

Мощный широкополосный усилитель для комплексированных систем радиолокации и связи

Евстигнеев А. А.

Представлен мощный широкополосный СВЧ усилитель, построенный на кремниевых биполярных транзисторах. Развитая система моделирования позволила существенно расширить достижимую рабочую полосу частот мощных кремниевых биполярных транзисторов. Появилась возможность создавать усилители с рабочей полосой 1-1,5 ГГц и выходной импульсной мощностью до 1 кВт. В работе описаны конструкция и схемотехника усилителя, приведены экспериментальные результаты. Усилитель может использоваться для создания широкополосных СВЧ трактов, общих для нескольких систем радиолокации и связи.

Введение

Перед разработчиками современных бортовых систем первичной и вторичной радиолокации, как правило, остро стоит вопрос минимизации массы и габаритов разрабатываемой аппаратуры. В то же время, требования по дальности работы системы все время возрастают, что требует увеличения излучаемой мощности, а следовательно, возрастают габариты и масса аппаратуры. Возможным решением могут быть интеграция передатчиков нескольких бортовых систем в единый передающий тракт и работа его на единую антенную систему. В результате может быть получен выигрыш по габаритам, а в ряде случаев и по стоимости системы в целом. В настоящей работе представлен усилительный модуль с выходной импульсной мощностью не менее 900 Вт в рабочей полосе частот 1,03-1,53 ГГц. Модуль может использоваться сразу несколькими системами самолёта или наземной РЛС, а именно: международной системой УВД (рабочие частоты 1,03 ГГц – запрос, 1,09 ГГц – ответ), первичным радиолокатором L-диапазона (частоты 1,2-1,44 ГГц) и отечественной системой опознавания (частоты 1,45-1,53 ГГц). Передатчики всех перечисленных систем работают в импульсном режиме с относительно высокой скважностью, что позволит использовать один передающий тракт по очереди для каждой системы. Во всех рассматриваемых системах нет требования по линейности передающего тракта. Это открывает возможность проектирования усилителя на мощных биполярных транзисторах (МБТ), эффективно работающих в существенно нелинейных режимах с отсечкой коллекторного тока и частично использующих квазинасыщение с целью повышения КПД и выходной мощности. Здесь важно отметить, что рабочая полоса усилительных каскадов на серийных МБТ в L-диапазоне не превышает 250-300 МГц, это касается как отечественных, так и импортных транзисторов. Расширение рабочей полосы усилителя до 500 МГц (почти в два раза по сравнению с известными аналогами) стало возможно благодаря совместной работе разработчиков аппаратуры и разработчиков МБТ на нашем предприятии.

Описание усилителя

Усилитель выполнен в герметичном дюралевом корпусе габаритами 232x174x31мм (рис. 1).

Все элементы за исключением вводов и блока электролитов располагаются на общей пластине. На верхней стороне пластины располагаются мощный СВЧ усилитель и антенный коммутатор, на обратной стороне пластины крепятся платы управления,

керамические конденсаторы, модуляторы каскадов и маломощная часть усилительного тракта. Корпус модуля закрывается крышками, одна крышка сверху и три снизу. Наличие нижних крышек позволяет обеспечить доступ при настройке к элементам, находящимся на нижней стороне пластины. Внутри корпуса также располагается блок накопительных электролитических конденсаторов, который обеспечивает работу усилителя при длительностях импульса до 10 мкс.

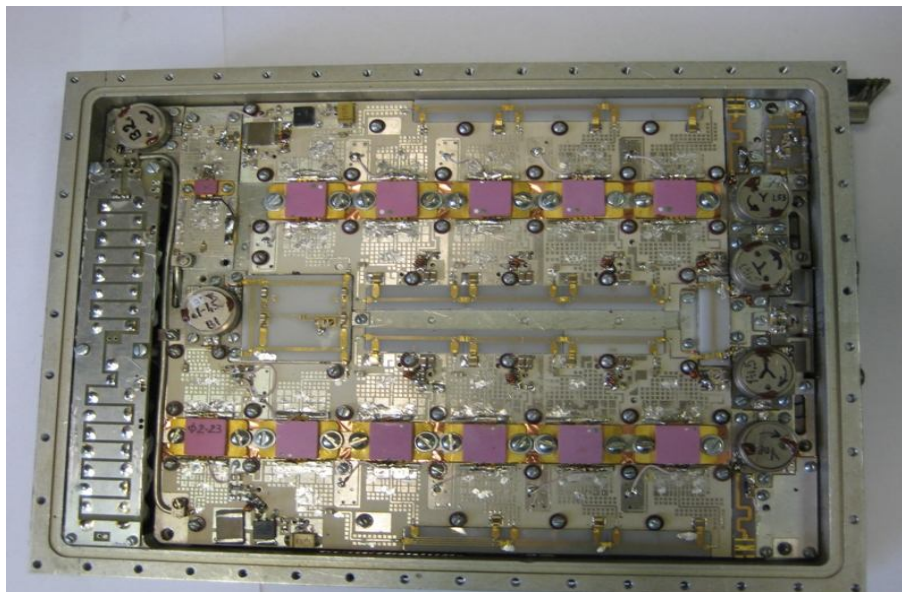


Рис. 1

Усилитель. Вид сверху

Для многих применений актуальной является работа поочередно на две нагрузки, например, переключение между носовой и хвостовой антеннами самолёта в ответчике системы опознавания или переключение с основной антенны на антенну подавления бокового лепестка в системе запросчика, а также переключение между антенной и эквивалентом антенны. Разработанный нами усилитель имеет два коммутируемых выхода. Разделение антенного тракта на приём и передачу в представленном усилителе реализовано с помощью двух циркуляторов и схемы защиты, которая блокирует прохождение сигнала в приёмник в момент работы усилителя.

На рис. 2 представлена блок-схема усилителя. Маломощная часть тракта собрана на микросхемах фирмы WJ. Микросхемы АН1 и АН102 используются в штатном режиме, а для микросхемы АН312 были синтезированы согласующие цепи, т. к. штатные цепи не обеспечивали требуемую рабочую полосу частот. При синтезе использовались S-параметры, представленные производителем. Следующие два каскада построены на транзисторах, изначально разработанных для использования на более высоких частотах (2,7-5 ГГц). Внутрикорпусные согласующие элементы были скорректированы с целью снизить рабочую частоту. Использование высокочастотных транзисторных кристаллов с низкими паразитными параметрами (в первую очередь Скб) позволило относительно легко синтезировать, а затем реализовать усилительные каскады с рабочей полосой частот 1-1,6 ГГц.

Вся последующая часть СВЧ усилителя построена на базе усилительного каскада с выходной мощностью 150 Вт.

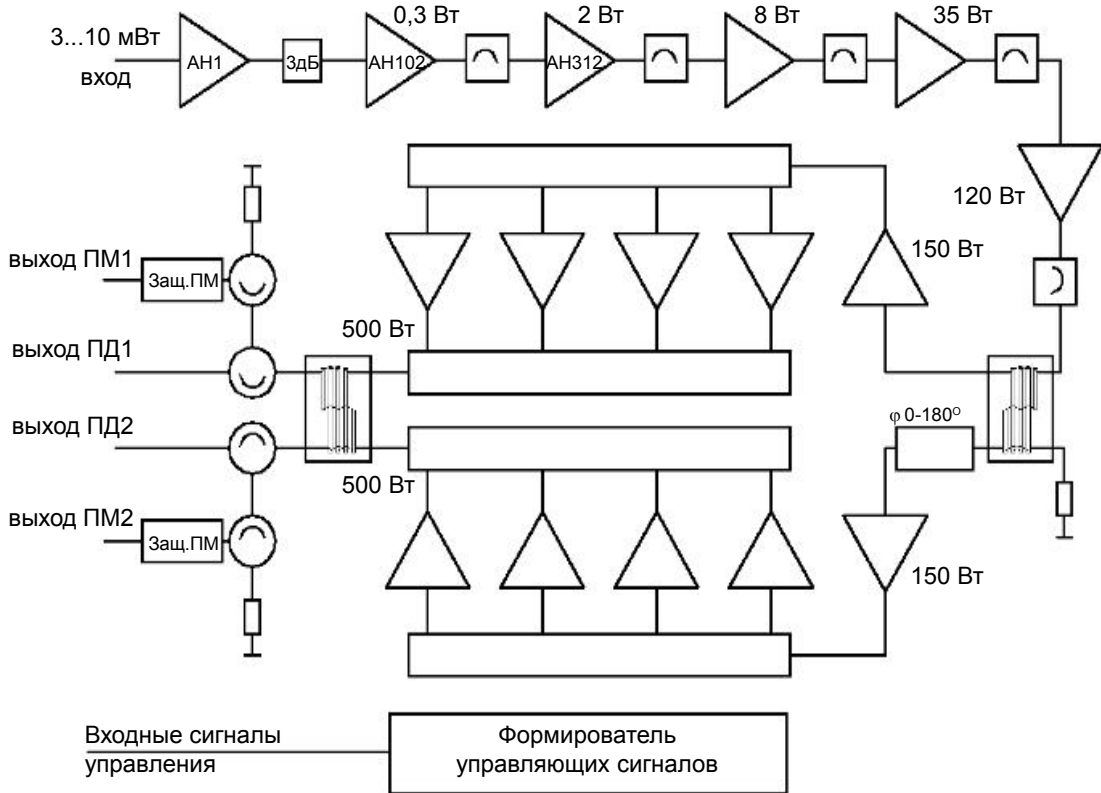


Рис. 2
Блок-схема усилителя

На протяжении ряда лет на нашем предприятии велась работа по созданию мощных широкополосных усилителей с использованием кремниевых биполярных транзисторов. Была создана модель МБТ с учётом нелинейных режимов работы [1]. На основе этой модели была разработана методика синтеза широкополосных согласующих цепей МБТ. В работе [2] была показана возможность расширения полосы согласования биполярного транзистора с выходной мощностью 120 Вт до половины октавы. В результате последующих доработок внутрикорпусных цепей согласования и модернизации транзисторных кристаллов удалось поднять выходную мощность каскада до 150 Вт в полосе 1-1,55 ГГц. Результаты измерений каскада представлены на рис. 3.

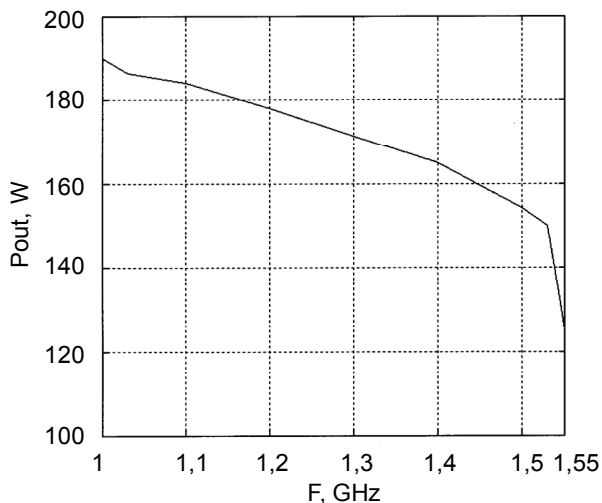


Рис. 3
Зависимость выходной импульсной мощности от частоты

Чтобы получить выходную мощность не менее 700 Вт с учётом потерь в выходном циркуляторе и сумматорах, а также с учётом падения мощности в диапазоне температур, необходимо было использовать сложение мощности восьми описанных выше каскадов. Для снижения потерь на выходе усилителя было принято решение отказаться от выходного коммутатора на два канала, а коммутирование осуществить за счёт управления фазой на уровне предварительного усилителя. Для этого оконечный усилитель разбит на две одинаковые “половинки”, каждая из которых состоит из четырёх параллельно включённых каскадов и одного каскада предварительного усилителя. Деление входной мощности и суммирование на выходе оконечного каскада осуществляются квадратурными мостами. В состав одной из “половинок” включён управляемый фазовращатель 0-180 град, в зависимости от его состояния суммирование мощности двух половинок осуществляется в одно из двух выходных плеч сумматора. При проектировании фазовращателя учитывалось, что рабочий уровень мощности должен быть не менее 40 Вт в импульсе, кроме того, необходимо было обеспечить постоянный фазовый сдвиг 180 град в полосе около половины октавы. Эти два требования предопределили выбор схемы фазовращателя на основе моста Ланге, чтобы обеспечить требуемую полосу и использование кремниевых рpn-диодов (2A546A-5 или MA4P504-132) для коммутации на высоком уровне мощности. Электрическая схема фазовращателя дана на рис. 5. Управляющие напряжения +14 В (диоды включены) и -38 В (диоды выключены). Расчёты показывают, что такая схема обеспечивает фазовый сдвиг в требуемой полосе частот с точностью до 10 градусов.

В результате неидентичности двух “половинок” оконечного усилителя (как по набегу фазы, так и по уровню мощности), а также в результате отклонения фазового сдвига фазовращателя от 180 градусов, часть выходной мощности оказывается на “отключённом” выходе усилителя. Уровень этого пролезания не превышает -15 дБ от мощности в “основном” канале.

Разделение сигнала приём-передача в каждом канале осуществляется двумя ферритовыми циркуляторами (см. рис. 2). В настоящее время нашими коллегами разработаны широкополосные циркуляторы и вентили с рабочей полосой частот 1-1,55 ГГц. Прямые потери в этой полосе не превышают 0,8 дБ при обратном затухании не хуже -15 дБ. Циркуляторы выдерживают импульсную мощность до 1000 Вт при скважности 100 и отличаются малыми габаритами (24 x 17 x 8 мм³). По совокупности параметров циркуляторы не имеют аналогов, производимых внутри страны, импортные аналоги нам также не известны.

Полученные результаты

Измерения параметров усилителя проводились в диапазоне частот 1-1,55 ГГц. Длительность выходного радиоимпульса - 1 мкс, скважность 100. На вход усилителя подавался сигнал 10 мВт. На рис. 4, 5 показаны частотные характеристики усилителя.

Из графиков видно, что в полосе 1,03-1,53 ГГц выходная мощность не опускается ниже 930 Вт в импульсе. В диапазоне частот 1,1-1,3 ГГц выходная мощность возрастает и достигает 1500 Вт. Различие в уровне мощности на двух выходах может быть объяснено тем, что вносимые фазовращателем потери, а также вносимое им рассогласование различаются для положений 0 и 180 градусов.

На рис. 5 приведена зависимость импульсного тока потребления от частоты. В связи с тем, что ток потребления маломощных каскадов усилителя по цепям +5 В и +14 В относительно невелик, мы приводим данные только по цепи питания мощных каскадов +42 В. Импульсный ток усилителя в максимуме достигает 148 ампер, эта

цифра должна быть использована для расчёта блока электролитических конденсаторов, питающих схему в течение импульса. Блок накопительных конденсаторов, включённый в состав усилителя, обеспечивает длительность импульса до 10 мкс. На этом же рисунке приведены данные по коэффициенту полезного действия.

Оценивая полученные данные, следует учесть, что при работе в такой широкой полосе частот неизбежным оказывается некоторое рассогласование выходных цепей транзисторов, что приводит к снижению КПД в каждом каскаде, кроме того, свой вклад вносят потери мощности при переключении между каналами, а также потери в сумматоре мощности и в выходных циркуляторах. Потери мощности в широкополосных циркуляторах составляют 0,7 дБ, потери в сумматорах 0,5 дБ, потери при переключении каналов также 0,5 дБ. Полученные значения КПД усилителя лежат в диапазоне 19-24%. С учётом потребления предварительных каскадов, а также вышеперечисленных потерь этим цифрам соответствует КПД выходных транзисторных каскадов 40-49%. Для сравнения - КПД мощных транзисторов при работе в узкой полосе в L-диапазоне составляет 45-55%.

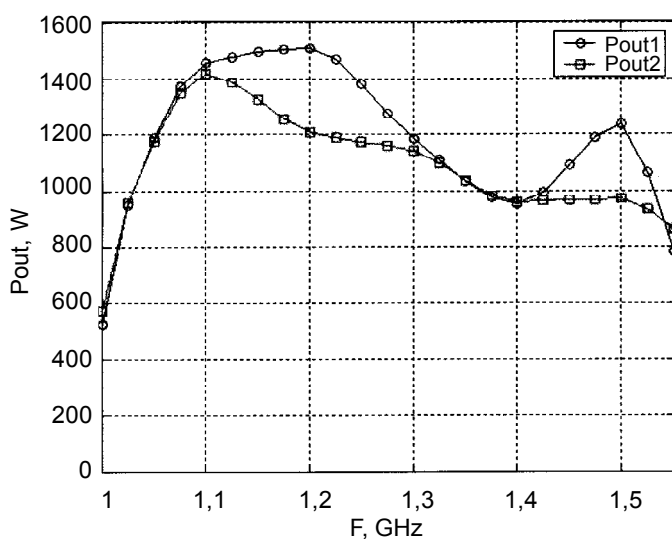


Рис. 4
АЧХ усилителя

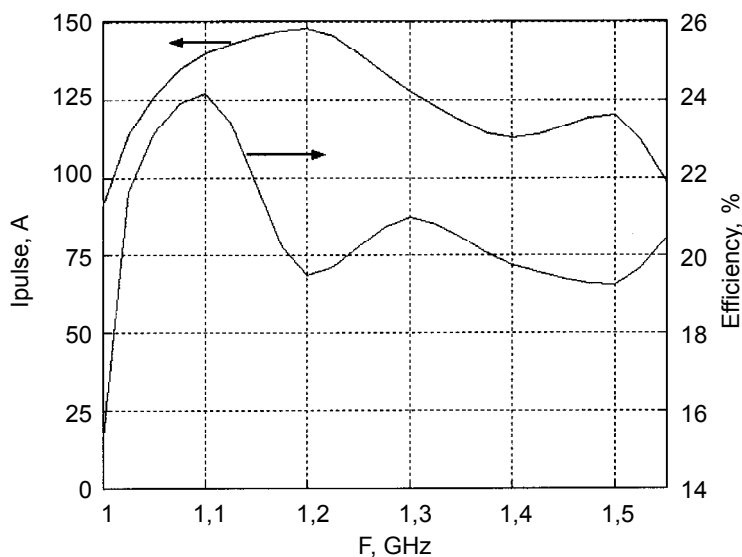


Рис. 5
Частотная зависимость тока потребления и КПД

Заключение

На базе отечественных кремниевых мощных биполярных транзисторов был разработан и испытан широкополосный импульсный усилитель большой мощности. Рабочая полоса частот 1,03-1,53 ГГц при выходной мощности не менее 800 Вт в импульсе. Полученные результаты позволяют проектировать единый радиопередающий тракт, который будет поочередно обслуживать несколько систем самолёта или наземной РЛС, например, первичный локатор, УВД, вторичный локатор. Создание такого рода комплексированных устройств на транзисторах отечественного производства позволяет создать систему с беспрецедентными до настоящего времени массо-габаритными характеристиками.

Литература

1. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учётом квазинасыщения. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2005, №1-2, с. 24-33.
2. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А. Синтез широкополосных мощных СВЧ транзисторных каскадов, работающих в нелинейном режиме. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2005, №1-2, с. 3-12.