

Эволюция технологии радарных систем S-диапазона: уменьшение общей стоимости за счет увеличения степени интеграции. Пример Integra Technologies

Брайан Д. БАТАЛЬЯ
(Brian D. BATTAGLIA)
Джеф БЕРГЕР (Jeff BURGER)
Джон ТИТИЗИАН (John TITIZIAN)
Перевод: Станислав ДИДИЛЕВ
sd@etsc.ru

В данной статье рассмотрены различные подходы, позволяющие увеличить степень интеграции при построении современных радарных систем на примере отдельно взятого производителя СВЧ-компонентов. При этом показана эволюция предлагаемых решений в зависимости от требований рынка. Освещаются особенности применения дискретных биполярных и LDMOS-транзисторов, паллет и миниатюризированных усилителей мощности.

Введение

В настоящее время построено большое количество коммерческих и военных радарных систем S-диапазона. Как правило, для подобных систем необходима высокая выходная импульсная мощность при малых и средних длительностях импульса, что легко реализуется посредством применения кремниевых биполярных транзисторов. Данные транзисторы характеризуются крайне высокой плотностью мощности в импульсном режиме, а также простотой применения. Высокая плотность мощности в терминах разработчика транзистора означает достаточно компактный кристалл, отдающий значительную мощность и помещенный в небольшой корпус. Помимо этого, активный прибор должен иметь компактные цепи «обвязки».

Обычно биполярные транзисторы использовались в классе «С» для достижения максимальной эффективности и выходной мощности. Линейность работы усилителя в этом случае не имела решающего значения. Простота и компактность используемых согласующих цепей и цепей питания во многом обусловила применение кремниевых биполярных транзисторов в сложных системах, насчитывающих большое количество элементов [1]. Развивающийся рынок радарных систем S-диапазона требовал от разработчиков обеспечения все большей мощности во все более широком диапазоне частот, что долгое время обеспечивалось за счет применения кремниевых биполярных транзисторов.

За последние несколько лет наметилась новая тенденция в построении радарных систем: разработчики стали использовать длинные импульсы. Также им потребовалась некоторая степень линейности работы усилителя. Понадобилась новая технология, удовлетворяющая этим требованиям. И хотя большинство КМОП-транзисторов соответствовало поставленным требованиям, наиболее эффективным решением (с точки зрения цены) стало применение LDMOS-технологии (смещенно-диффузной МОП-технологии на основе кремния). LDMOS-технология имеет множество преимуществ, среди которых можно выделить более высокое усиление активных приборов, их большую стойкость к рассогласованию [2], а также более высокую линейность работы при работе в классе «АВ», что обусловлено самой конструкцией активного элемента.

Сейчас на рынке требуются не столько большая мощность или более широкий диапазон рабочих частот, сколько продукт, который смог бы существенно уменьшить время создания сложной радарной системы. При ограниченности ресурсов и большем внимании к системотехническому уровню создания системы разработчики все чаще стали оставлять разработку и исполнение ВЧ-части на совести поставщика полупроводниковых решений. Применение схемы из нескольких параллельно включенных мощных СВЧ-транзисторов, согласованной по входу и выходу на 50 Ом, которую разработчик мог легко включить в состав своей системы, привело к появлению так называ-

емых паллет (готовых усилительных субмодулей). Объединяя нужное количество паллет, можно легко добиться требуемых мощностных характеристик создаваемой системы. При более высокой степени интеграции паллета включает в себя несколько каскадов усиления (драйвер + оконечные каскады), что позволяет получить законченное решение, существенно снижающее нагрузку на разработчика ВЧ-части системы.

Благодаря своему богатому опыту создания СВЧ-транзисторов для применения в S-диапазоне, разработчики Integra Technologies представили новый продукт, представляющий собой законченное усилительное решение в едином корпусе, которое согласовано по входу и выходу на 50 Ом. Миниатюрный усилитель мощности, выполненный по LDMOS-технологии (Miniaturized Power Amplifier utilizing LDMOS, MPAL), требует только подключения цепей питания и сигнала для получения готового работающего решения.

Надежность компонентов

Несомненно, при создании любой (неважно, коммерческой или военной) радарной системы надежность является одним из ключевых факторов. Некоторые другие приложения (такие как постановщики помех и ISM-оборудования), где используются компоненты Integra Technologies, также требуют высочайшего уровня надежности. Для его достижения компания использует только золото для всех соединений внутри кристалла

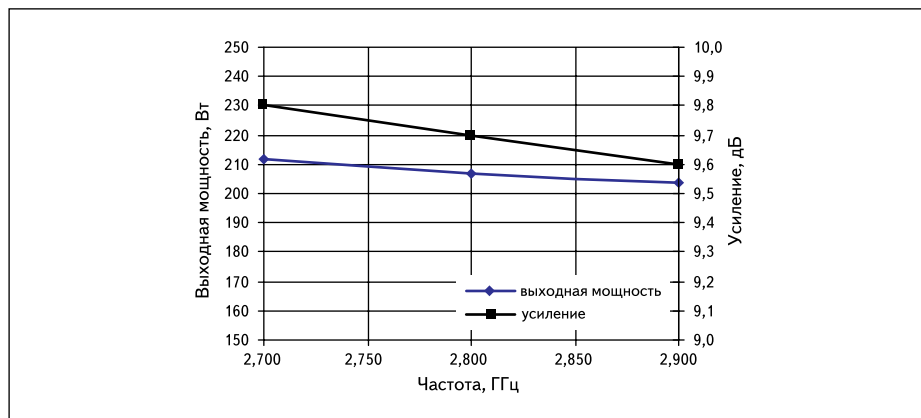


Рис. 1. Зависимость усиления и выходной мощности от частоты для транзистора IB2729S170, созданного Integra Technologies в 1998 году

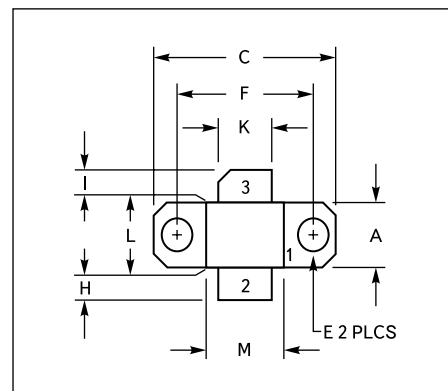


Рис. 2. Размеры корпуса транзистора IB2729S170: длина "M" = 320 мил (8 мм); ширина "A" = 250 мил (6,25 мм)

и для его соединения с компонентами «обвязки» (такими как выводы и согласующие конденсаторы). При этом не возникает никаких проблем в межкомпонентных соединениях, поскольку и выводы МОП-конденсаторов, и выводы корпуса имеют золотое напыление.

При работе в импульсном режиме ВЧ-сигнал подается на вход в течение некоторого промежутка времени и затем снимается на некоторое время. При поданном ВЧ-сигнале активный элемент испытывает полную пиковую мощность, а по кристаллу и соединительным проводникам протекают значительные токи, что приводит к нагреву последних. За время отсутствия сигнала на входе активный элемент и соединительные проводники успевают остыть. Резкий перепад температур заставляет металл проводников сжиматься и расширяться, что вызывает в них механические напряжения. Коэффициент теплового расширения характеризует величину механических напряжений, возникающих в проводниках устройства в течение его срока службы. За это время активный элемент успевает пропустить через себя порядка миллиарда импульсов.

В отличие от Integra Technologies, многие традиционные поставщики LDMOS-транзисторов используют алюминий в структуре своих кристаллов и соединительных проводников (алюминий традиционно применяется большинством изготовителей КМОП-структур, на фабриках которых изготовители LDMOS-транзисторов размещают свои заказы). КТР алюминия в 3 раза больше, чем у золота, что негативно сказывается на соединительных проводниках и в некоторых случаях даже приводит к их провисанию [3]. Несмотря на то, что (за счет применения алюминия) процесс изготовления КМОП-структур относительно дешев, разработчик должен быть готов к неприятным последствиям этой дешевизны, пагубно сказывающейся (в долгосрочной перспективе) на надежности устройства. Как говорится: «За что заплатил — то и получил».

Компания Integra Technologies использует полностью керамические корпуса, которые хорошо подходят для транзисторов большой мощности. Применение керамики позволяет герметизировать корпус активного элемента. Стоит отметить, что большинство производителей LDMOS используют пластиковые корпуса, которые не способны обеспечить должный уровень влагонепроницаемости и, следовательно, не могут защитить активный элемент от жестких условий окружающей среды.

История вопроса

Один из первых заказчиков Integra Technologies поставлял гражданским аэропортам радары, предназначенные для управления воздушным движением (Air Traffic Control, ATC), характеристики которых соответствуют рекомендациям Федерального управления гражданской авиацией (Federal Aviation Administration, FAA). Заказчик хотел представить наилучшее на рынке решение, для чего ему потребовался транзистор, который мог бы обеспечить более 200 Вт в полосе частот 2,7–2,9 ГГц при использовании импульсов средней длины (ширина импульса — 100 мкс, коэффициент заполнения — 10%). Но такого транзистора в то время не существовало ни у Integra Technologies, ни у других производителей СВЧ-транзисторов. Подобная серьезная проблема рассматривалась основателями Integra Technologies как неплохая возможность разработать соответствующий продукт и закрепиться на рынке. Таким образом, была создана по тем временам новаторская структура из двух ячеек (dual cell layout) для транзистора S-диапазона [4]. Выходная мощность созданного транзистора почти вдвое превосходила значение подобного параметра (около 115 Вт) у транзисторов других производителей, представленных в то время на рынке. На рис. 1 приведены некоторые характеристики данного транзистора, созданного Integra Technologies более 10 лет назад.

Еще одной уникальной особенностью созданного транзистора являлась чрезвычайно высокая плотность мощности используемого в нем кристалла, позволившая в то время сделать корпус транзистора гораздо меньше, чем у аналогичных устройств других производителей (это положение сохраняется до сих пор). На рис. 2, где приведен чертеж корпуса транзистора IB2729S170, хорошо видно, что его длина не превышает 320 мил, что составляло порядка 50% от длины корпуса наиболее часто используемого в то время транзистора (около 500 мил). Обладая небольшими размерами и обеспечивая высокую выходную мощность, данный транзистор при работе с не очень хорошо согласованной нагрузкой (КСВН 1,5:1) не искажал форму импульса сигнала, что было по достоинству оценено заказчиком, который до сих пор сотрудничает с Integra Technologies и использует ее компоненты в своих радарных системах.

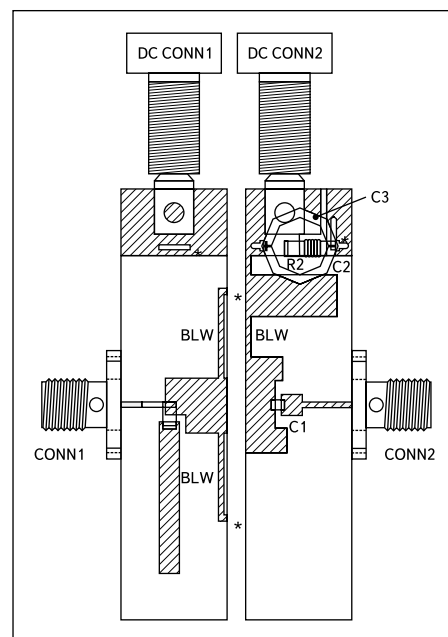


Рис. 3. Тестовая плата для транзистора IB2729S170

Таблица 1. Некоторые характеристики транзисторов Integra Technologies для ISM-приложений

Наименование транзистора	Описание	Выходная мощность, Вт
IB2856S30	Рабочая частота: 2,865 ГГц Длительность импульса: 12 мкс Коэффициент заполнения: 3%	39
IB2856S250		300
IB3000S60	Рабочая частота: 3 ГГц Длительность импульса: 12 мкс Коэффициент заполнения: 1%	73
IB3000S200		250

Развивая данное направление, Integra Technologies в настоящее время выпускает несколько десятков продуктов, предназначенных для работы в S-диапазоне [5] и рассчитанных на различные мощности и частотные интервалы. Это позволяет удовлетворить потребности подавляющего большинства заказчиков, предложив каждому из них подходящее именно для него решение в рамках продукции одного производителя.

Однако мало создать транзистор с высокой плотностью мощности, необходимо создать компактные и эффективные цепи «обвязки» для него, иначе суммарная плотность мощности падает. Хорошо разработанный транзистор обладает малой паразитной емкостью, что увеличивает импеданс на его входе и выходе. Более высокое значение импеданса облегчает разработку цепей согласования и питания транзистора. Например, для рассмотренного выше транзистора значение выходного импеданса (его действительной части) составляет более 2 Ом, а значение входного импеданса — более 3,5 Ом (также действительная часть). Разработанные для данного случая согласующие цепи характеризуются простотой конструкции и компактностью. То же можно сказать и о цепях питания данного биполярного транзистора. Тестовая плата для транзистора IB2729S170 приведена на рис. 3. Каждая из половинок тестовой платы, шириной 1,27 см (0,5 дюйма), выполнена из ламината с высоким значением диэлектрической проницаемости.

Поскольку на рынке ISM-приложений (Industrial Scientific and Medical) преимущественно используются короткие импульсы с небольшим коэффициентом заполнения, то данный рынок является идеальным для биполярных транзисторов с высокой плотностью мощности. В частности, в медицинской аппаратуре, работающей в диапазонах 2,865 и 3 ГГц, почти повсеместно используются эффективные и надежные решения на биполярных транзисторах, поскольку данные транзисторы позволяют получить значительную мощность при небольших габаритах устройства. В таблице 1 приведены характеристики транзисторов Integra Technologies, предназначенных для работы в указанных диапазонах.

Переход на LDMOS

Эволюция радарных систем привела к тому, что достижение необходимых характеристик стало невозможно при использова-

нии биполярных транзисторов. Длинные импульсы и большие значения коэффициента заполнения потребовали применения МОП-технологии. И хотя III-V МОП-технологии на основе нитрида галлия (GaN) и арсенида галлия (GaAs) вполне соответствуют данным требованиям, более приемлемым решением стало использование LDMOS, поскольку данная технология (основанная на кремнии) и по сей день значительно дешевле других.

Переход на LDMOS-технологии принес некоторые преимущества. LDMOS-транзистор управляет током в канале исток-сток посредством изменения напряжения на третьем электроде — затворе. При работе в классе «AB», такой транзистор в силу своей конструкции обладает высокой линейностью, что приводит к увеличению динамического диапазона усилителя. Если требуется, можно достичь еще более высокой линейности при работе в классе «A». Однако при этом эффективность существенно понижается. В современных радарных системах, как правило, используется класс «AB» для того, чтобы как можно больше «походить» на эффективные решения, работающие в классе «C». Дополнительно улучшить линейность усилителя можно за счет импульсного изменения напряжения смещения LDMOS, таким образом имитируя режим класса «C». В дополнение к вышесказанному конструкция кристалла LDMOS-транзистора имеет распределенную структуру, по сравнению с конструкцией кристалла биполярного транзистора, что позволяет распределять тепло, выделяющееся при работе транзистора по большей площади. Данная особенность позволяет избежать «провалов» в мощности даже на очень длинных импульсах. Помимо этого, LDMOS-транзисторы обладают высокой стойкостью к рассогласованию (типичное максимальное значение КСВН — 3:1, при любых значениях фазы сигнала).

На конференции European Microwave Week (ежегодная европейская конференция по СВЧ-тематике) в 2008 году компания Integra Technologies продемонстрировала разработанную ею конструкцию LDMOS-транзистора L-диапазона [6] с напряжением питания 50 В и максимальным значением КСВН более 10:1. В настоящее время Integra Technologies выпускает LDMOS-транзисторы для авиационных применений, обладающие максимальным значением КСВН — 20:1 [7].

Таблица 2. Некоторые характеристики LDMOS-транзисторов Integra Technologies для S-диапазона

Наименование транзистора	Параметры импульса		Выходная мощность, Вт
	Длительность, мкс	Коэффициент заполнения, %	
ILD2731M30	300	10	37
ILD2731M140			160
ILD3135M30			36
ILD3135M120			154

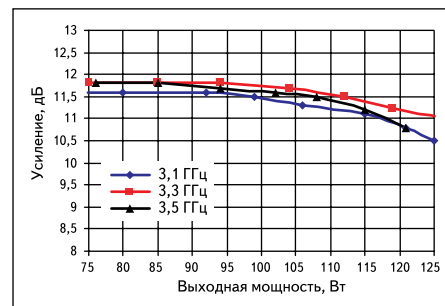


Рис. 4. Некоторые характеристики транзистора ILD3135M120 при работе со сверхдлинными импульсами

Integra Technologies производит LDMOS-транзисторы с выходной мощностью более 150 Вт, предназначенные для работы как в нижней (2,7–3,1 ГГц), так и в верхней (3,1–3,5 ГГц) частях S-диапазона. Некоторые параметры данных транзисторов приведены в таблице 2. Одним из основных преимуществ использования LDMOS-транзисторов в радарных системах S-диапазона является способность данных транзисторов (в силу конструкции кристалла) работать с длинными импульсами, при этом обеспечивая хорошее усиление и высокую эффективность.

В таблице 2 приведены параметры LDMOS-транзистора ILD3135M120, предназначенного для работы с импульсами средней длины (длительность импульса — 300 мкс, коэффициент заполнения — 10%). На рис. 4 показаны некоторые характеристики этого же транзистора, но в гораздо более тяжелых условиях работы (длительность импульса — 4 мс, коэффициент заполнения — 40%). Как видно из данных, представленных на рисунке, даже в более тяжелых условиях этот транзистор отдает более 120 Вт в полосу частот 3,1–3,5 ГГц. Данный пример ярко иллюстрирует возможности LDMOS-технологии, позволяющей усилить почти непрерывный (CW) сигнал при сохранении желаемых параметров.

Один из транзисторов Integra Technologies был протестирован при еще более тяжелых условиях работы (длительность импульса составляла 16 мс, а коэффициент заполнения был равен 50%). Во время тестирования транзистор ILD3135EL20 обеспечил выходную мощность более 28 Вт при усилении более 10 дБ. Обычно данный транзистор использовался в качестве драйвера при гораздо меньших значениях длительности импульса и коэффициента заполнения, однако проведенное тестирование показало, что его можно использовать и в других приложениях, включая те, что работают с непрерывным сигналом.

Достижение большего уровня интеграции

Увеличение мощности усилителя, как правило, достигается за счет сложения мощностей нескольких параллельных цепочек усиления, расположенных на единой паллете.

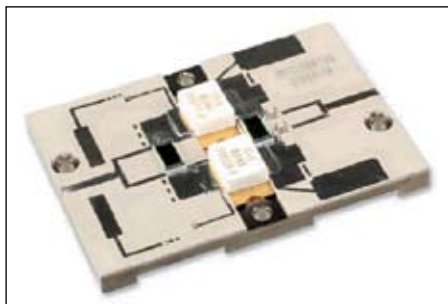


Рис. 5. Паллета IBP2729M280 с установленными на ней двумя дискретными транзисторами, позволяющая получить выходную мощность более 300 Вт в диапазоне частот 2,7–2,9 ГГц

Как уже упоминалось выше, в последнее время разработка ВЧ части усилителя все чаще ложится на плечи поставщика полупроводниковых решений, применяемых в данном усилителе, что позволяет разработчикам радарных систем сосредоточиться на решении системотехнических задач более высокого уровня. В подобной ситуации поставщик должен не только производить полупроводниковые компоненты, но и обладать знаниями по разработке согласующих высокочастотных цепей к ним, а также иметь возможность изготовить конструкцию такого усилительного субмодуля (паллеты). И сделать все это по приемлемой для заказчика цене. Integra Technologies, помимо собственно транзисторов, производит простые в применении законченные усилительные субмодули (паллеты), согласованные по входу и выходу на 50 Ом.

В зависимости от применения, паллеты выполняются либо на биполярных, либо на LDMOS-транзисторах. Во многих случаях на паллету устанавливается два и более дискретных элемента для достижения усиления, которое не может быть получено при использовании единичного элемента. В качестве примера на рис. 5 приведена одна из таких паллет. Паллета выполнена на основе специального ламината с диэлектрической проницаемостью 10,2. Высокая диэлектрическая проницаемость позволила создать компактные согласующие цепи на входе и выходе. Небольшие размеры данной паллеты делают ее идеальной для авиационных применений, особенно на борту воздушных судов, где массо-габаритные показатели играют решающую роль.

Еще одним немаловажным фактором, способствующим применению паллет, является улучшение технологичности производства радарных систем на их основе.

Таблица 3. Характеристики некоторых мощных паллет Integra Technologies

Наименование паллеты	Частотный диапазон, МГц	Выходная мощность, Вт	Усиление, дБ	Ширина импульса, мкс	Коэффициент заполнения, %
IBP2729M300	2700–3100	>300	7,5	100	10
IBP2731M200	2700–3100	>200	8,7	200	10
IBP3134M25	3100–3400	>25	9,8	30	10
IBP2934M190	2900–3400	>200	7,5	100	10
IBP3134M220	3100–3400	>220	9	200	10
IBP3135M150	3100–3500	>150	7,5	100	10
IBP3135MH200	3100–3500	>225	8,5	100	10
IPAXXXXX	3100–3500	>50	22,5	16 000	20

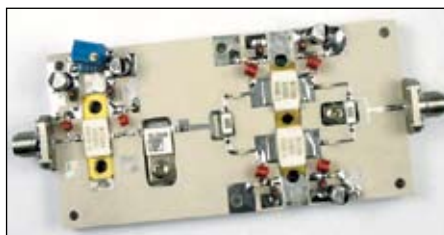


Рис. 6. Паллета, включающая в себя несколько каскадов усиления

Для большинства разработок подходит стандартная точность исполнения топологии цепей (во многом зависящая от применяемого ламинирующего материала), однако при высоких мощностях и рабочих частотах стабильность размеров топологии крайне важна (что требует специального ламинирующего материала, позволяющего достичь высокой повторяемости параметров паллет). Таким образом, применение обладающих стабильными параметрами готовых паллет, согласованных по входу и выходу на 50 Ом, почти на порядок улучшает технологичность изготовления радарной системы по сравнению с использованием дискретных компонентов.

Многокаскадные линейки усиления позволяют легко создать в рамках одной паллеты полностью законченное решение, включающее в себя входной каскад усиления (pre-driver), каскад предварительного усиления (driver) и оконечный каскад (output stage), состоящий из нескольких активных элементов, включенных параллельно. На рис. 6 приведен пример подобной паллеты. Данная паллета, состоящая из двух каскадов усиления, обеспечивает выходную мощность порядка 100 Вт и усиление более 20 дБ в диапазоне частот 3,1–3,5 ГГц.

Выпуская достаточно широкий ассортимент паллет, Integra Technologies показала себя не только как производитель транзисторов, но и как поставщик комплексных решений с гораздо более высоким уровнем интеграции. Использование компактных закон-



Рис. 7. Миниатюризированный усилитель мощности MPAL3035M30, выполненный по LDMOS-технологии, обеспечивает выходную мощность более 30 Вт в диапазоне частот 3–3,5 ГГц

ченных усилительных модулей значительно сокращает время разработки и внедрения сложных радарных систем, а также существенно улучшает технологичность их изготовления.

Инновации в области миниатюризации компонентов

Основываясь на богатом опыте создания транзисторов S-диапазона, а также следуя тенденции рынка к увеличению степени интеграции, Integra Technologies представила новое семейство дискретных усилительных приборов с высоким значением входного и выходного импеданса и внутренними цепями согласования. Согласованные на 50 Ом по входу и выходу миниатюризированные усилители мощности (Miniaturized Power Amplifiers, MPA's) обеспечивают полосу пропускания около 500 МГц и требуют лишь подключения питания, поскольку все необходимые цепи согласования интегрированы внутри корпуса рядом с кристаллом.

Применение подобных приборов позволяет существенно уменьшить габариты усилителя, поскольку не требуются какие-либо дополнительные компоненты. Достаточно подвести питание и сигнальные цепи. Помимо этого, меньшее количество компонентов положительно сказывается на надежности устройства и повторяемости его параметров.

В таблице 4 приведены параметры некоторых миниатюризированных усилителей Integra Technologies для применения в S-диапазоне, а на рис. 7 и 9 показаны соответственно внешний вид одного из таких усилителей и образец тестовой платы для подобных усилителей. Также на рис. 8 представлены

Таблица 4. Характеристики некоторых миниатюризированных усилителей Integra Technologies

Наименование усилителя	Частотный диапазон, МГц	Выходная мощность, Вт	Усиление, дБ	Обратные потери по входу, дБ	Неравномерность выходной мощности в рабочем диапазоне частот, дБ
MPAL2731M15	2700–3100	16	12,1	-12	0,5
MPAL2731M30	2700–3100	32	11,5	-12	0,6
MPAL3035M15	3000–3500	15	11,8	-14	0,7
MPAL3035M30	3000–3500	30	10,6	-14	1

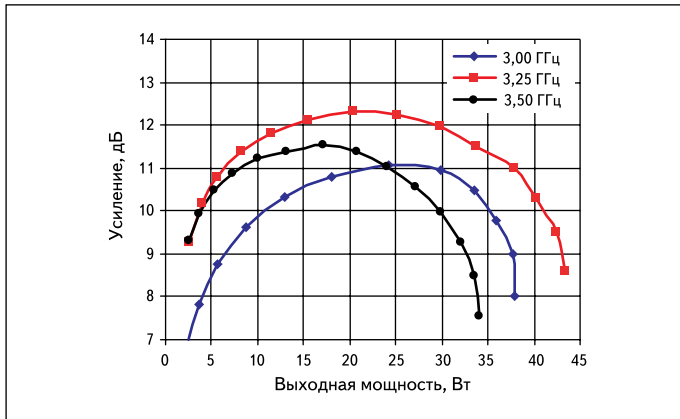


Рис. 8. Некоторые характеристики миниатюризованного усилителя MPAL3035M30

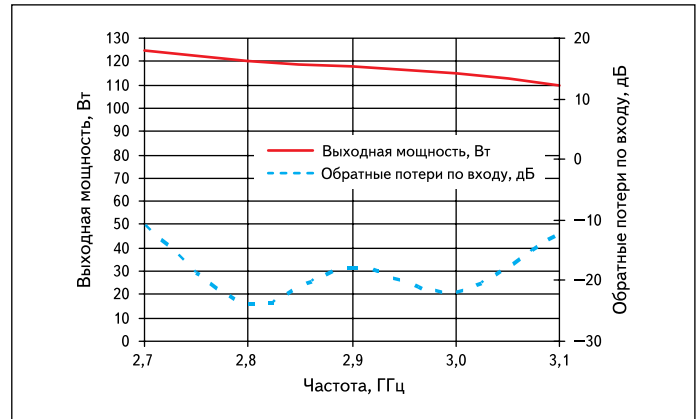


Рис. 11. Некоторые характеристики транзистора ILD2731M100

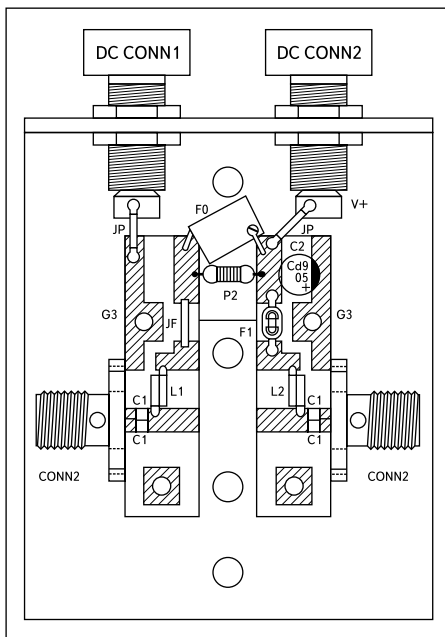


Рис. 9. Образец тестовой платы для миниатюризованных усилителей Integra Technologies



Рис. 10. Миниатюризованный усилитель MPAL2731M100 с высокой выходной мощностью

возможности перед разработчиками систем на основе АФАР. Поскольку подобные системы состоят из достаточно большого количества ячеек (иногда более 1000), каждая из которых (при традиционном подходе) должна иметь свои цепи согласования, то размеры АФАР и, особенно, стоимость порой переходят все разумные пределы. В настоящее время при использовании миниатюризованных усилителей вполне реально создать гораздо более компактную систему на основе АФАР без ухудшения ее характеристик

Применение миниатюризованных усилителей с высокими значениями выходной мощности может привести к значительным изменениям в подходе к созданию мощных усилительных линеек. На рис. 10 и 11 приведены внешний вид и некоторые параметры компонентов, способных обеспечить выходную мощность более 100 Вт в нижней части S-диапазона. Одним из таких компонентов является миниатюризованный усилитель MPAL2731M100. Заключенный в керамический корпус с размерами всего 10×15 мм, он является одним из самых компактных на рынке. Другим компонентом является LDMOS-транзистор ILD2731M100. Работая в классе "АВ" при напряжении питания 32 В и токе покоя 25 мА, данный транзистор обеспечивает выходную мощность более 100 Вт при длительности импульса 100 мкс и коэффициенте заполнения 10%.

Заключение

Компания Integra Technologies чутко прислушивается к пожеланиям заказчиков и быстро реагирует на новые тенденции на рынке. Выпуск новых LDMOS-продуктов, способных работать с длинными импульсами и большими коэффициентами заполнения (вплоть до непрерывного сигнала) и обладающих высокой надежностью, является ярким тому подтверждением.

Обладая слаженной командой разработчиков с большим опытом работы в области создания СВЧ транзисторов и усилителей, Integra Technologies готова предоставить высококлассный сервис по разработке и производству широкого спектра решений (будь то отдельные транзисторы, паллеты или миниатюризованные усилители), а также качественную техническую поддержку.

Авторы выражают свою благодарность коллективу разработчиков Integra Technologies: Уильяму Раушфорту (William Rushforth), Вийнеивару Радже (Vigneshwar Raja), а также Фоаду Боуери (Fouad Bouery) за помощь в написании данной статьи.

Литература

1. Кертис Д. Разработка многокаскадных усилителей класса С для импульсных радарных применений // Современная электроника. 2007. № 1.
2. Фармикуон Г. и др. Технология мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для радарных передатчиков L-диапазона и авиационных применений // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
3. Bielen J. Prediction of high cycle fatigue in aluminum bond wires: A physics of failure approach combining experiments and multi-physics simulations. www.NXP.com
4. USPTO Patent 6,181,200 B1 and 6,331,931 B1.
5. www.integrattech.com/S-band
6. Formicone G. et. al. Analysis of Bias Effects on VSWR Ruggedness in RF LDMOS for Avionics Applications // Proceedings of the 3rd EuMIC. Oct. 2008.
7. www.integrattech.com/L-band

некоторые характеристики миниатюризованного усилителя MPAL3035M30. Работая в классе "АВ" при напряжении питания 32 В и токе покоя 10 мА, данный усилитель, выполненный по LDMOS-технологии, обеспечивает выходную мощность более 30 Вт и усиление более 10 дБ в диапазоне частот 3–3,5 ГГц при КПД около 50%. Применяемая в данном усилителе технология LDMOS позволяет работать не только с импульсами средней длины (длительность 300 мкс, коэффициент заполнения 10%), но и с непрерывным (CW) сигналом.

Размещенные в небольших корпусах (габаритные размеры — всего 230×800 мил (5,75×20 мм)), данные усилители идеально подходят для предварительных каскадов усиления, что позволяет снизить габариты, вес, а также (что особенно важно) стоимость усилителя.

Использование миниатюризованных усилителей открывает совершенно новые