ДЖЕЙМС ВОНГ (JAMES WONG), НАОКИ ВАТАНАБЕ (NAOKI WATANABE), АНДРЕЙ ГРЕБЕННИКОВ
Перевод ВЛАДИМИРА РЕНТЮКА

УСИЛИТЕЛЬ ДОГЕРТИ НА GAN-ТРАНЗИСТОРАХ С МОЩНОСТЬЮ 1 КВТ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 2,11–2,17 ГГЦ

В статье предлагается новая модификация асимметричной конструкции усилителя Догерти с суммарной выходной мощностью 1 кВт при КПД 65%, выполненная на GaN-транзисторах. Усилитель предназначен для использования в составе передатчиков базовых станций сотовых систем связи, работающих в диапазоне частот 2,11–2,17 ГГц.

Усилители мощности являются одними из самых важных компонентов современных систем беспроводной и сотовой связи. В идеальном случае они должны обеспечить высокую выходную мощность с высокой линейностью и высоким КПД. Но здесь обычно приходится идти на компромиссы, которые связывают три основных параметра усилителя мощности. Как правило, в усилителях с высокой выходной мощностью в жертву приносится их линейность.

В современных телекоммуникационных системах, поддерживающих достаточно широкие полосы пропускания и высокие скорости передачи данных, передаваемые сигналы из-за быстрого изменения в широких пределах мгновенной мощности в режиме передачи обычно характеризуются высоким отношением пикового и среднего уровня мощности PAR (Peak-to-Average Ratio). Поэтому основная задача при разработке усилителя мощности базовой станции беспроводной связи заключается в обеспечении его высокого КПД. При этом достичь его на максимальной выходной мощности оказывается сложно, поэтому часто используется компромиссный подход и усилители проектируются с расчетом на более низкие уровни мощности, обычно с уровнем OPBO (Output Power Back Off, потеря выходной мощности относительно максимально возможного уровня) в диапазоне от 6 дБ и ниже. Такой подход позволяет оптимизировать параметры усилителя, уменьшить его размеры и достичь меньшей стоимости при серийном производстве.

Разработка усилителей большой мощности — весьма трудоемкая и непростая задача. Однако эта проблема решается использованием устройств, выполненных на базе GaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor, HEMT) с использованием предлагаемой инновационной архитектуры усилителя Догерти. При этом можно достичь значения среднего КПД на уровне 60% и снижения общего энергопотребления при средних уровнях выходной мощности от 100 Вт и выше.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПОДКЛЮЧЕНИЯ GaN HEMT

Особенностью GaN HEMT является высокое пробивное напряжение, высокая плотность тока, высокая частота единичного усиления, низкое сопротивление в открытом состоянии (сопротивление насыщения) и малая паразитная емкость. На этих транзисторах можно построить широкополосный усилитель, который обладает и высокой мощностью, и высоким КПД. Высокая плотность мощности дает возможность разрабатывать на основе GaN HEMT компактные конструкции, высокое рабочее напряжение и низкая паразитная емкость выводов подключения приводят к более высокому входному импедансу, что облегчает согласование усилителя по входу в широкой полосе рабочих частот. Кроме того, высокое пробивное напряжение сток-исток, превышающее 150 В, обеспечивает надежную и устойчивую работу усилителя при напряжении 50 В независимо от уровня входного сигнала или нагрузки.

Так, например, технология GaN HEMT от компании Sumitomo обеспечивает серийный выпуск уже корпусированных устройств с большим коэффициентом усиления, способных обеспечивать пиковую выходную мощность до 300 Вт на частотах до 8 ГГц и выше. Сейчас коммерчески доступны устройства с плотностью мощности до 10 Вт/мм при напряжении питания 50 В. Отличные тепловые характеристики приборов даже при столь высоких плотностях мощности обеспечиваются использованием подложек из карбида кремния (SiC). Сфера применения таких приборов включает в себя радиолокационное оборудование и высоконадежные передатчики систем сотовой связи.

Для достижения высокого КПД в условиях допустимого уменьшения рабочей мощности доступен ряд схемотехнических решений, в том числе усилитель Догерти. Его неоспоримые достоинства заключаются в его простоте и возможности достижения высокого КПД в широком диапазоне частот. Рассматриваемая в этой статье трехканальная асимметричная конфигурация усилителя Догерти

предлагает компромисс между высоким коэффициентом усиления, высокой выходной мощностью и высоким средним КПД.

Для увеличения мощности в корпусе заданного размера GaN HEMT могут быть изготовлены с увеличенной областью затвора. Соответствующее увеличение емкости затвора, особенно при параллельном соединении каскадов, уменьшает их входной импеданс до очень низких значений, близких к нескольким десятым Ома. В результате внутри корпуса таких устройств необходимо установить согласующее звено с низким уровнем потерь, что непросто и непрактично.

Для практического использования корпусированное устройство должно обеспечивать достаточно высокий (не менее 1 Ом) входной импеданс, причем с достаточно низким уровнем добротности Q. Последнее требуется для обеспечения плоской АЧХ усиления во всей требуемой полосе частот. В качестве простого согласующего звена для устройства с двумя транзисторами в узкой полосе частот, например 2,11–2,17 ГГц, может с успехом использоваться четвертьволновая микрополосковая линия на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Такое устройство показано на рис. 1. Здесь установлены два отдельных 180-Вт GaN HEMT, которые могут быть включены параллельно.

С целью определения точек достижения максимальной мощности в нагрузке и КПД использовалась обычная для практики СВЧ-усилителей методика получения контуров постоянной выходной мощности, называемая еще Load Pull. Для исследований использовались два транзистора мощностью 180 Вт при рабочем напряжении 50 В. Транзисторы были включены параллельно и соответствующим смещением введены в режим работы класса АВ. При этом учитывались также и параметры усилителя, связанные с особенностями корпусирования транзисторов. В результате получены контуры постоянной выходной мощности и КПД в зависимости от импеданса, приведенные на рис. 2. Полученные контуры позволяют достичь компромисса при определении оптимального согласования выходного импеданса, поскольку оптимальные импедансы для достижения максимальной мощности и максимального уровня КПД сильно отличаются. В рассматриваемом случае выходная мощность в нагрузке при компрессии 1 дБ (P1дБ) достигает максимума около +55 дБм при импедансе (1,2–j1,1) Ом, тогда как максимальный КПД более 61% получается для чисто резистивного импеданса около 1,3 Ом (рис. 2).

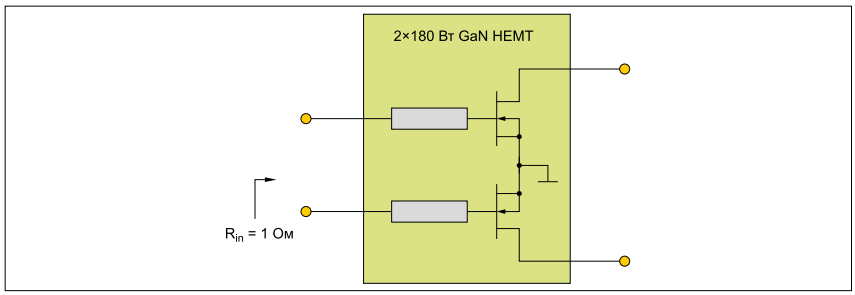

Рис. 1. Двухканальное устройство на GaN HEMT с внутренним согласованием их входных импедансов

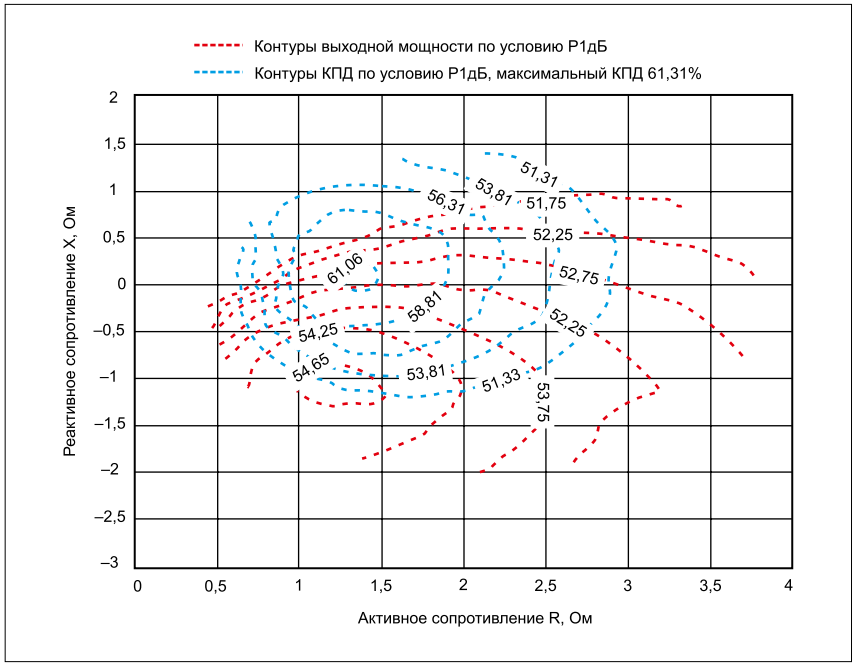

Рис. 2. Контуры постоянной выходной мощности Load Pull и КПД для определения оптимального соотношения выходной мощности и КПД

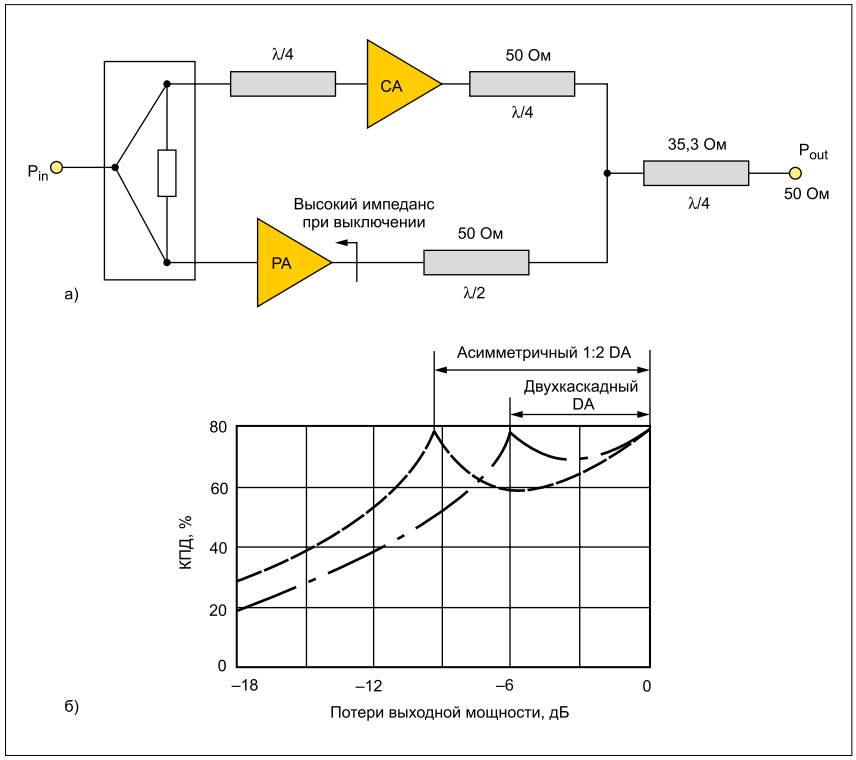

Рис. 3. Блок-схема модифицированного симметричного двухкаскадного усилителя Догерти (а) и его теоретический КПД (б)

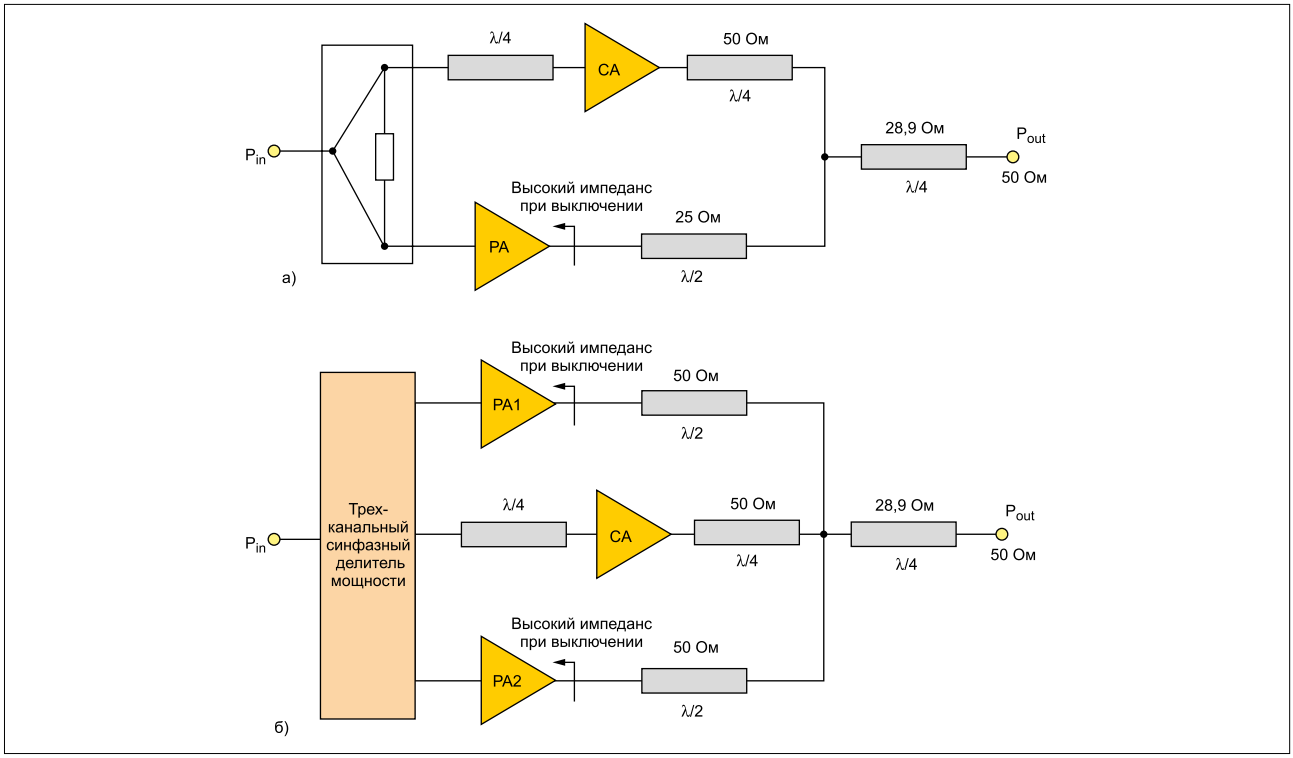

Рис. 4. Блок-схема модифицированного 1:2 асимметричного усилителя Догерти

МОДИФИКАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ УСИЛИТЕЛЯ ДОГЕРТИ

Для усилителя мощности с очень низким выходным сопротивлением ширина используемой для согласования с нагрузкой соответствующей микрополосковой линии получается недопустимо широкой по сравнению с ее длиной, что сказывается на общих размерах всей согласующей схемы. Соответствующая схема согласования включает в себя смещенную полосковую линию для создания условия открытой цепи при выключенном пиковом усилителе (который подключается при необходимости достижения максимальной мощности), а также согласующую четвертьволновую микрополосковую линию, которая, как известно, аналогична параллельному колебательному контуру и пропускает частоты в полосе своего резонанса. Габариты такого решения могут оказаться весьма большими, в результате чего становится трудно физически подключить выход пикового усилителя непосредственно к тракту сигнала основного усилителя.

Для удобства реализации классическая конфигурация усилителя Догерти может быть изменена путем включения дополнительной полуволновой линии на выходе пикового усилителя. На рис. 3а показана блок-схема модифицированной двухкаскадной конфигурации усилителя Догерти. Здесь полуволновая линия подключена к выходу пикового усилителя (PA), который включается при необходимости увеличить мощность основного усилителя, а четвертьволновая линия для компенсации фазы включена на вход несущего (основного) усилителя (CA). Эта конфигурация характеризуется теми же двумя точками максимального КПД: при насыщении и при уменьшении на 6 дБ относительно ее максимального уровня. Такое решение похоже на классический двухкаскадный усилитель Догерти, как это показано на рис. 3б.

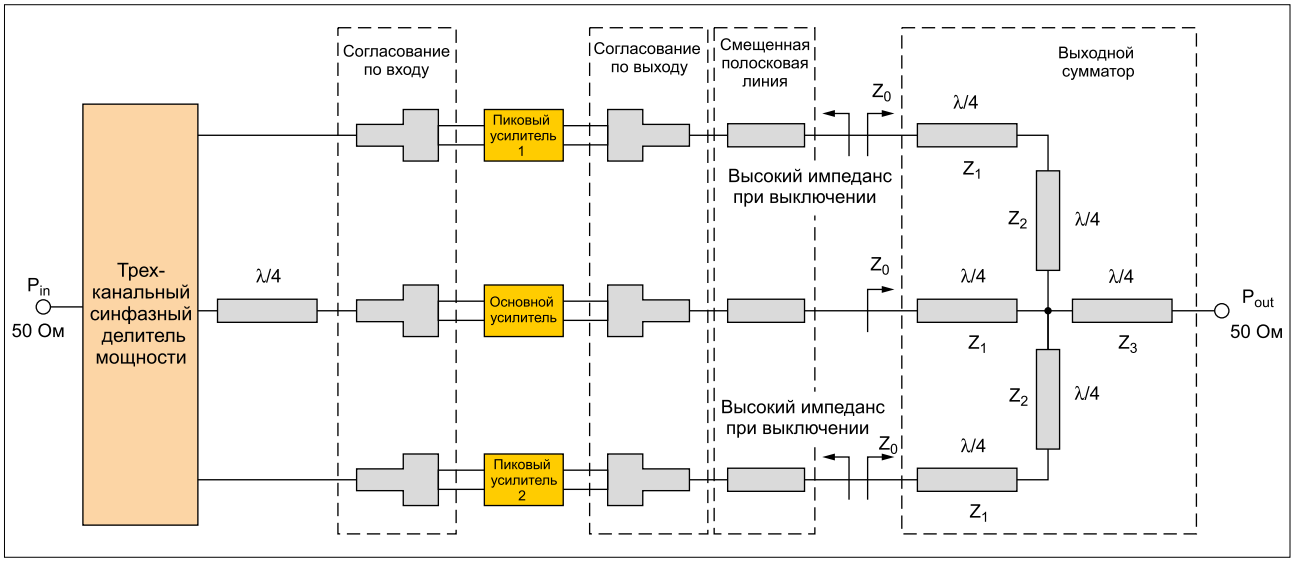

Рис. 5. Трехкаскадный инверсный усилитель Догерти со встроенными четвертьволновыми микрополосковыми линиями

Если основной и пиковый усилители предназначены для работы с разными уровнями выходной мощности — меньшей для основного и большей для усилителя пиковой нагрузки, то область высокого КПД можно расширить. Например, для коэффициента разделения мощности 1:2 точка перехода с максимальным КПД соответствует уровню потерь выходной мощности 9,5 дБ относительно максимальной выходной мощности, как показано на рис. 3б. В этом случае характеристический импеданс полуволновой линии составляет 25 Ом, что соответствует импедансу нагрузки, требуемому для пикового усилителя. При этом характеристический импеданс комбинированной четвертьволновой линии составляет 28,9 Ом, как показано на рис. 4а.

Когда выбрать правильное соотношение мощности между активными устройствами затруднительно, то в этом случае в многокаскадной конфигурации усилителя Догерти удобно использовать одинаковые усилители мощности, где один основной усилитель мощности подключен параллельно к нескольким пиковым усилителям. Таким образом, асимметричная двухступенчатая структура усилителя Догерти 1:2 может быть преобразована в модифицированную трехкаскадную асимметричную конфигурацию Догерти (рис. 4б).

Модифицированная схема включает в себя один основной канал усиления и два идентичных пиковых канала, здесь размеры основного усилителя и обоих пиковых усилителей (PA1 и PA2) равны. Полуволновую линию для каждого пикового усилителя можно разделить на две четвертьволновые линии. Каждая четвертьволновая линия имеет свой собственный характеристический импеданс для соответствующего преобразования импеданса, когда требуемый импеданс нагрузки для пикового устройства оказывается достаточно малым.

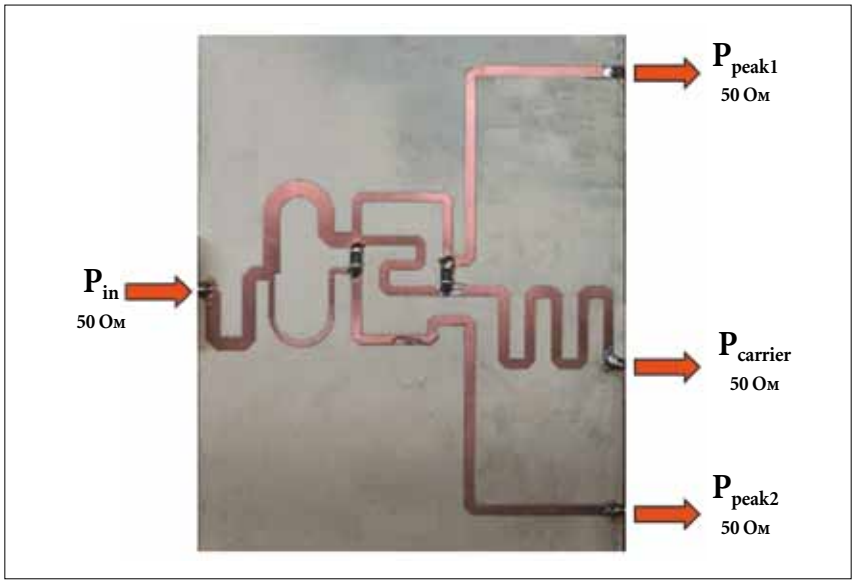

Рис. 6. Входной трехканальный синфазный делитель мощности с дополнительной четвертьволновой линией

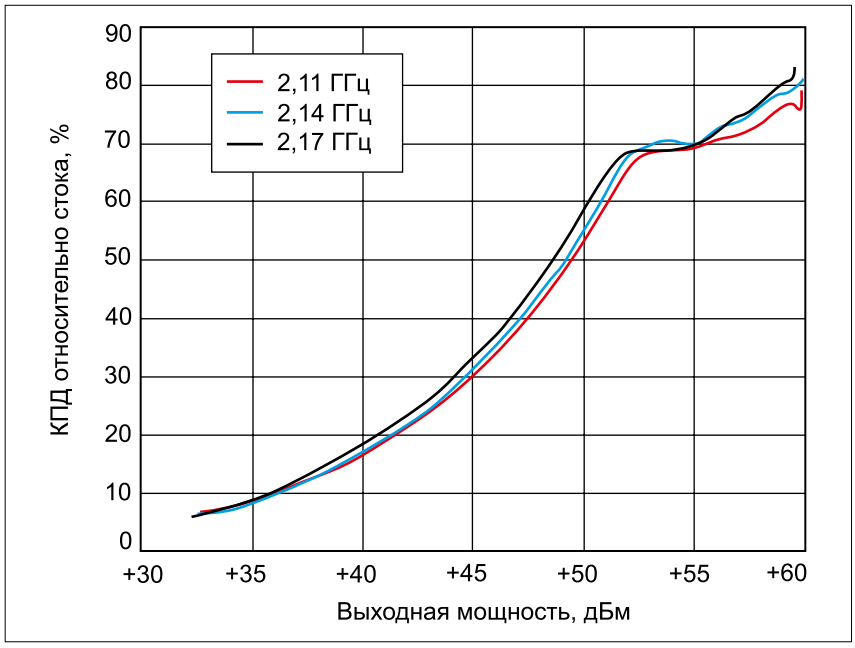

Рис. 7. КПД по стоку в зависимости от выходной мощности

ТРЕХКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДОГЕРТИ

На рис. 5 показана блок-схема трехкаскадного асимметричного усилителя Догерти. Выходной сумматор включает в себя четвертьволновую микрополосковую линию в канале основного усилителя, сдвоенные четвертьволновые микрополосковые линии для каждого пикового усилителя и одну выходную четвертьволновую микрополосковую линию. Каждый канал усиления включает в себя уже корпусированное устройство с одинаковыми кристаллами и входными/выходными согласующими схемами, выполненными с использованием микрополосковых линий.

Смещенные полосковые линии необходимы для обеспечения на своих концах надлежащих условий разомкнутой цепи для пиковых усилителей при их выключении. Для соответствующего преобразования импеданса нам требуются две четвертьволновые микрополосковые линии разной ширины. Они преобразуют условие разомкнутой цепи для каждого пикового усилителя в разомкнутую цепь для основного усилителя на уровнях выходной мощности ниже 9 дБм в общей точке выходного сумматора.

Например, для идентичных усилителей с оптимальным импедансом нагрузки Z_0 = 12 Ом каждый и $Z_2 = R_L$ = 50 Ом, где R_L является стандартным импедансом нагрузки 50 Ом, $Z_1 = (Z_0Z_2)^{0,5}$ = 24,5 Ом и $Z_3 = (Z_2R_L)^{0,5}/(3)^{0,5}$ = 28,9 Ом. Необходимо учитывать, что между четвертьволновыми микрополосковыми линиями в выходном сумматоре могут быть разные комбинации характеристических импедансов. Что касается четвертьволновой микрополосковой линии по входу основного усилителя, то она используется для компенсации задержки, присутствующей в выходном сумматоре.

Входной трехканальный синфазный разветвитель, или делитель (иногда называемый сплиттером), мощности (рис. 6) выполнен на материале RO4350 компании Rogers толщиной 20 мил (0,508 мм). Этот же материал использовался и для реализации полной схемы усилителя Догерти. Делитель включает в себя трансформирующую четвертьволновую линию и асимметричный 2:1 двухканальный входной делитель мощности Вилкинсона, необходимый для разделения мощности между двумя сигнальными трактами: один

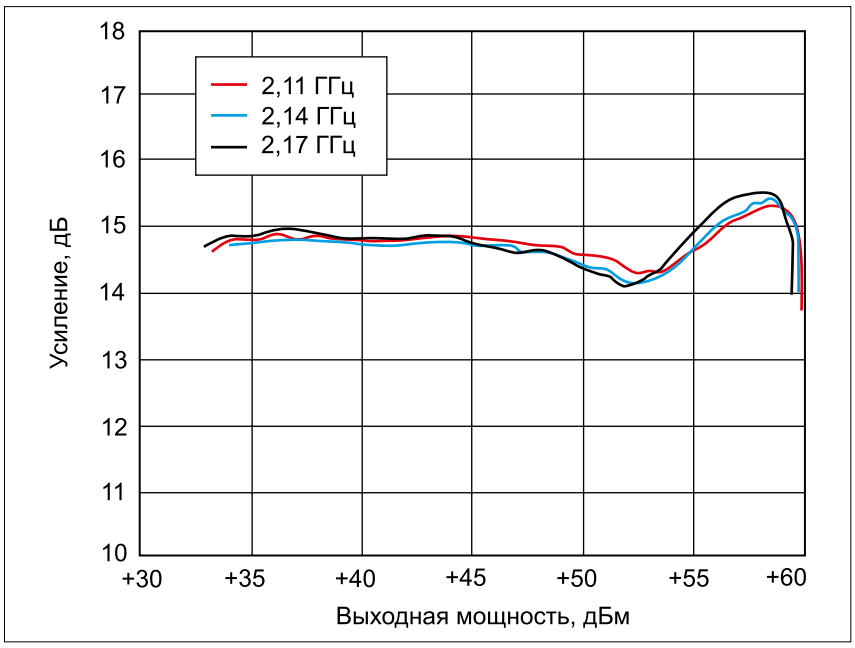

Рис. 8. Зависимость усиления от выходной мощности

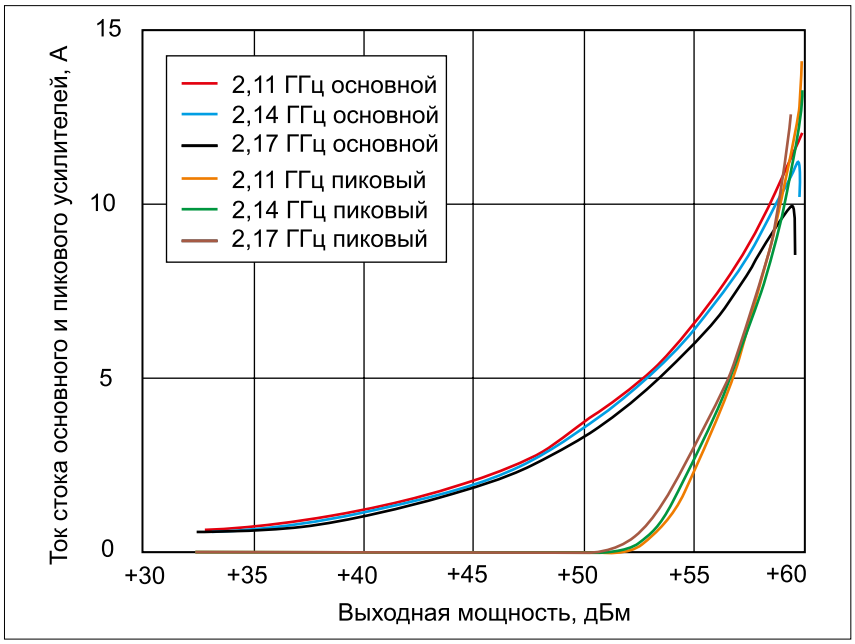

Рис. 9. Зависимость токов стока для основных и пиковых усилителей от выходной мощности

тракт основного усилителя с первыми пиковыми усилителями, а второй со вторым пиковым усилителем. Используется симметричный двухсторонний делитель мощности Вилкинсона для равного разделения мощности между основным и первыми пиковыми усилителями. В тракте основного усилителя используется дополнительная четвертьволновая микрополосковая линия на 50 Ом и три одинаковые соединительные микрополосковые линии на 50 Ом для основного и двух пиковых усилителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытательная плата модифицированного трехкаскадного усилителя Догерти выполнена на основе трех двухканальных GaN HEMT в металлокерамических корпусах с фланцевыми выводами. В каждом корпусе, как уже говорилось выше, содержится пара 180-Вт GaN HEMT с элементами согласования по входу. Усилитель выполнен на материале марки RO4350 толщиной 20 мил. Входной трехканальный делитель мощности, входные и выходные схемы согласования, смещенные линии, выходные сумматоры и схемы смещения затвора и стока (с обходными конденсаторами на концах) полностью выполнены на микрополосковых линиях различной электрической длины и характеристических импедансов. Особое внимание при разработке устройства было уделено сведению к минимуму выходных индуктивностей корпусированых GaN HEMT.

При напряжении питания 55 В постоянного тока выходная мощность при компрессии 1 дБ (P1дБ) в диапазоне частот от 2,11 до 2,17 ГГц получилась равной примерно 60 дБм. При этом максимальный КПД составил 80%, а коэффициент усиления мощности оказался равным порядка 15 дБ. Графики, иллюстрирующие зависимость КПД на стоке транзисторов от выходной мощности (рис. 7), показывают, что КПД стока около 70% уже имеет место на уровне мощности –8,5 дБ от максимальной.

Для 20-МГц сигнала LTE (Long-Term Evolution, стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных поколения 4G), с PAR 8 дБ, была достигнута средняя мощность 52 дБм при КПД стока около 65%. В этом случае коэффициент усиления мощности около 15 дБ достигнут в линейной части рабочего диапазона с неравномерностью в 2 дБ по всему диапазону выходной мощности до уровня 60 дБм. Здесь уровень мощности уменьшился всего на 1 дБ по сравнению с его значением в линейной области (рис. 8).

На рис. 9 показан измеренный ток стока основного и пикового усилителей в зависимости от их выходной мощности. В рабочем диапазоне частот 2,11–2,17 ГГц точка отсечки пиковых усилителей (точка их выключения) составляет около 50 дБм.

В данной статье представлена первая реализация каскадной асимметричной конфигурации усилителя Догерти мощностью 1 кВт, основанная на инновационной технологии GaN HEMT компании Sumitomo. Как было показано, усилитель имеет средний КПД стока 65% и пригоден для передатчиков сотовой связи, работающих в диапазоне частот 2,11–2,17 ГГц. Теоретические выкладки были подтверждены в результате измерений, проведенных на реальном прототипе. Было показано, что при исключительно высокой выходной мощности 1 кВт с линейностью по критерию P1дБ могут быть достигнуты и высокий средний КПД, равный 65%, и высокое усиление мощности около 15 дБ. Для гарантии соответствия предлагаемого модифицированного асимметричного усилителя Догерти самым строгим требованиям в части спектральных характеристик, он может быть разработан с использованием методов цифровой коррекции предыскажений. Предлагаемое решение имеет самые высокие электрические параметры в части максимальной мощности и КПД стока из когда-либо заявленных для мощных усилителей Догерти базовых станций сотовых систем мобильной связи.