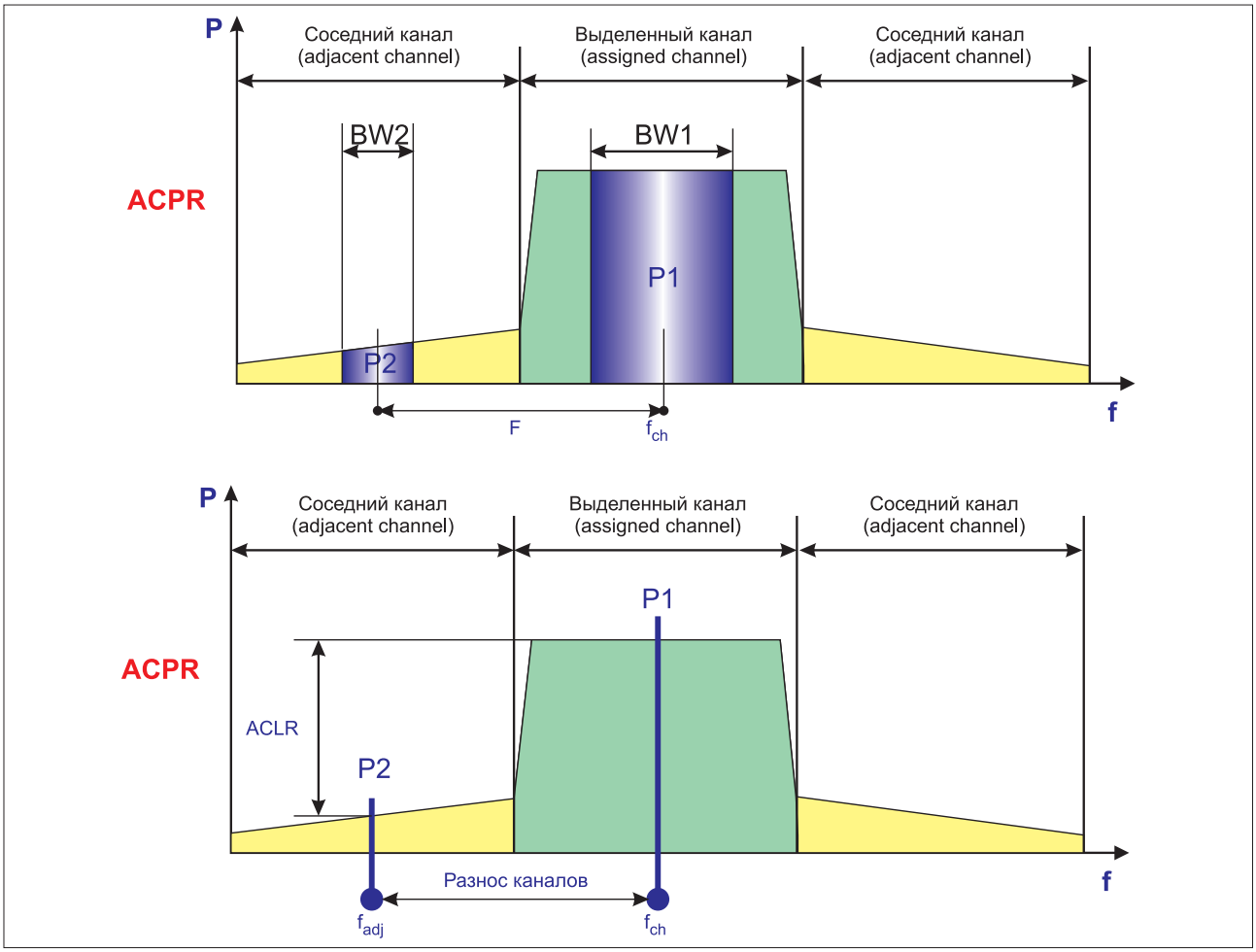

Рис. 1. Концепция измерения коэффициента ACPR и ACLR

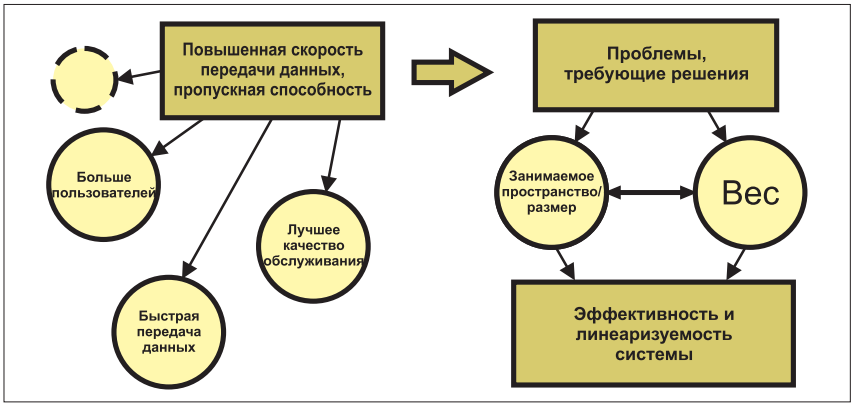

Рис. 2. Проблемы и решения по активной антенной решетке типа mMIMO

Для обеспечения возможности создания гигабитного усилителя рабочая частота усилителя должна перейти на еще более высокий уровень, поскольку относительная полоса пропускания для работы на высокой частоте меньше, чем при работе на низких частотах. Основные отношения скорости передачи данных и пропускной способности описываются выражением, где N — это число состояний кодирования:

Скорость передачи данных =
= 2 × log_2(N) (бит/с),

Полоса пропускания =
= (верхняя частота — нижняя частота)/центральная частота.

ТРЕБОВАНИЯ

В современных приложениях для mMIMO в субдиапазоне 6 ГГц требуемая полоса пропускания находится в диапазоне 200 МГц. Еще одно требование к усилителю для таких приложений — высокие уровни мощности, в среднем 5–10 Вт. Единственная технология, способная обеспечить такую работу при высокой частоте и мощности, — это GaN на карбиде кремния (SiC).

Единственным поставщиком, который имеет полностью вертикально интегрированный бизнес по производству материалов и устройств, специально нацеленный на устройства GaN мирового класса, является Wolfspeed (ныне компания в составе группы Cree). Это позволяет надежно дополнять входные модули GaN из объемного кристалла, эпитаксии, пластинчатого кристалла, конструкции устройства и, следовательно, результирующего УМ (рис. 3).

Под технологию 4G усилители мощности были разработаны для относительно узкополосных приложений (~60 МГц). В таких приложениях проблемы линейности вызваны главным образом выходным каскадом, а именно УМ топологии Догерти.

Система на основе массива с несколькими входами и выходами (mMIMO) — это технология для 5G. При ее реализации для обеспечения лучшей пропускной способности и лучшей эффективности использования спектра в основном применяются передатчики с распараллеливанием и оптимизацией со своими антеннами и приемниками (2^N, где N = 1, 2, …). Эти группы передатчиков и приемников работают вместе, как показано на рис. 4. Такая конфигурация выбрана

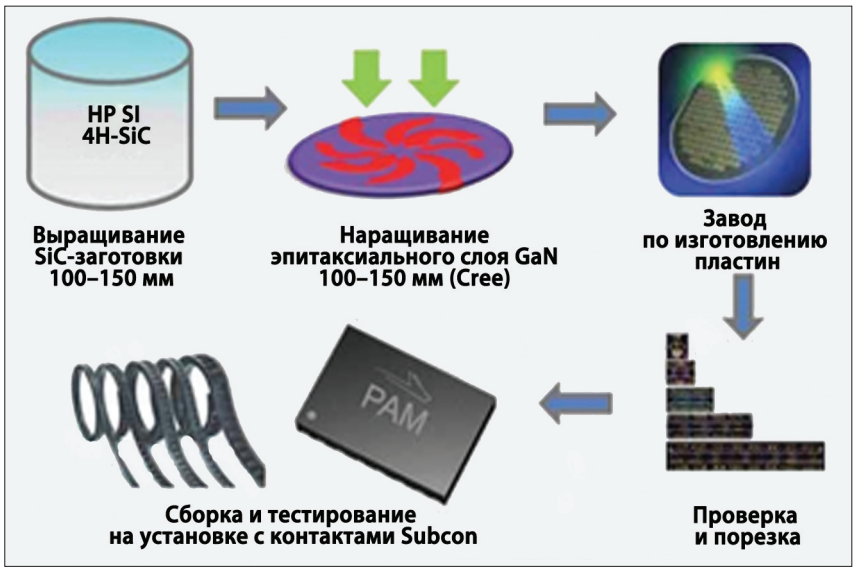

Рис. 3. Последовательность операций по выпуску силовых GaN-транзисторов

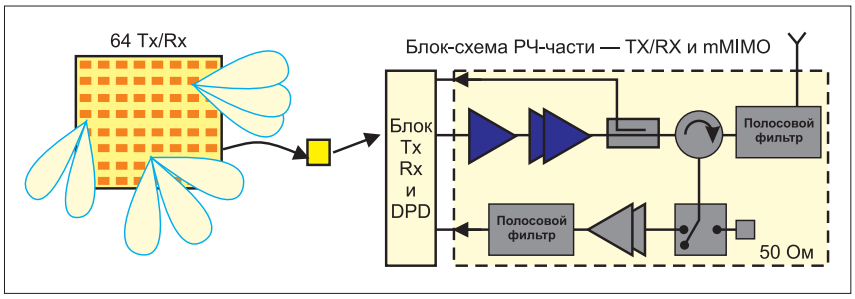

Рис. 4. Управление антенной решеткой в технологии mMIMO 5G

для того чтобы обеспечить высокую скорость, большую емкость, безопасность и реализовать другие преимущества технологии 5G.

Для приложений 5G mMIMO требуемая мгновенная полоса пропускания составляет 160 МГц или более. С такими широкополосными сигналами проблемы линейности возникают не только из-за УМ, как последней ступени, скорее всего, они вызваны комбинацией конкретного УМ, широкополосного трансивера и системы DPD. Следовательно, широкополосная линейность ограничена всеми составляющими частями конечной системы.

В этих узкополосных приложениях 4G мы видим, что система работает в конфигурациях, подобных SISO (Single Input/Single Output — один вход/один выход), известных в англоязычной технической терминологии как Macro system (макросистемы), для которых типичны одиночные антенны на базовой станции и мобильном телефоне. Хотя при этом в телефонных терминалах может использоваться технология, подобная разнесению антенн, — переключение между двумя телефонными антеннами, например, для достижения наилучшего отношения сигнал/шум (Signal-To-Noise Ratio, SNR) или устранения возможных помех от руки. Пропускная способность такой макросистемы обычно ограничивается шириной полосы пропускания канала и условиями распространения. Пропускная способность канала Macro SISO описывает уравнение 1 из теоремы Шеннона — Хартли, часто называемое в технической литературе уравнением Шеннона:

$$C_{SISO} = B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right), \quad (1)$$

где C — пропускная способность канала, бит/с; B — полоса пропускания канала, Гц; S — полная мощность сигнала над полосой пропускания, Вт или уровень сигнала в В; N — полная шумовая мощность над полосой пропускания, Вт или уровень сигнала в В.

Отношение S/N в уравнении — это и есть отношения сигнал/шум, или SNR.

Стандарты 3GPP, особенно в рамках релизов 13, 14 (LTE Advanced Pro) и 15 (5G), предлагают множество технологий, которые полагаются на дополнительную полосу пропускания за счет распараллеливания несущих каналов. Они включают технологию агрегирования каналов (Channel Aggregation, CA) и технологию динамического перераспределения частотного спектра (Dynamic Spectrum Sharing, DSS) в пространстве каналов субдиапазона 6 ГГц. Обе технологии напрямую увеличивают пропускную способность (Гбит/с) за счет использования дополнительных каналов TDD (или FDD) с полосой пропускания до 20 МГц. Для реализации 3GPP версии 15 для увеличения пропускной способности у нас также есть возможность использовать каналы LTE и 5G одновременно через технологию DSS. И вместе с этим мы видим увеличение сложности доступных методов модуляции, то есть в LTE мы наблюдаем 64 QAM по сравнению с 256 QAM для 3GPP, релиз 15. Это значение еще больше увеличивается для 3GPP, релиз 16 и выше.

Помимо увеличения пропускной способности, мы увидели, что стандарты LTE Advanced Pro и 5G (субдиапазон 6 ГГц) позволяют операторам использовать несколько антенн на передающем конце канала (базовой станции). Это приводит к линейному увеличению скорости передачи данных, поскольку mMIMO работает уже в режиме MISO (Multiple Input — Single Output — несколько входов/один выход), часто с парой антенн субдиапазона 6 ГГц в мобильном телефоне, также предлагающей переключаемое разнесение, чтобы предотвратить потерю сигнала. Затем система mMIMO базовой станции отрегулирует свои фазовые и амплитудные компоненты для отдельного клиента, чтобы направить луч на этот телефон или по крайней мере достичь максимальной пропускной способности, что также возможно в условиях сильного многолучевого распространения. В то время как чипсеты 4G LTE Advanced Pro работали в диапазоне 1 Гбит/с (хотя здесь и были попытки увеличения скорости), использование технологии mMIMO позволило телефонам с частотой субдиапазона 6 ГГц увеличить скорость передачи данных до 2,5–3 Гбит/с. На момент написания статьи соотношение пропускной способности каналов современных 5G-систем определяется уравнением 2 — модифицированной версией уравнения 1:

$$C_{MISO} = NB\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right). \quad (2)$$

Уравнение показывает пропускную способность канала MISO 5G на частоте субдиапазона 6 ГГц как функцию от числа элементарных антенн в базовой станции N, полосы пропускания B и отношения сигнал/шум. Это решение обеспечивает возможную пропускную способность канала на уровне нескольких Гбит/с. Такие чипсеты для мобильных телефонов, как недавно выпущенный Qualcomm X60, уже достигают рекорд-

ных значений пропускной способности и, как следствие, нуждаются в более широкополосных УМ для систем сотовой связи.

В дополнение к требованиям в части широкополосности УМ для технологии mMIMO очень важна высокая эффективность (как уже было сказано, здесь имеется в виду коэффициент полезного действия — КПД). Необходимая эффективность — это показатель, который должен соответствовать требованиям к размеру и весу систем mMIMO (рис. 2). Для достижения высокой эффективности усилителей мощности обычно используются асимметричные архитектуры Догерти. К сожалению, такая архитектура весьма нелинейная. Поскольку линейность и эффективность являются компромиссными параметрами для УМ, то для получения максимальной эффективности УМ должен быть спроектирован с минимально необходимой линейностью, то есть по принципу: «столько, сколько нужно». Например, использование усилителя класса А в качестве драйвера не самое эффективное решение для данного приложения.

В дополнение к текущей конфигурации MISO базовой станции и мобильного телефона, истинная пропускная способность системы на основе технологии mMIMO, предложенная Qualcomm X60 (и решения X50 в паре с модемом 4G LTE), для достижения полосы пропускания, скорее всего, переместится в более высокочастотный участок выделенного спектра, что необходимо для повышения скорости. Второе преимущество перехода к более высокочастотной части спектра — уменьшение размера антенн как для мобильных телефонов, так и для базовых станций.

Однако здесь следует учитывать некоторые компромиссы. Один из них — выбор конфигурации системы. В населенных пунктах из-за условий распространения радиоволн решения с более высокими частотами не смогут обеспечить связь так же хорошо, как низкочастотные макробазовые станции, особенно в очень низких диапазонах частот 617/619 МГц. Еще один компромисс — большие затраты времени, необходимого для разработки систем базовых станций 5G, что связано с вопросами стоимости, размера и веса, которые 5G привносит в решение базовых станций сотовой связи. И это нужно противопоставить относительной простоте высокомощных базовых станций обычной сотовой связи. В частности, в 5G мы планируем тесную интеграцию антенной системы с усилителем и коммутацией на входе. Кроме того, поскольку большинство практических систем будут использовать управление фазой и амплитудой, которые реализованы в цифровой области, то для каждого пользовательского слота понадобятся большие вычислительные мощности.

С использованием технологии «GaN на SiC» компания Wolfspeed реализует эти решения благодаря более высокой эффективности на более высоких частотах. LDMOS не является жизнеспособным решением при таком распределении более высоких частот просто из-за низкой эффективности устройства. Мы говорили об уровнях 3GPP 14 (4G LTE Advanced Pro) и уровне 15 (5G), однако 5G продолжит разработку для нескольких дополнительных выпусков 3GPP, прежде чем мы наконец дойдем до концепций 6G. Стоит взглянуть на нынешнюю дорожную карту 3GPP, учитывая, что не все производители микросхем сотовых модемов могут реализовать все функции любого одного уровня выпуска. На рис. 5 от 3G Partnership Project в виде дорожной карты показано ожидаемое развитие технологии сотовой связи, из которого видно, что мы уже должны работать над обеспечением систем шестого поколения — 6G. На момент написания статьи 3GPP работает над дополнениями к 5G в релизах 16 и 17, и в них больше внимания будет уделено развитию с акцентом на более высокие частоты, с переходом в область миллиметровых волн.

Как видно из представленной диаграммы, стандарты, сейчас разрабатывающиеся в отрасли, а это релизы 14 и 153GPP, уже заморожены, а с нынешнего, 2020 года уже необходимо ориентироваться на релиз 18, который вступит в силу к 2022 году [3].

Одним из примеров, когда производители сотовых модемов могут отклоняться от принятых стандартов, является автомобильная связь: здесь в решении 4G LTE Advanced Pro или даже при разработке модема 5G, если целевой рынок приложений — это не телефоны, а автомобили, могут быть допущены те или иные отклонения. Формально тут нет нарушения, так как стандарты 3GPP регламентируют именно мобильную терминальную сотовую связь, а не автомобильное оборудование. Кроме того, это не окажет заметного влияния на загруженность каналов связи, поскольку с точки зрения маркетинга возможности продаж автомобилей намного уступают возможностям продаж мобильных телефонов.

С другой стороны, производители модемных чипсетов могут пойти на ком-

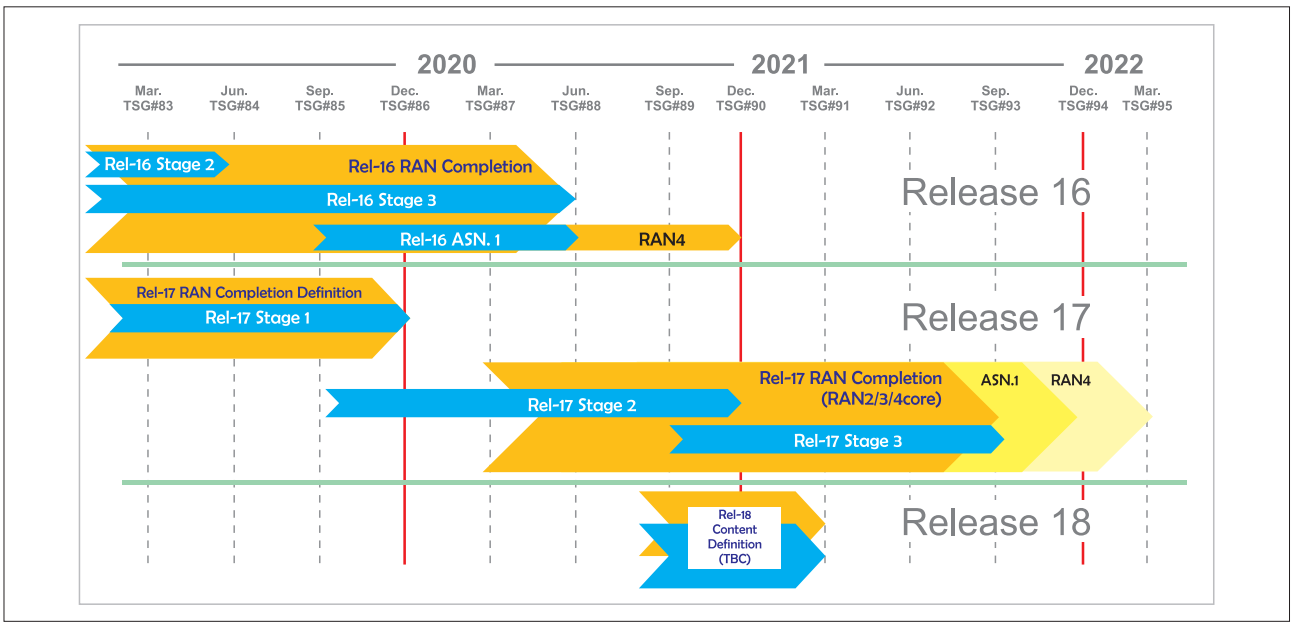

Рис. 5. Дорожная карта выпуска релизов 3GPP [2]

промисс в других областях схемного решения таких микросхем, предназначенных именно для обслуживания автомобильной связи, для которой планируется выделение диапазоне частот в области 4,9 ГГц. Один из таких примеров — набор микросхем Qualcomm 9150 4G LTE, поддерживающий связь V2V (Vehicle to Vehicle — буквально «от транспортного средства к транспортному средству»). Однако этому чипсету не хватает скорости, но вполне возможно, что некоторые из более поздних решений, отличных от V2V, помогут исправить ситуацию. Следовательно, справедливо предположить, что в ближайшие годы мы увидим богатую экосистему чипсетов для макро- и mMIMO-модемов, предназначенных для обслуживания городских, региональных и специальных приложений.

Наконец, когда поставщики действительно перейдут к истинным решениям mMIMO, которые фактически являются управляемой антенной решеткой с множеством антенн на базовых станциях и на телефонах (возможно, на более высоких частотах из-за их меньших размеров), мы увидим, что улучшение скорости, предложенное решением MIMO, перейдет от линейного закона увеличения. Это связано с тем, что в случае систем MISO в области очень высоких частот наблюдается теоретический экспоненциальный рост, увеличивающийся до 10 Гбит/с на частоте 28,8 ГГц. Уравнение 2 пропускной способности канала mMIMO переформатируется на более сложное уравнение, определяемое матрицей каналов между совокупностью пользователей U и размером антенной решетки базовой станции BS. Подробный вывод из уравнения пропускной способности канала mMIMO невозможен в рамках данной статьи из-за различий в реализации и того, основана ли система на технологии TDD или FDD[3]. Однако результат зависит от мультиплексирования (из-за алгоритмического добавления компонентов многолучевого распространения) и усиления антенны в этих условиях (из-за количества задействованных элементов в антенной решетке) [4].

РЕШЕНИЯ

Для того чтобы разработать широкополосный усилитель с заданными требованиями к линейности, при оптимизации конструкции следует сосредоточить внимание не только на усилителе, как последнем каскаде, но и на всей схеме до усилителя. К тому же сам модельный ряд усилителей должен быть оптимизирован с учетом системы приемопередатчиков, а также системы DPD. Система DPD, используемая для линеаризации усилителей мощности с mMIMO, сама по себе должна быть простой и высокоэффективной по сравнению с системами DPD, используемыми в традиционных приложениях уже обычных, макробазовых, станций. Это усложнит схемотехническое решение УМ и конечного приложения в целом.

Кроме того, на основе опыта авторов статьи были выявлены различные причины возникновения проблем обеспечения широкополосной линейности конечного приложения (рис. 6), среди них:

- Источник входного сигнала/предварительный драйвер: нелинейность, гармоники, уровень шума и полоса пропускания.
- Настройка и измерения: калибровка, изоляция, фильтрация, нагрузка, управление температурой и динамический диапазон.
- Эффекты памяти усилителя: схема смещения, эффект захвата, рассогласование четных гармоник и модуляция источника питания.
- Трансивер: нелинейность повышающих/понижающих преобразователей, утечка/паразитные сигналы гетеродина, изображение/гармоники, динамический диапазон и/или уровень шума.
- DPD: для широкополосных приложений (> 20 МГц) DPD должен включать встроенную память. Сложные алгоритмы потребляют много энергии, что совершенно неприемлемо для приложения mMIMO.

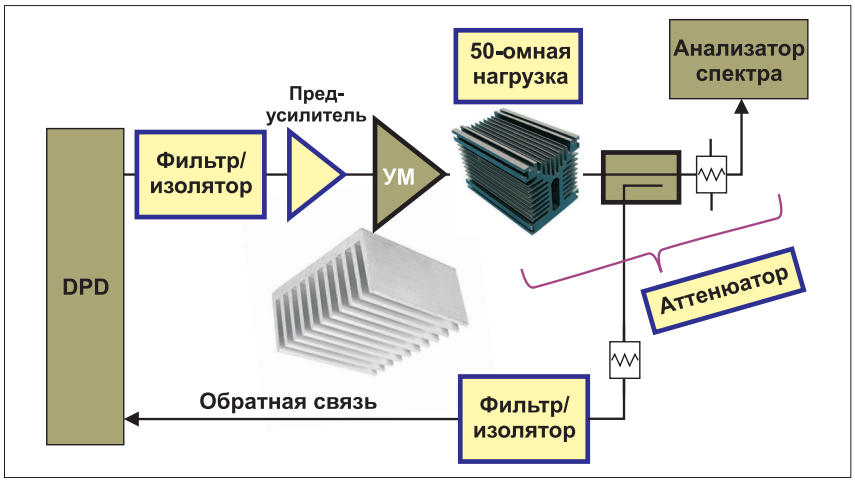

Рис. 6. Источники проблем в части обеспечения широкополосной линейности конечного приложения

Как известно, качественные показатели модуляции характеризуют модуляционные характеристики — статические и динамические. Статические модуляционные характеристики либо рассчитывают, используя статические характеристики усилительного элемента, либо снимают по точкам в отсутствие модулирующего напряжения. При модуляции генератор должен работать на линейном участке статической модуляционной характеристики, которая в данном случае представляет собой зависимость первой гармоники тока от модулирующего напряжения.

На рис. 7 показаны различные формы статических модуляционных характеристик при переходе амплитудной модуляции в амплитудную модуляцию (АМ/АМ) и амплитудной модуляции в фазовую модуляцию (АМ/ФМ) в качестве показателей широкополосной линейности.

Например, абсолютное значение нелинейной фазы усилителя пропорционально величине нелинейности в усилителе. Однако фаза является хорошим показателем линейности только для узкополосных решений, не превышающих 20 МГц мгновенной ширины полосы частот (Instantaneous Bandwidth, iBW — полоса частот, в которой уровень мощности выходного сигнала остается постоянным в пределах 3 дБ без подстройки основных рабочих параметров, используется как характеристика устройства с перестройкой по частоте).

Как видно на рис. 7, хорошие показатели линейности для широкополосной, превышающей 60 МГц для iBW, это:

- Перегиб не более 1–2° (то есть неравномерность) АМ/ФМ в пределах полосы частот в любой форме статических модуляционных характеристик АМ/ФМ.
- Статическая дисперсия АМ/ФМ по полосе частот. Низкая дисперсия обеспечивает хорошую линейность.
- Низкая пиковая мощность усилителя на любой частоте при статических модуляционных характеристиках АМ/АМ.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Мультичиповый асимметричный модуль усилителя мощности компании

[3] FDD и TDD — это аббревиатура названий методов разделения каналов, FDD (Frequency Division Duplex) — использует частотное разделение каналов. TDD (Time Division Duplex) — использует временное разделение каналов.

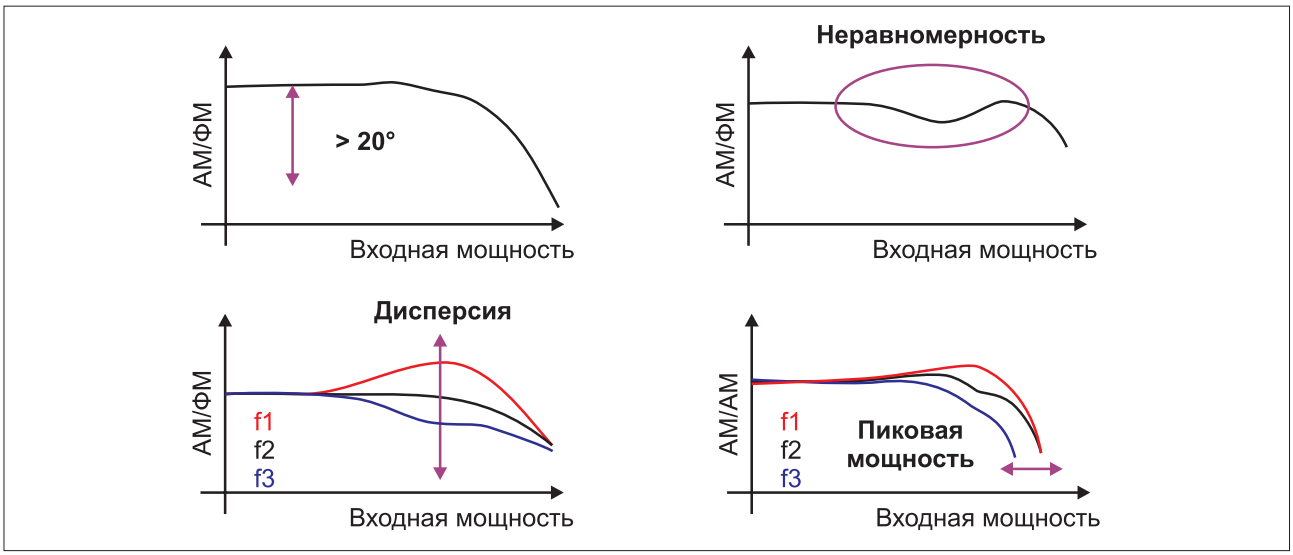

Рис. 7. Различные формы статических модуляционных характеристик АМ/АМ и АМ/ФМ как показатель широкополосной линейности

Wolfspeed разработан с применением кристаллов GaN на SiC HEMT для приложений с базовыми станциями, использующими для реализации технологии 5G активную антенную решетку mMIMO. Предлагаемые модули УМ компактны и имеют гораздо меньший корпус для поверхностного монтажа, чем это можно было бы реализовать на дискретных компонентах. Для создания полнофункциональных высокопроизводительных УМ Догерти эти модули требуют минимального количества внешних компонентов. Асимметричный модуль усилителя мощности Догерти разработан для стандартов 5G, 4G и LTE с напряжением питания 28 В и согласованием входного и выходного сопротивления 50 Ом в корпусе для поверхностного монтажа 6×10 мм. Двухкаскадные усилители Догерти с внутренним согласованием могут обеспечивать усиление до 30 дБ и высокую мощность до перехода в насыщении на уровне 46 дБмВт. Этот УМ-модуль охватывает диапазон частот мобильной связи 3,4–3,6 ГГц. Используя систему DPD от компании Analog Devices Inc (ADI) с iBW 200 МГц и отношения пикового сигналом к среднему (PAR) 8 дБ, модуль обеспечивает превосходную линеаризуемость ACPR –50 дБн при средней выходной мощности 37,5 дБм. На рис. 8 и 9 показаны соответственно данные DPD для узкополосных сигналов с частотой 20 МГц и широкополосных сигналов с частотой 200 МГц, измеренные с помощью решения компании ADI.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены различные проблемы и решения широкополосных приложений на основе технологии mMIMO. Авторы постарались объяснить, что проблема линеаризуемости в 5G вызвана не только самим УМ и связанными с ним каскадами, но и всей системой в целом. Таким образом, система должна быть оптимизирована с учетом DPD. Для оценки широкополосной линеаризуемости в качестве базовых показателей предлагаются различные формы статических модуляционных характеристик АМ/АМ и АМ/ФМ.

Кроме того, для достижения заданных ограничений по размеру и весу в системах mMIMO следует использовать полупроводниковые устройства с более высокой эффективностью, такие как силовые высокочастотные транзисторы на основе нитрида галлия. Например, мультичиповый асимметричный 50-омный УМ Догерти от компании Wolfspeed группы Cree продемонстрировал превосходную широкополосную линеаризуемость с использованием системы DPD от компании ADI.

ЛИТЕРАТУРА

1. *3GPP standard. www.portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/ SpecificationDetails.aspx?specificationId=3389*
2. *Vuolevi J. H. K., Rahkonen T. Measurement Technique for Characterizing Memory Effects in RF Power Amplifiers//IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2001. Vol. 49. No. 8.*
3. *3GPP ROADMAP (2020). Proposed 3GPP releases and milestones. www.3gpp.org/specifications/releases.*
4. *Dahlman E. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018,*
5. *Основные параметры компонентов РЧ-блоков. www.rfdesign.ru/parameters/param-acpr.htm*

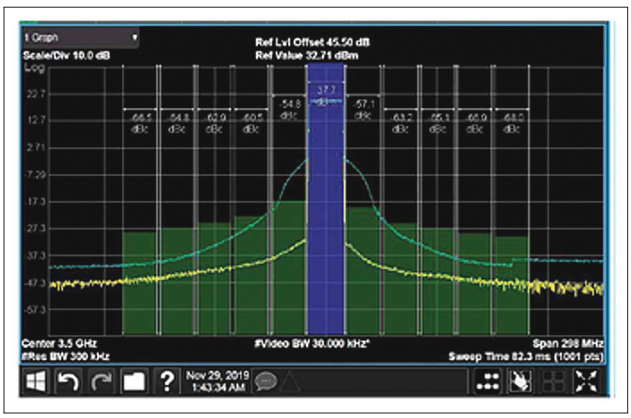

Рис. 8. Результат УМ с DPD от компании ADI с сигналом LTE 10 МГц P_{out} = 37 дБBm при 8 дБ PAR

Рис. 9. Результат УМ с DPD от компании ADI с сигналом LTE 10×20 МГц P_{out} = 37 дБBm при 8 дБ PAR