УОЛТ СТРИКЛЕР (компания Boonton Electronics, директор)
ПАУЛА КОРРЕА (компания Empower RF Systems, технический директор)
ДЖОРДЖ БОЛЛЕНДОРФ (компания Empower RF Systems, директор по маркетингу и бизнес-развитию)
Перевод: **СЕРГЕЙ ШИХОВ**, sergey@acont.ru

ЛУЧШАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ GAN-УСИЛИТЕЛЕЙ

В статье подробно описаны некоторые параметры и особенности GaN-усилителей и методы измерения линейности усилителей. Профессионально поданный материал и точное изложение сути проблемы представляет немалый интерес для специалистов.

ВВЕДЕНИЕ

GaN-устройства продолжают широко использоваться и являются ключевыми элементами во многих радарах, радиолокационных устройствах и приборах радиоэлектронной борьбы, спутниках и различных коммуникационных системах. Изделия, в основе которых лежит нитрид-галлиевая (GaN) технология, обладают рядом преимуществ [1]. Например, GaN-устройства имеют сильное поле пробоя из-за большой ширины запрещенной энергетической зоны, что позволяет им работать при более высоких напряжениях.

Благодаря сочетанию высокой скорости насыщения и соответствующей емкости заряда GaN-устройства становятся оптимальными для использования в высокомощных приложениях. Если добавить превосходную теплопроводность, то легко понять, почему GaN-устройства применяются все чаще, в том числе в телекоммуникационных и оборонных системах.

Одним из самых популярных устройств на основе GaN-технологии является широкополосный ВЧ-усилитель мощности. Усилители описываются несколькими характеристиками, включая коэффициент усиления, частотную характеристику или полосу пропускания, выходную мощность, линейность, эффективность и коэффициент шума. Ключевыми характеристиками, которые часто используются для оценки качества усилителя, являются его линейность и эффективность. Относительная же значимость этих двух признаков зависит от применения — например, в спутниковой отрасли эффективность усилителя более важна, так как мощность ограничена, а в наземных коммуникационных системах значимость обоих параметров может быть равной.

Коммуникационные системы, например, те, что базируются на стандартах 5G, построены на схемах широкополосной модуляции со значительными требованиями к линейности. Более того, из-за большого количества базовых станций, необходимых для поддержки таких систем, приходится уделять пристальное внимание энергоэффективности для снижения эксплуатационных расходов. К сожалению, уровень мощности для поддержания линейности усилителя часто намного ниже уровня возбуждения, необходимого для обеспечения максимальной эффективности.

ЛИНЕЙНОСТЬ ПРОТИВ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В статье основное внимание будет уделено применениям, в которых линейность усилителя становится критической характеристикой. На рис. 1 синяя линия показывает обычное поведение усилителя. Линейность измеряется с помощью увеличения входной мощности и дальнейшего отслеживания выходной мощности до момента, когда усилитель не войдет в компрессию. Часто линейность усилителя определяется уровнем входной мощности, на котором соответствующая выходная мощность на 1 дБм ниже, чем теоретическое линейное реагирование, а P_{1dB} — точкой, в которой, как считается, усилители работают наиболее эффективно.

При одновременной важности линейности и эффективности необходимо оптимизировать значение компенсации ввода (IBO). Слишком большая компенсация снижает эффективность и делает усилитель крупногабаритным и дорогим (поскольку нужно достигнуть уровня требуемой выходной мощности), а слишком маленькая — приводит к увеличению компрессии и ухудшению сигнала. Поэтому точное измерение линейности усилителя в реальных условиях эксплуатации имеет решающее значение для инженеров, разрабатывающих GaN-устройства.

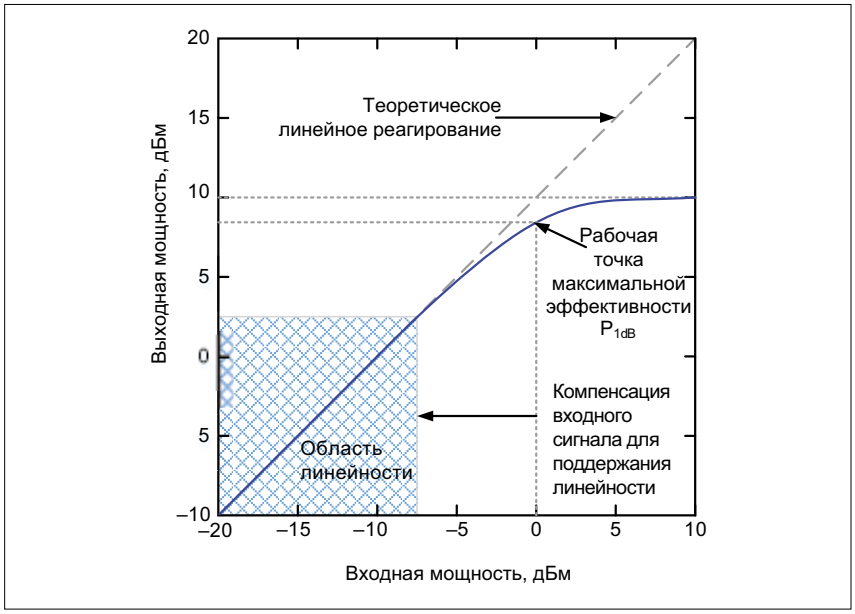

Рис. 1. Линейная область и точка максимальной эффективности усилителя

Таблица 1. Результаты измерения линейности

Средняя входная мощность, дБм	Средняя выходная мощность, дБм	Усиление, дБ	Пиковая выходная мощность	Выходной коэффициент амплитуды, дБ	NPR, дБ	Интермодуляционные искажения 3-го порядка, дБн
–25	–19,7	5,3	–8,8	10,9	38,4	60
–24	–18,6	5,4	–7,8	10,8	39,3	58,5
–23	–17,8	5,2	–7	10,8	39,9	57,2
–22	–16,8	5,2	–6,5	10,3	40,1	55
–21	–15,8	5,2	–5,8	10	39,2	54
–20	–14,7	5,3	–5,3	9,4	36,2	53
–19	–14,1	4,9	–5,2	8,9	33,8	50
–18	–13	5	–4,9	8,1	29,6	47
–17	–12,1	4,9	–4,6	7,5	26,1	45
–16	–11,1	4,9	–4,3	6,8	22,9	42
–15	–10,4	4,6	–4,3	6,1	20,8	34

Уровень входной мощности, вокруг которого все три метода наблюдают значительную нелинейность

Δ = 0,7 дБ

Δ =3,3 дБ

ВАРИАНТЫ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНОСТИ

Существует несколько вариантов измерения линейности усилителя. Три самых распространенных метода:

1) оценка интермодуляционного искажения усилителя (IMD);
2) измерение соотношения сигнал/шум по мощности (NPR);
3) измерение коэффициента амплитуды (CF) или соотношение пикового и среднего уровня (PAPR) входной мощности (дБм).

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНОСТИ

Рассмотрим каждый из перечисленных подходов к измерению линейности усилителя. Для этого используем источник шума Noisecom или двухтональный источник, от которого подается сигнал на усилитель, начиная с –25 с постепенным пошаговым увеличением на 1 дБ до достижения –15 дБм.

Результаты измерений приведены в таблице 1. Такие показатели, как снижение усиления, коэффициент амплитуды, NPR и разность между интермодуляционной составляющей и несущим сигналом, указывают на то, что усилитель ведет себя нелинейно.

Все три метода измерений показывают, что при увеличении мощности усилитель производит компрессию сигнала и работает нелинейно. Более того, результаты измерений свидетельствуют о том, что усилитель начинает компрессию, когда уровень средней входной мощности находится около –20 дБм. Однако степень компрессии можно определить только при измерении коэффициента амплитуды. Необходимо отметить, что, несмотря на снижение усиления, которое составляет около –20 дБм, даже при –15 дБм усиление уменьшается менее чем на 1 дБ.

Напротив, другие измерения линейности показывают гораздо более значительную компрессию пиковой мощности. Например, коэффициент амплитуды уменьшается более чем на 3 дБ. Измерения компрессии, где используется только значение средней мощности, недостаточно для того, чтобы выявить и оценить существенные искажения или ослабления сигналов с высоким коэффициентом амплитуды — например, OFDM-сигналы, используемые в коммуникационных системах 5G и Wi-Fi.

При сравнении трех подходов к измерению линейности очевидны преимущества подхода с коэффициентом амплитуды:

- **Более четкое отображение значимой компрессии сигнала.** Обычные методы, основывающиеся только на среднем значении мощности, будут занижать степень ухудшения сигнала, которое наблюдается у сигналов широкополосной связи.
- **Более низкая стоимость.** В методе с измерением коэффициента амплитуды применяются недорогие источники шума и широкополосные USB-датчики пиковой мощности. Аналоговые же генераторы сигналов значительно увеличивают расходы.
- **Более простые и менее подверженные ошибкам измерения.** Анализаторы спектра могут быть сложными в настройке и создавать трудности с интерпретацией результатов.
- **Более высокая точность.** Погрешность измерения датчика мощности, как правило, составляет десятые доли дБ, в то время как для анализаторов спектра и генераторов сигналов уровни погрешности обычно находятся в диапазоне 1–2 дБ.

Применение комплементарной интегральной функции распределения мощности (CCDF) в дополнение к методу измерения коэффициента амплитуды позволяет оценить вероятность того, что мощность не превысит определенный уровень. В результате метода измерения коэффициента амплитуды мы получаем одно значение, которое основывается на вычислении значения единственного самого высокого пика мощности в выборке измерений. Однако если этот пик появляется один раз из почти миллионной выборки, он может не представлять проблемы во время фактического использования усилителя. Для количественной оценки уровня пикового искажения с помощью CCDF может применяться значение коэффициента амплитуды, которое возникает с определенной вероятностью (например, 0,1% или 1 из 1000 измерений). Это может быть полезно при оценке влияния частоты двоичных ошибок (BER) или амплитуды вектора ошибок (EVM) при компрессии.

Далее будут рассмотрены перечисленные выше инструменты оценки линейности и показаны все преимущества подхода оценки линейности с помощью коэффициента амплитуды.

IMD/ТОЧКА ПЕРЕСЕЧЕНИЯ 3-го ПОРЯДКА

Когда усилитель уходит в режим компрессии, он становится нелинейным, что приводит к возникновению гармоник сигнала. Три гармоники могут смешаться, порождая интермодуляционные помехи. Гармоники 2-го, 3-го порядка, а также гармоника высшего порядка обычно находятся за пределами полосы пропускания усилителя, поэтому легко отфильтровываются. Однако некоторые продукты интермодуляции очень близки

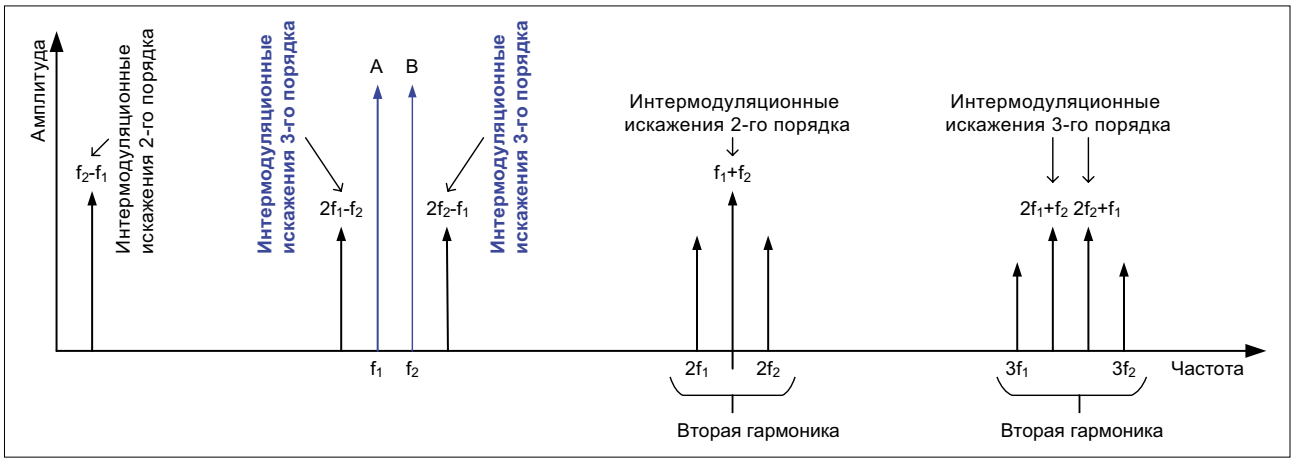

Рис. 2. Интермодуляционные помехи

к сигналам, предназначенным для усиления, и могут вызывать интермодуляционные искажения (IMD). На рис. 2 показаны продукты интермодуляции для двух одинаковых амплитуд (A и B).

Из-за их близости к заданным сигналам для производителей усилителей амплитуда продуктов 3-го порядка становится проблемой, поэтому они часто указывают рейтинг IP3 или значение точки пересечения 3-го порядка. Для того чтобы определить амплитуду интермодуляционных искажений 3-го порядка, строится такой же график, как на рис. 1. Эти искажения увеличиваются со скоростью в три раза больше, чем необходимый сигнал. Пересечение теоретических продолжений этих линий называется точкой пересечения 3-го порядка, что можно обозначить как TOI или IP3. Чем выше значение IP3, тем лучше линейность и ниже искажения IMD.

Для создания этого графика применялись генераторы двухтональных сигналов. А для измерения нужного сигнала и других искажений 3-го порядка — анализатор спектра или векторный анализатор цепей (VNA). Недостаток данного подхода состоит в том, что измерения проводятся с использованием только двух тонов. На практике сигнал, подаваемый на усилитель, часто имеет значительно больше тонов. Например, сигнал LTE-A (5CCs) имеет 6000 эффективных поднесущих или тонов, а сигнал 5G (NR) может иметь 3300 тонов. Два непрерывных тона (CW) не отражают динамическую нагрузку, которую усилитель испытывает при реальной работе. Коэффициент амплитуды, равный 3 дБ для двухтонового сигнала, для сигналов 5G может приблизиться к 15 дБ. Поэтому при увеличении мощности всего на два тона источник питания и тепловое поведение могут измениться сильнее, чем для многотонального или шумоподобного сигнала. Другим фактором является фазовая когерентность между тонами. Если они случайны по фазе, то измерение может отличаться от когерентных по фазе тонов. А в случае сигналов LTE или 5G ситуация становится еще сложнее, поскольку физический уровень основан на ортогональности несущих/тонов.

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ШУМА

Другой подход вычисления линейности усилителя — определение коэффициента мощности шума (NPR). Здесь для моделирования мультитонового/несущего сигнала используется белый шум. Сигнал с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN), например, от генератора сигнала Noisecom, имеет высокий коэффициент амплитуды CF и представляет собой сигнал широкополосной связи, что намного эффективнее, чем двухтональный тестовый стимул IMD. Шум ограничивается по полосе фильтром либо до полезной полосы пропускания усилителя, либо до полосы ожидаемого сигнала, который будет принимать усилитель.

Результирующий сигнал проходит через режекторный фильтр (обычно > 50 дБ ниже от амплитуды полосы пропускания) с шириной пропускания около 1% или ниже ширины пропускания отфильтрованного шума (рис. 3). Когда сигнал подается на усилитель, амплитуда увеличивается и становится возможным определить его нелинейное поведение. Как уже обсуждалось выше, в нелинейной области тоны будут смешиваться, порождая интермодуляционные искажения. Так как сигнал шума эквивалентен большому количеству тонов, отдельные IMD искажения нелегко измерить. Здесь же мы имеем дело с совокупной мощностью IMD на частоте настройки режекторного фильтра. По мере увеличения искажения эффективная глубина полосы режекции будет уменьшаться. На рис. 4 синий сигнал — это входной сигнал усилителя с глубиной полосы режекции ~40 дБ. Черный сигнал — это усиленный сигнал. Как видно, глубина режекции существенно уменьшилась, это означает, что усилитель находится в компрессионном состоянии. Подобно тестированию с двухтональными IMD искажениями оценка по методу измерения коэффициента NPR обычно произ-

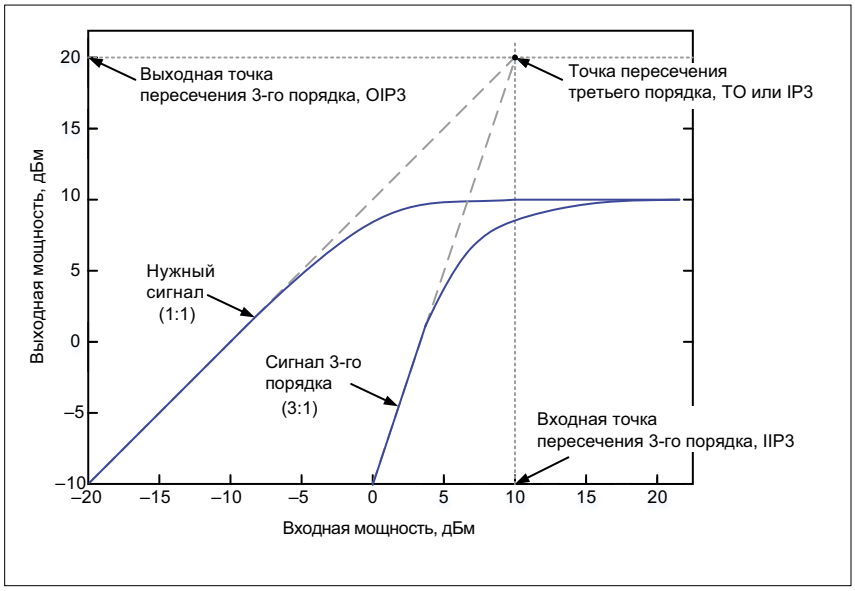

Рис. 3. Определение коэффициента мощности

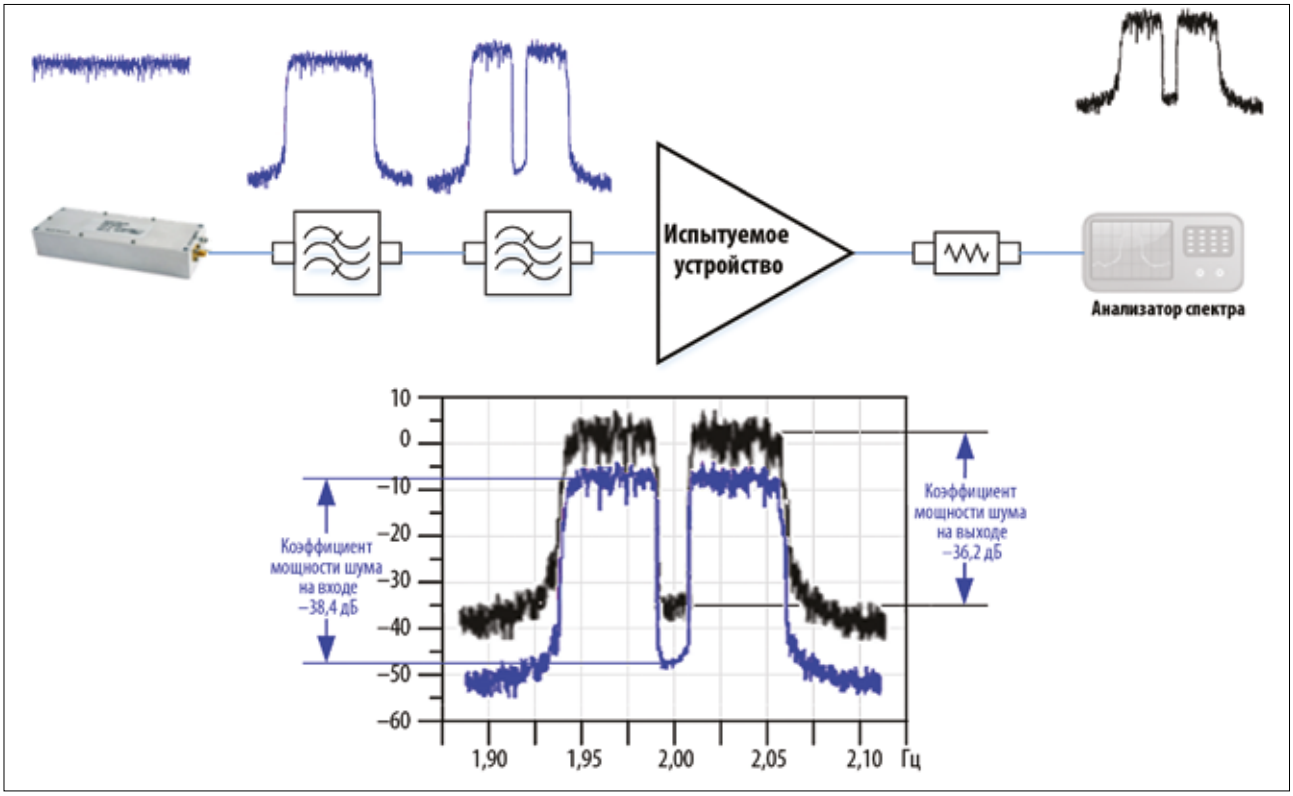

Рис. 4. Определение коэффициента мощности

водится с помощью анализатора спектра или VNA. Дополнительно для наблюдения за интересующими продуктами интермодуляционных искажений необходим высококачественный фильтр с достаточной глубиной режекции.

КОЭФФИЦИЕНТ АМПЛИТУДЫ

Третий подход оценки линейности усилителя — измерение коэффициента амплитуды. Коэффициент амплитуды — это соотношение пикового значения мощности к среднему значению. Как и в подходе с измерением NPR, на усилитель подается сигнал шума с ограниченной шириной полосы для того, чтобы стимулировать усилитель сигналом, наиболее близким к рабочему диапазону, в котором усилитель будет функционировать в реальных условиях. Входной сигнал подается с помощью направленного соединителя или распределителя сигналов, далее измеряется посредством широкополосного датчика пиковой мощности. Полоса видеосигнала датчика (а также соединителя или разветвителя) должна быть не меньше ширины полосы сигнала шума. Иначе измерения, полученные датчиком, будут искажены. На рис. 5 и 6 показаны два измерения мощности. Синей линией показаны измерения с помощью датчика с недостаточной шириной полосы видеосигнала. Красной — влияние недостаточной ширины полосы пропускания.

Второе измерение производится на выходе из усилителя (может потребоваться затухание, чтобы сигнал оставался в диапазоне измерения датчика). Сравниваются коэффициенты амплитуды входного и выходного сигналов. Если выходной коэффициент амплитуды меньше, то усилитель сжимает самые высокие пики сигнала. Кроме того, путем сравнения входной и выходной средней мощности можно определить коэффициент усиления. Для наиболее точного измерения можно использовать третий датчик — он определит, отражается или усиливается часть входного сигнала. На рис. 5 показана схема тестовой установки. Замечание: простое наблюдение за изменениями коэффициента усиления с измерением средней мощности не дает полного описания линейности усилителя.

Среднее уменьшение коэффициента усиления может быть значительно ниже, чем компрессия, наблюдаемая для мультитонового сигнала. Этот эффект будет продемонстрирован дальше.

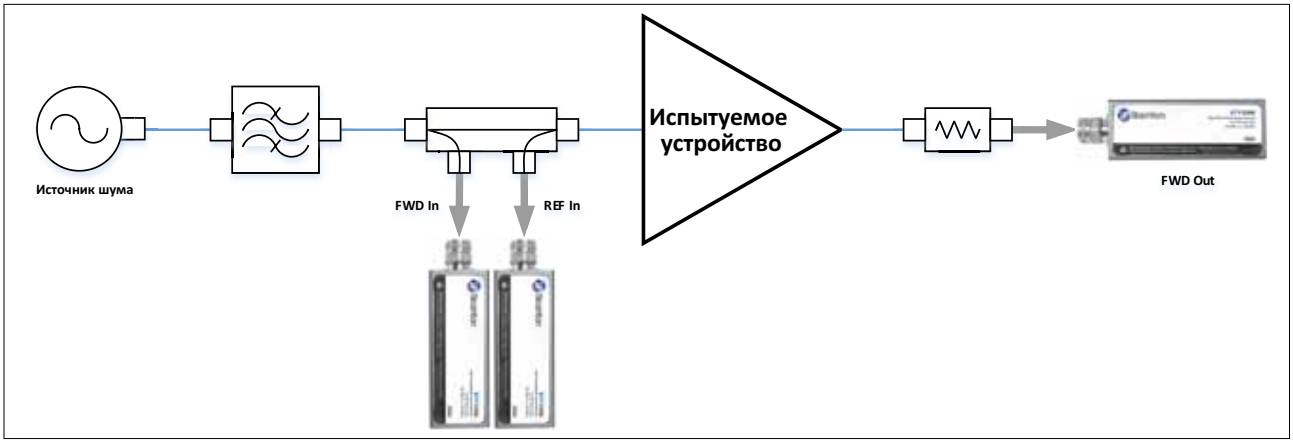

Рис. 5. Оценка линейности усилителя методом коэффициента амплитуды

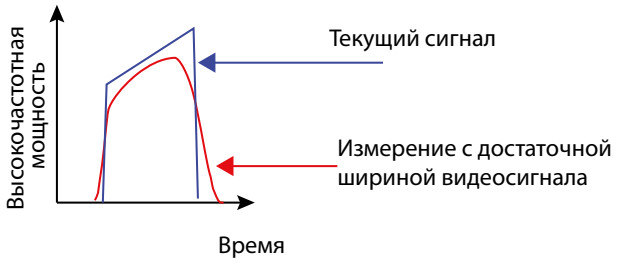

Рис. 6. Влияние ширины полосы на результаты измерения

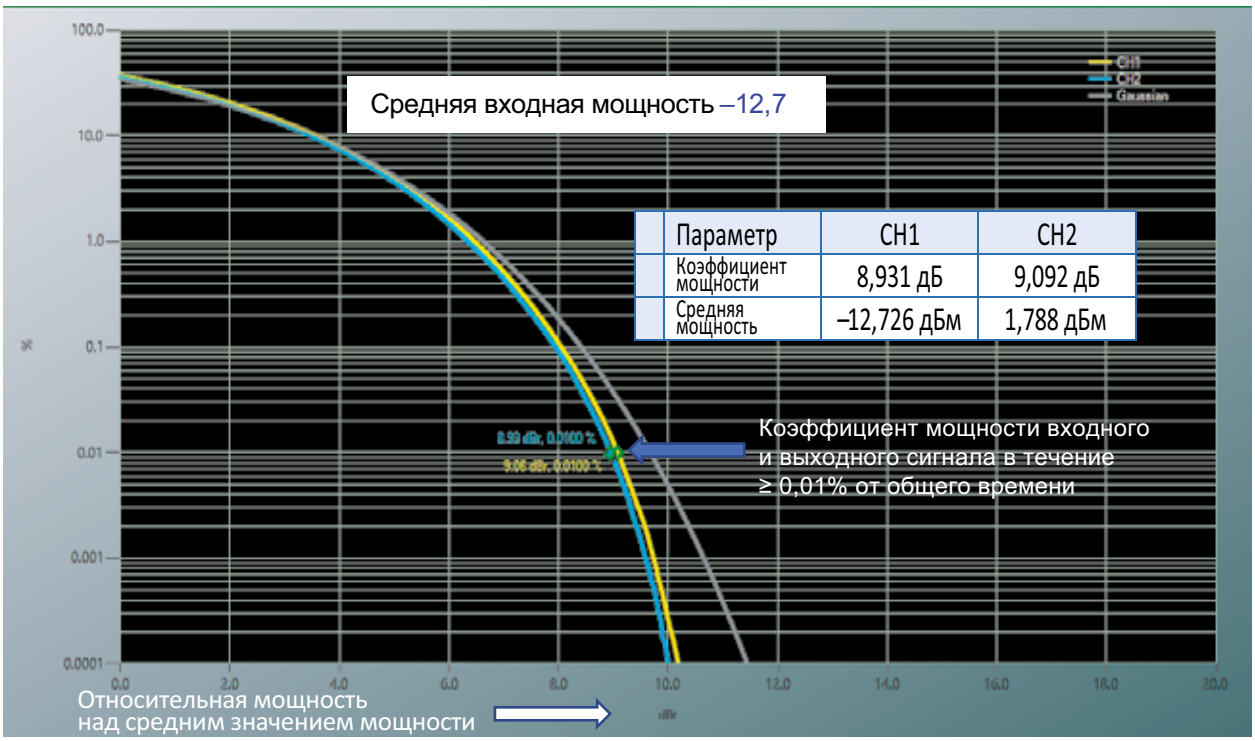

Рис. 7. Осциллограмма измерения коэффициента мощности

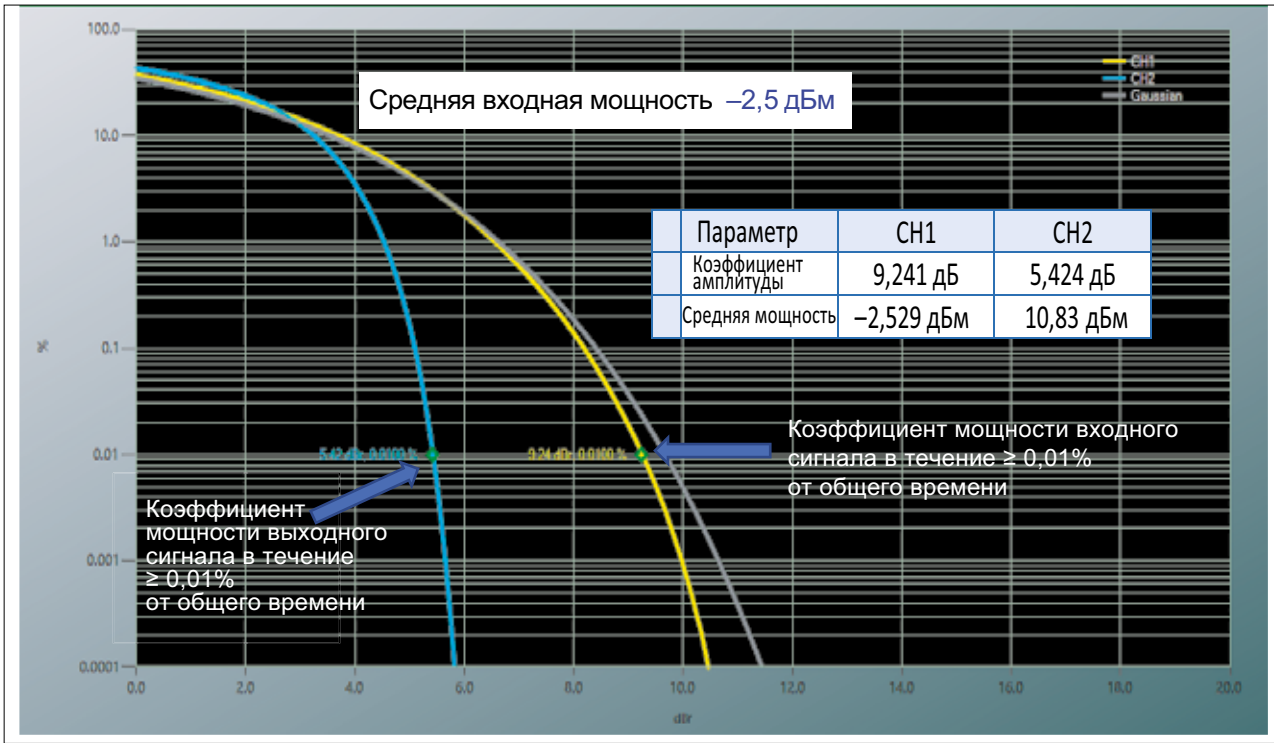

Рис. 8. Осциллограмма измерения коэффициента мощности при увеличении входной мощности

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ КУМУЛЯТИВНАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для того чтобы получить дополнительную информацию о производительности усилителя, далее можно использовать дополнительную кумулятивную функцию распределения (CCDF). Кривая ACCD показывает количество времени, которое сигнал проводит выше среднего уровня мощности измеренного сигнала на каждом уровне мощности относительно среднего. Или, что эквивалентно, кривая CCDF показывает вероятность того, что мощность сигнала будет выше среднего значения на каждом уровне мощности. Со средним уровнем входного сигнала в –12,7 дБм тестируемый усилитель показывает значение коэффициента амплитуды 9 дБ на входе (CH1) и на выходе (CH2) приблизительно в течение 0,01% от общего времени (рис. 7).

Однако при увеличении мощности на 10 дБ до –2,5 дБм коэффициент амплитуды на выходе существенно снижается до 5,4 дБ, указывая на значительную степень компрессии усилителя (рис. 8).

ПРИМЕР ОЦЕНКИ РЕАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДЫ

Эта дополнительная информация, полученная для коэффициента амплитуды и функции CCDF, показала, что некоторые классы усилителей можно использовать для областей, которые ранее считались неприемлемыми, например, связь и соответствующие ей приложения. Так, в высокочастотных системах Empower модели 2223 применялись GaN-усилители на SiC класса AB широкополосных высокомощных усилителей (HPA). Данные усилители обеспечивают широкие частотные характеристики (500–6000 МГц), высокий коэффициент усиления (53 дБ) и минимальную выходную мощность 150 Вт. Класс AB отличается небольшими размерами и очень высокой пропускной способностью и эффективностью. Это пример многорежимного усилителя, сочетающего простое решение и необходимые линейные характеристики. Он подходит для применения в таких областях, как связь или тестирование. С обычными методами измерения линейности такого усилителя будет сложно характеризовать его линейность, а значит, оценить его пригодность для передачи сигналов с цифровой модуляцией.

На модели 2223 были выполнены две проверки линейности для определения параметра P_{1dB}. В первом испытании по стандартному методу используется непрерывный сигнал (далее обозначен как метод CW), в котором уровень входной мощности увеличивается до тех пор, пока не будет наблюдаться компрессия на 1 дБ. Это было сделано на нескольких частотах по всему диапазону, и результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерения точки P_{1dB} методами CW и CF

Частота, МГц	P1dB по методу CW, дБм	P1dB по методу CF, дБм
500	48,5	50,5
1000	49	51,6
1500	49	51,7
2000	47,9	51,8
2500	48,2	51,6
3000	46,5	49,1
3500	44,8	47,8
4000	46	47,2
4500	46,4	47,7
5000	47	48,4
5500	45,5	45,7
6000	45,8	45,1

Во втором тесте для измерения P_{1dB} использовался метод измерения коэффициента амплитуды (далее обозначен как метод CF). В этом случае на усилитель подается сигнал 64QAM с коэффициентом амплитуды 6,3 дБ. Для определения точки компрессии на уровне 1 дБ по методу коэффициента амплитуды и CCDF усилитель работает на каждой из тестовых частот, а входная мощность увеличивается до тех пор, пока измеренный коэффициент амплитуды выходного сигнала не уменьшится на 1 дБ до 5,3 дБ.

В среднем метод CW показывает, что точка компрессии P_{1dB} примерно на 2 дБ ниже, чем точка P_{1dB} при измерении по методу CF (см. таблицу 2). Причиной разницы является коэффициент усиления транзистора в зависимости от изменения температуры. В усилителе класса AB транзистор потребляет больше энергии по мере увеличения выходной мощности. При повышении температуры перехода коэффициент усиления транзистора уменьшается. В усилителе класса A можно было бы увидеть противоположный эффект. В большинстве GaN HPA усиление будет варьироваться в пределах –0,012 дБ/°C (температура перехода) на каскад усиления.

К примеру, рассмотрим усилитель класса A, на который подается сигнал CW. Когда выходная мощность низкая, транзисторы потребляют б*о*льшую часть мощности, а температура перехода близка к своему максимуму для конкретных условий эксплуатации. Поскольку выходная мощность растет, температура перехода транзистора снижается.

Это приводит к расширению динамического диапазона усиления, который увеличивает «действительную» точку компрессии. Однако когда на такой же усилитель подается модулированный сигнал CF, расширения динамического диапазона усиления не происходит, поскольку температуры перехода коррелируют со средней мощностью и, следовательно, остаются высокими. Это еще раз иллюстрирует довод, что на усилитель необходимо подавать сигнал подобный тому, с которым усилителю придется работать.

В линейном усилителе мощности (УМ) выходная мощность может быть описана уравнением:

$$P_{out}(\omega t) = \alpha + Gxf(\omega t),$$

где $f(\omega t)$ — входной сигнал, α — постоянная, G — коэффициент усиления усилителя. G может также меняться с температурой, что описывается выражением (–0,012 дБ/°C) × (тепловое сопротивление) перехода (°C/W) × (рассеиваемая мощность). В классе усилителей AB, если тепловое сопротивление составляет 1 °C/W, а рассеивание мощности от слабого сигнала к сильному сигналу увеличивается на 50 Вт, уравнение покажет снижение коэффициента усиления на –0,6 дБ исключительно из-за увеличения температуры перехода. И наоборот, при работе того же устройства в конфигурации класса A рассеиваемая мощность уменьшится, так как теперь часть мощности пойдет на нагрузку. Согласно приведенному выше уравнению, результирующее усиление теперь будет увеличиваться, потому что рассеиваемая мощность не уменьшается.

В обоих случаях изменение коэффициента усиления относится к истинной линейности усилителя мощности (линейность, которая действительно меняет целостность входного сигнала). Истинная линейность оценивается путем измерения компрессии пиков сигнала относительно средней мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайшие годы применение технологии GaN будет развиваться, в пер-

КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА

Сергей Шихов, директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ»

В связи со все большим применением устройств на базе GaN, вопрос измерения характеристик таких устройств стоит очень остро. Предлагаемый авторами статьи метод измерения линейности обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционными.

вую очередь благодаря достижениям в области коммерческих и военных радиолокационных систем, а также созданию сетей 5G, которые предъявляют очень высокие требования к линейности, поэтому обычных инструментов для оценки линейности усилителей, используемых в таких сетях, уже недостаточно для прогнозирования реальных характеристик. По сравнению с обычными инструментами предлагаемый метод измерения коэффициента амплитуды в сочетании со статистическим анализом, а именно оценкой дополнительной кумулятивной функции распределения, обеспечивает более четкое и точное указание на компрессию сигнала и представляет собой более дешевую альтернативу, более простые, менее подверженные ошибкам измерения и более высокую точность.

Кроме того, подход, предлагаемый авторами статьи, показывает, как усилители, ранее считавшиеся неподходящими для применения в области связи, на самом деле могут быть хорошей альтернативой традиционно используемым усилителям.