

ОЦЕНКА АДДИТИВНОГО ФАЗОВОГО ШУМА В СВЧ-УСИЛИТЕЛЯХ

В предлагаемой статье рассматривается способ точных измерений аддитивного фазового шума СВЧ-усилителей на основе метода фазовой нейтрализации и определяются пути улучшения оценки характеристик системного шума и оптимизации схемы измерения для расширения возможностей контроля фазового шума. С помощью этих методов были исследованы тенденции изменения фазового шума с учетом влияния особенностей выбора типа транзисторов СВЧ-усилителя и уровней компрессии выходной мощности. Полученные результаты и рекомендации подтверждены тестированием СВЧ-усилителей из одной партии.

ВВЕДЕНИЕ

Сигналы большой мощности с минимальным фазовым шумом имеют решающее значение для радаров и систем связи, особенно с широким внедрением их пятого поколения (5G), что из-за присущих им особенностей, потребует широкого использования высококачественных усилителей для области сверхвысоких частот (СВЧ). Требования по минимизации шумов вызваны тем, что фазовый шум напрямую связан с чувствительностью приемника.

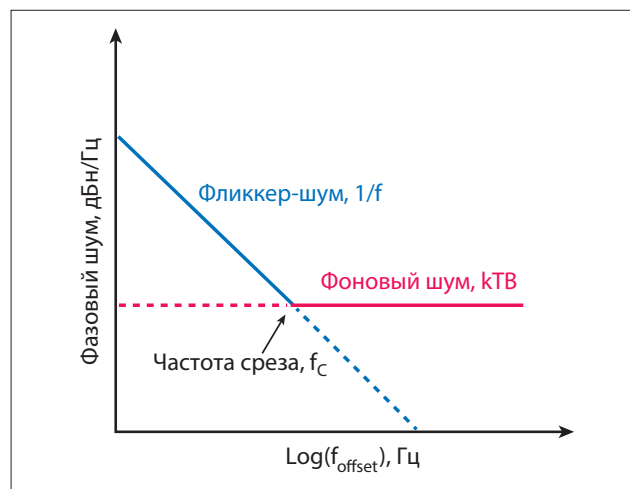
Как известно, в основе каждой системы лежит генератор, который сам по себе может иметь очень низкие фазовые шумы. Однако генераторы, как правило, отличаются и низкой выходной мощностью, а значит, их сигнал часто приходится усиливать. Добавление усилителей, кроме нелинейных искажений, создает и другие проблемы, в первую очередь — это добавление собственных шумов к сигналам, проходящим через систему. Такой шум называется аддитивным, то есть добавленным (*additive* (англ.) — добавка, дополнение и пр.). Этот аддитивный фазовый шум может маскировать цель или тем или иным образом оказывать влияние на целостность сигнала (для описания данного явления в современной технической литературе введен термин *signal integrity*, означающий наличие достаточных для безошибочной передачи качественных характеристик электрического сигнала) и его передачу.

В связи с изложенным, одной из серьезных проблем, с которыми сталкиваются разработчики систем, является количественная оценка уровня аддитивного фазового шума, поскольку такой параметр сложно измерить. В этой статье мы обсуждаем аддитивный фазовый шум и причины, из-за которых уменьшение вклада усилителя в фазовый шум важно для достижения заданной общей, как сейчас принято говорить, производимости системы. Для надежной оценки продуктов мы также продемонстрируем методы, необходимые для улучшения точности измерений аддитивного фазового шума по спектрам частот и дополнительно исследуем влияние на аддитивный фазовый шум типа усилителя (его топологии) и уровня компрессии, а также определим, как оптимизация этих характеристик может оптимизировать характеристики усилителя в части минимизации фазового шума. И наконец, проверим выводы посредством испытаний и представим обобщенную информацию, которая будет полезна для инженеров-разработчиков, связанных с проектированием усилителей для области сверхвысоких частот.

АДДИТИВНЫЙ ФАЗОВЫЙ ШУМ

Фазовый шум — один из важнейших критериев оценки частотной стабильности любого источника сигнала (условно — генератора). А частотная стабильность является качественным показателем того, насколько точно данная система может воспроизводить одну и ту же выходную частоту в заданном временном интервале. То есть понятие «фазовый шум» относится к стабильности частоты сигнала во времени [1–3]. В идеале генератор создает идеальную синусоиду на сингулярной частоте, которую мы называем несущей, или полезным сигналом, имеющим нулевой фазовый шум. Однако из-за шума все генераторы ведут себя неидеально.

Есть два типа фазовых шумов — детерминированные (фонный шум) и стохастические. Как правило, под понятием «фонный шум» понимают дискретные сигналы на определенных отстройках от несущей частоты, которые могут быть четко соотнесены с определенными факторами применительно к данному источнику сигнала. Однако в контексте настоящей статьи это понятие имеет подразумеваемое шум постоянного уровня с широким равномерным спектром, в данном случае — тепловой. Стохастические флуктуации имеют случайную природу, и именно их обычно называют фазовым шумом. Причиной таких флуктуаций становится тепловой шум, дробовый шум и фликкер-шум, увеличивающийся по мере приближения к по-



▲ Рис. 1. Фазовые шумы генератора

стоянному напряжению (поэтому его характеризуют как шум типа $1/f$). В контексте статьи под понятием стохастического шума будет рассматриваться фликкер-шум (рис. 1).

Как показано на рис. 1, фоновый шум является постоянным во времени и доминирует в высокочастотном спектре вдали от частоты источника, как было сказано, может служить тепловой шум. Согласно формуле Найквиста, мощность теплового шума P_N , приходящаяся на полосу B , равна:

$$P_N = 4kTB,$$

где: k — постоянная Больцмана; B — ширина полосы частот; T — температура системы. Таким образом, фоновый шум связан не только с самим генератором, но и с условиями эксплуатации.

Другой тип фазового шума связан с фликкер-шумом, имеющего зависимость от частоты, который проявляется вокруг желаемой частоты, а не одного тона в частотной области. Как показано на рис. 1, фликкер-шум (выделен синим цветом) уменьшается линейно в логарифмическом масштабе, пока не достигнет частоты среза, при которой в спектре уже преобладает высокочастотный фоновый шум (выделен красным цветом). Поскольку этот, второй источник фазового шума создается вблизи несущей, он вызывает наиболее значительные помехи для полезного сигнала.

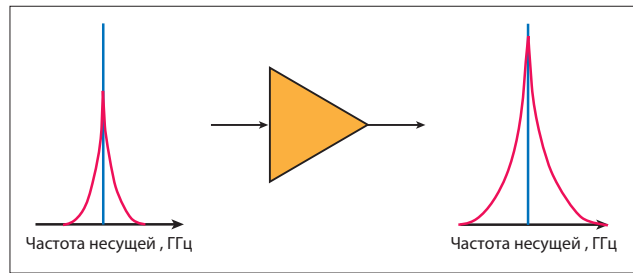
В системе, требующей высокой чувствительности, генератор с низким абсолютным фазовым шумом становится идеальным генератором сигналов. Однако для многих приложений необходимы более высокие уровни мощности, чем может генерировать стандартный генератор, поэтому в цепь передачи следует вводить усиление. Но шум (рис. 2) вместо того, чтобы усиливать только несущий сигнал генератора (показан синим цветом) и связанный с ним его собственный фазовый шум (показан красным цветом), усилитель добавляет в сигнал и свой собственный фазовый шум.

Как видно на рис. 2, ширина и высота выходного фазового шума увеличиваются из-за аддитивного фазового шума усилителя. Если фазовый шум усилителя слишком высок, он может превысить шум, связанный с генератором, что устраняет преимущества генератора с низким уровнем собственных шумов. Соответственно, для обеспечения должного функционирования ВЧ-систем крайне важно правильное определение характеристик и измерение фазового шума усилителей и других компонентов системы.

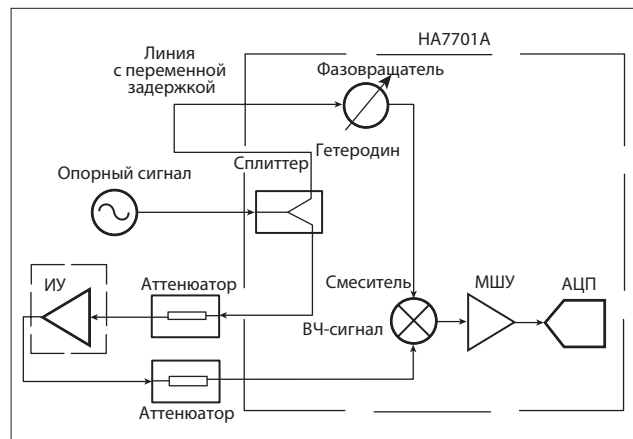
ИЗМЕРЕНИЕ АДДИТИВНОГО ФАЗОВОГО ШУМА

Аддитивный фазовый шум, как известно, измерить довольно непросто, так как часто его уровень лежит на 30–40 дБ ниже, чем уровень общего фазового шума опорного сигнала [3, 4]. Таким образом, для выполнения измерения используется метод фазовой нейтрализации. Этот метод был рассмотрен в [5] и реализован в коммерчески доступных анализаторах фазового шума, таких как HA7701A компании Holzworth Instrumentation, который был использован в предлагаемом исследовании. Блок-схема измерительной установки, включая внутренние компоненты анализатора, показана на рис. 3. Представленная блок-схема демонстрирует, как система измерения на основе метода фазовой нейтрализации изолирует аддитивный фазовый шум усилителя.

Опорный сигнал для системы обеспечивается внешним генератором и разделяется сплиттером для гетеродина и ВЧ-трактов. Радиочастотный сигнал проходит через тестируемое устройство, а для установки соответствующего уровня возбуждения используются два аттенюатора. Аттенюаторы перед усилителем управляют уровнем входной мощностью и уровнем компрессии, поскольку сигнал высокого уровня может перегрузить усилитель. Аттенюатор, установленный после усилителя, защищает



▲ Рис. 2. Иллюстрация влияния усилителя на фазовый шум конечной системы



▲ Рис. 3. Испытательная установка для измерения фазового шума

внутренний смеситель анализатора от перегрузки. В зависимости от величины затухания оба аттенюатора вносят погрешность в измерения фазового шума, не превышающую 1 дБ. Если выходная мощность усилителя очень мала, то минимизация ослабления ВЧ-возбуждения будет полезна для того, чтобы анализатор фазового шума мог обнаруживать входной сигнал.

Канал гетеродина включает линию задержки с переменной временной задержкой и фазовращатель на 90° , необходимый для поддержания квадратуры между трактами гетеродина и ВЧ-сигнала. Подавление фазы в значительной степени зависит от согласования фаз обоих сигналов, поэтому переменная задержка важна для преодоления внутренних ошибок фазовращателя. Выполнив ручную настройку тракта гетеродина, мы увидели, что измерения улучшились до 4 дБ. Важно отметить, что на стороне гетеродина необходимы максимально короткие кабели и тракты с низкими потерями.

Эти условия требуются для обеспечения достаточной входной мощности смесителя, помогая компенсировать ограничения выходной мощности стандартных источников сигнала, особенно на более высоких частотах. Высокий уровень гетеродина 15–18 дБм (дБм или дБмВт — это отношения мощностей в децибелах (дБ) относительно одного милливатта (мВт)) снижает шум амплитудной модуляции (АМ) в фазовом детекторе, что в свою очередь уменьшает уровень погрешности измерения системы. После того как смеситель подавляет опорный сигнал, оставшийся сигнал представляет собой аддитивный фазовый шум, связанный с усилителем. Анализатор фазового шума усиливает его с помощью внутреннего малошумящего усилителя (МШУ). В итоге сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который оцифровывает уровень его напряжения. Полученная кривая обеспечивает развертку фазового шума одной боковой полосы по частоте смещения.

Используя этот метод, мы измерили СВЧ-усилители из стандартной линейки продуктов компании Qorvo, протестировав их для различных уровней мощности и диапазона частот. В таблице приведены медианные значения фазового шума для четырех типов СВЧ-усилителей. По сравнению с фазовым шумом опор-

Таблица. Сравнение фазового шума СВЧ-усилителей компании Qorvo

Наименование усилителя	Технология	Диапазон рабочих частот, ГГц	Выходная мощность насыщения, дБм	Фазовый шум, дБн/Гц (при отстройке 10 кГц)
CMD315	pHEMT	4–10	21	-154
CMD316	pHEMT	6–20	18,5	-149
CMD317	pHEMT	1–24	24	-160
CMD274	HBT	2–20	22	-165

Примечание.

pHEMT — транзистор с высокой подвижностью электронов, полевой транзистор, в котором для создания канала используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны.
HBT — биполярный транзистор с гетеропереходом.

ного сигнала (около -120 дБн/Гц) измененные низкие значения фазового шума показывают эффективность подавления шума тестируемой системы.

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ

Как показано в таблице, фазовый шум четырех СВЧ-усилителей — малошумящего, драйвера и широкополосных распределенных СВЧ-усилителей — находится в пределах примерно от -150 до -165 дБн/Гц. Чтобы объяснить различия, мы сравнили топологии СВЧ-усилителей, но обнаружили, что это не является определяющим фактором.

Скорее всего, различия в основном объясняются технологией устройства.

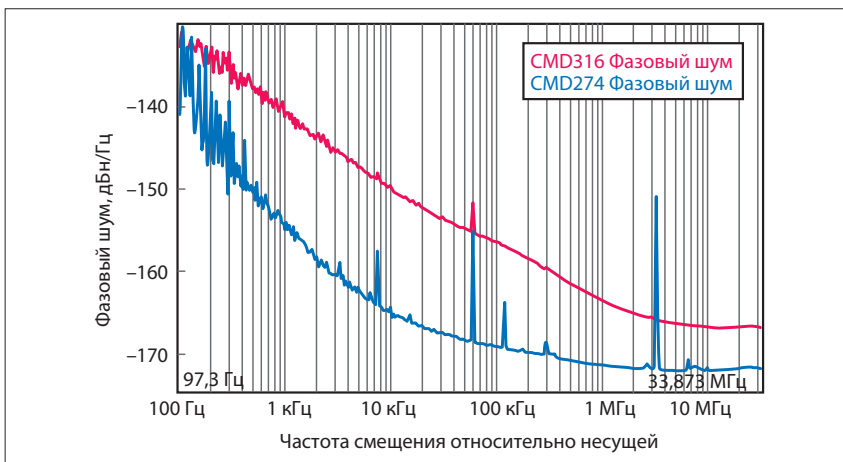
На рис. 4 сравнивается фазовый шум СВЧ-усилителя на pHEMT транзисторах (CMD316) с шумом усилителя, использующим транзисторы HBT (CMD274). Измерение фазового шума СВЧ-усилителя технологии HBT показали, что при работе в режиме насыщения и на той же частоте он находится на 10–15 дБ ниже, чем у СВЧ-усилителя по технологии pHEMT. Хотя СВЧ-усилители pHEMT имеют более высокую выходную мощность и лучшие частотные характеристики, чем СВЧ-усилители на HBT, они обычно имеют худший фа-

зовый шум. По сравнению с pHEMT, HBT-транзисторы имеют более низкую подвижность электронов, что приводит к меньшим колебаниям заряда и движения электронов в каналах устройства [6]. Меньшие вариации вносят вклад в меньшее количество повышающих преобразований в СВЧ-усилителях HBT, поэтому они имеют значительно более низкий фазовый шум, чем у СВЧ-усилителей технологии pHEMT [7].

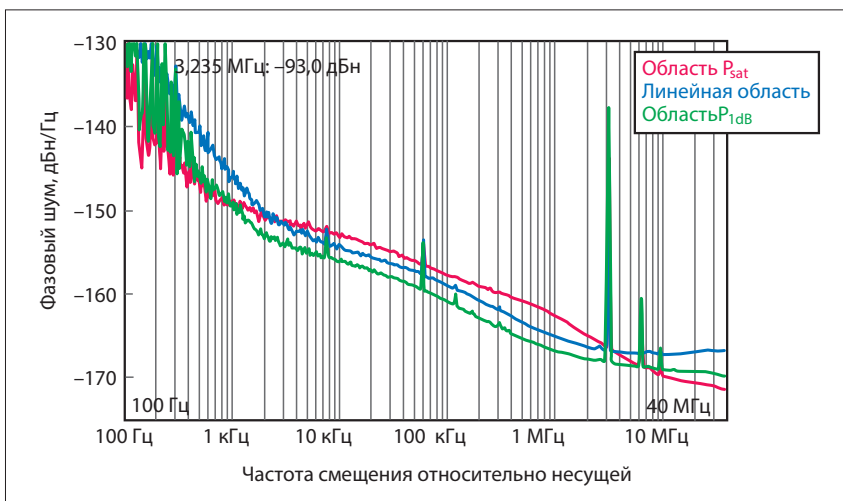
Второй тенденцией, исследуемой для СВЧ-усилителей на транзисторах технологий pHEMT и HBT, было выявление взаимосвязи между фазовым шумом и компрессией усилителя, при этом основное внимание уделялось трем основным областям передаточной характеристики усилителя: линейной, точке насыщения и компрессии в 1 дБ. В линейной области усилителя выходная мощность прямо пропорциональна входной мощности. При насыщении (P_{sat}) усилитель по мере увеличения входной мощности уже не дает прироста выходной мощности. При компрессии на 1 дБ (P_{1dB}) усиление усилителя уменьшается на 1 дБ от его линейного уровня, что является промежуточной областью между линейной передаточной характеристикой и областью насыщения. Чтобы сравнить фазовый шум в этих трех областях, мы использовали аттенюатор. Он необходим для регулирования входной мощности усилителя таким образом, чтобы можно было постоянно измерять уровни фазовых шумов и видеть тенденции в их изменении.

На рис. 5 показаны результаты измерения фазового шума СВЧ-усилителя CMD315 (на транзисторах pHEMT), действующего на разных уровнях компрессии. Фазовый шум минимален при P_{1dB} , достигая при отстройке на 10 кГц рабочей частоты значения -156,3 дБн/Гц, что является значительным улучшением фазового шума по сравнению с функционированием в линейном режиме или при P_{sat} . На частотах, близких к несущей, многие другие СВЧ-усилители демонстрируют ту же тенденцию зависимости фазового шума от компрессии, то есть фазовый шум обычно минимизируется на уровне P_{1dB} , до которой следует область линейной передаточной характеристики возбуждения. Работа в режиме насыщения обычно приводит к самому высокому фазовому шуму, часто на 3–4 дБ выше по сравнению с шумом в области P_{1dB} .

Мы полагаем, что оптимальный результат на уровне мощности P_{1dB} можно объяснить с учетом искажений в усилителях, вызванных амплитудно-амплитудной (AM-AM) и амплитудно-фазовой (AM-PM) модуляцией. AM-AM относится к изменению выходной амплитуды усилителя в зависимости от уровня вход-



▲ Рис. 4. Сравнение фазовых шумов СВЧ-усилителей CMD274 (на транзисторах HBT) и CMD316 (на транзисторах pHEMT), оба в условиях насыщения относительно рабочей частоты 6 ГГц



▲ Рис. 5. Зависимость фазового шума СВЧ-усилителя pHEMT CMD315 от уровня сигнала. Измерение проведено со смещением от несущей частоты 6 ГГц

ной мощности, а AM-PM относится к изменению выходной фазы сигнала в зависимости от изменений входной амплитуды. Каждый тип модуляции вносит свой вклад в аддитивный фазовый шум усилителя, поэтому минимизация таких искажений минимизирует и общие фазовые шумы. Искажения AM-AM и AM-PM в СВЧ-усилителе CMD315 (на транзисторах рHEMT) показаны на рис. 6.

Обратите внимание, что тенденции изменения искажений AM-AM и AM-PM, по-видимому, тесно коррелируют с уровнями мощности насыщения усилителя. Одно из объяснений может быть следующим: в линейной области (входная мощность менее 0 дБм) искажения AM-AM и AM-PM минимизируются. Любой шум AM на входе будет проявляться в первую очередь как усиленный неискаженный шум AM на выходе и вызовет минимальный дополнительный фазовый шум. Когда выходной сигнал усилителя подвергается компрессии с входной мощностью около 2 дБм, спад его усиления ослабляет шум AM-AM и снижает его влияние на девиацию фазы на выходе. Однако в то же время начинают расти фазовые искажения, связанные с модуляцией AM-PM. Искажения AM-PM увеличиваются по мере того, как усилитель достигает глубокого насыщения, в то же время влияние шума AM-AM уменьшается еще больше. Следовательно, как нам кажется, вклад в аддитивный фазовый шум усилителя максимизируется в линейной области за счет шума AM-AM и в области насыщения за счет искажения AM-PM. Однако, как показано на рис. 5, самый низкий фазовый шум усилителя CMD315 имеется в области P_{1dB} . Эта область представляет собой почти идеальную ситуацию, когда искажение AM-AM частично подавлено, в то время как искажение AM-PM все еще невелико — менее 2° при входной мощности 2 дБм (рис. 6). Следовательно, можно сделать вывод, что работа усилителя на уровне мощности P_{1dB} дает минимальный общий шум устройства и, соответственно, самый низкий аддитивный фазовый шум. Многие СВЧ-усилители, выполненные на рHEMT- и HBT-транзисторах на основе арсенида галлия (GaAs), следуют этой тенденции, однако данный подход не может быть универсальным для всех СВЧ-усилителей, особенно для тех, в которых искажения AM-PM относительно велики и при более низкой входной мощности.

Наконец, обратим внимание на одно весьма любопытное явление, которое мы ясно видим на рис. 5, где показаны тенденции изменения фазового шума при отстройке от частоты несущей на 2 МГц или более. На этих более высоких частотах смещения для достижения наименьшего фазового шума предпочтительным уровнем мощности становится P_{sat} [8]. Эта зависимость определяется соотношением:

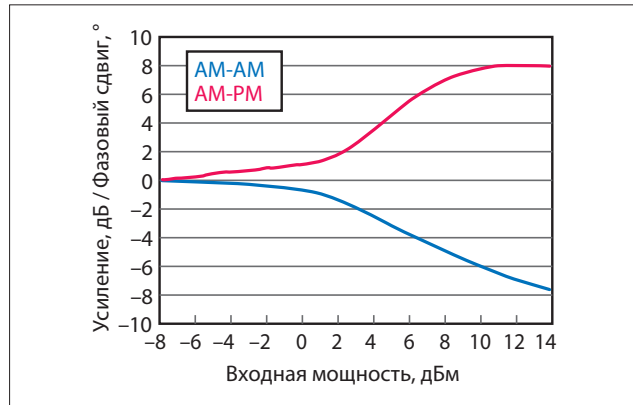
$$L = -177 - (P_{in}) + NF,$$

где: L — фазовый шум после выравнивания спектра; -177 — это мощность теплового шума при комнатной температуре; P_{in} — мощность сигнала, подаваемого на усилитель; NF — коэффициент шума усилителя.

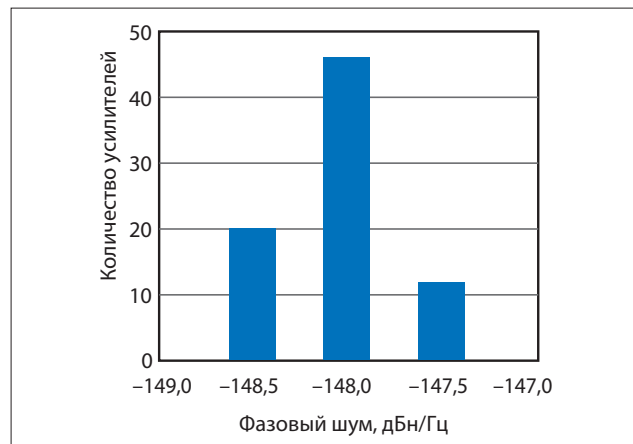
Когда усилитель входит в режим насыщения, его входная мощность увеличивается больше, чем его выходной шум, что приводит к уменьшению фазового шума на высоких частотах смещения. Поскольку нас больше беспокоило влияние фазового шума при более низких смещениях, например ниже 100 кГц, то мы дополнительно не исследовали эту тенденцию, и она осталась, как говорится, за кадром.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФАЗОВОГО ШУМА

Поскольку фазовый шум, безусловно, будет варьироваться не только в зависимости от типа усилителя и от партии к партии усилителей одного типа, то системным инженерам важно знать границы этого изменения, то есть варибельность фазовых шумов. Мы протестировали фазовый шум на серийных



▲ Рис. 6. Искажения AM-AM и AM-PM в СВЧ-усилителе CMD315 (на транзисторах рHEMT)



▲ Рис. 7. Распределение фазового шума в партии СВЧ-усилителей CMD264 при отстройке на 10 кГц от несущей 8 ГГц и компрессии 1 дБ

СВЧ-усилителях CMD264 как стандартного малошумящего усилителя. Это позволило нам убедиться, что взаимосвязь между фазовым шумом и мощностью одинакова для всех усилителей в партии. Корпусированные усилители были протестированы вручную с использованием расширенной установки для анализа фазового шума, которая включала ручное нестандартное испытательное приспособление и более длинные кабели. Поскольку устройство уменьшило возможности подключения и уровни мощности драйвера, то средний фазовый шум, измеренный по партии, по сравнению с исходным базовым значением немного увеличился.

На рис. 7 показано распределение фазового шума при отстройке 10 кГц для 78 устройств в одной партии при уровне мощности P_{1dB} . Изменение фазового шума соответствует нормальному распределению среднего значения для всех протестированных устройств. Значения фазового шума имеют диапазон $\sim 1,3$ дБ и стандартное отклонение 0,3 дБ, что является относительно жестким распределением для такого устройства. Сходство указывает на то, что фазовый шум больше связан с полупроводниковым процессом, используемым для усилителя, а не с производственными отклонениями между устройствами. Кроме того, сам предел погрешности достаточно мал, чтобы нельзя было сбрасывать со счетов связь между уровнем компрессии и фазовым шумом как ошибку измерения.

Выводы

В статье мы рассмотрели использование метода подавления фазы для точных измерений аддитивного фазового шума, а также определили методы улучшения характеристики системного шума и оптимизацию испытательной установки для расширения возможностей измерения фазового шума. Используя эти методы, мы исследовали тенденции измене-

ния уровня фазового шума с учетом влияния на него полупроводникового процесса транзисторов СВЧ-усилителя и уровня выходной мощности. Эти тенденции, для того чтобы продемонстрировать стабильность оценки фазового шума, были подтверждены путем тестирования усилителей от одной производственной партии.

Для того чтобы минимизировать аддитивный фазовый шум, мы рекомендуем выбрать СВЧ-усилитель, выполненный на биполярный транзистор с гетеропереходом (НВТ). Чтобы оптимизировать фазовый шум СВЧ-усилителей на транзисторах технологии рНЕМТ (полевой транзистор с высокой подвижностью электронов), рекомендуем работать на уровне мощности P_{1dB} . Это позволит минимизировать искажения

АМ–АМ и АМ–РМ. Если работа на уровне мощности P_{1dB} по тем или иным причинам невозможна, тогда обеспечивает наименьший фазовый шум линейная область. В целом, при выборе усилителя для чувствительных к фазовым шумам ВЧ-систем мы настоятельно рекомендуем учитывать возможности улучшения таких шумов путем выбора соответствующего режима его передаточной функции. ●

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Custom MMIC. Addressing Phase Noise Challenges in Radar and Communication Systems.*
2. *Rubiola E., Boudot R. Phase Noise in RF and Microwave Amplifiers. IEEE International Frequency Control Symposium, 2010.*
3. *Mastering Phase Noise Measurements. Rohde & Schwarz, Oct. 2016.*
4. *Owen D. Good Practice Guide to Phase Noise Measurement. National Physical Laboratory, May 2004.*
5. *Breitbarth J., Koebel J. Additive (Residual) Phase Noise Measurement of Amplifiers, Frequency Dividers and Frequency Multipliers//Microwave Journal. June 2008. Vol. 51. No. 6.*
6. *Dasgupta A., Khandelwal S., Chauhan Y.S. Compact Modeling of Flicker Noise in HEMTs//IEEE Journal of the Electron Devices Society. Nov. 2014. Vol. 2. No. 6.*
7. *Garner P. J., Howes M. J., Snowden C. M. K-band and MMIC pHEMT-based VCO's with Low Phase-noise Properties//IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Oct. 1998. Vol. 46. No. 10.*
8. *Garmendia N., Portilla J. Study of PM Noise and Noise Figure in Low Noise Amplifiers Working under Small and Large Signal Conditions. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007.*