

Разработка многокаскадных усилителей класса С для импульсных радарных применений

Печатается с разрешения фирмы Integra Technologies (<http://www.integratech.com>)

Джим Кертис (Jim Curtis) (США)

Перевод Станислава Дидилева

В статье описана методика создания полупроводникового усилителя для радарных применений. Особое внимание уделяется разработке активных цепей усилителя и определению характеристик всех его компонентов. Кратко освещены проблемы каскадирования и объединения мощности параллельных цепочек усиления.

В качестве примера в статье приводится гипотетический многокаскадный СВЧ-усилитель мощности S-диапазона.

В импульсных полупроводниковых усилителях для радарных систем могут использоваться как активные фазированные антенные решетки (АФАР), так и традиционные механически управляемые антенны. В системах на основе активных ФАР приёмопередающие модули, как правило, располагаются по всей несущей поверхности, к которой крепятся отдельные антенны. В некоторых случаях приёмопередающие модули и антенны выполняются в едином корпусе. Иногда они соединяются между собой линиями передачи сигнала – волноводами, коаксиальными кабелями. В любом случае модули механически распределяются по несущей конструкции антенны, а управление сдвигом фазы каждого модуля при формировании луча осуществляется электронным способом.

В традиционных радарных системах, где в качестве активных элементов используются биполярные СВЧ-транзисторы, в передатчик поступает мощность множества модулей. Для этого часто используются радиальные сумматоры. Все модули устанавливаются в едином корпусе, имеющем один мощный выход, к которому подключается антенный переключатель и (или) другие устройства, например, фильтры, циркуляторы и т.д. Далее подключается механически управляемая антенна или антенная система.

Нужная величина выходной мощности достигается за счёт множества

отдельных усилительных каскадов. Процедура их разработки, описанная в этой статье, подходит для усилителей, применяющихся в обоих типах радарных систем.

Разработка начинается с создания блок-схемы, которая позволяет сначала определить требования к усилителю в целом, а затем – к отдельным его компонентам и цепям.

Требования к тому или иному узлу сравниваются с характеристиками реально доступных компонентов. Это делается для того, чтобы можно было определить архитектуру усилителя, параметры отдельных каскадов усиления и потери в пассивных составляющих схем. Затем с помощью табличного или иного метода определяются общие параметры усилителя. На основе полученных данных строится блок-схема, которая показывает архитектуру усилителя и содержит данные по каждому из его элементов. Схема усилителя считается удачной, если его расчётные характеристики могут быть получены при использовании доступных электронных компонентов. Кроме характеристик большое значение имеют также надёжность и стоимость будущего устройства, однако в этой статье мы сосредоточимся только на электрических характеристиках.

Мы будем рассматривать разработку типового трёхкаскадного усилителя класса С для S-диапазона. Он может

быть использован как в качестве усилительной подсистемы в приёмопередающем модуле, входящем в состав АФАР, так и в одном из многих модулей традиционной радарной системы.

ДОСТИЖЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ

Очень важно понимать, за счёт чего будет достигнуто нужное значение того или иного параметра усилителя. Часто бывает так, что значения некоторых параметров не могут быть достигнуты либо их достижение требует значительных затрат и усложняет схему. Параметры, значения которых тяжело или невозможно достичь, должны быть определены в первую очередь. Это необходимо для того, чтобы выяснить, требуются ли изменения на системном уровне для реализации схемы на практике. Необходимо, чтобы разрабатываемый усилитель имел некоторый запас по значениям параметров. Если «бумажный» вариант усилителя всего лишь соответствует требованиям технического задания, то, скорее всего, при серийном производстве такого соответствия достичь не удастся.

Важно знать, для какого диапазона температур задаются требуемые параметры усилителя: либо параметры задаются для «комнатной температуры» и допускается их изменение в разумных пределах при изменении температуры, либо задаются минимальные значения параметров в пределах широкого температурного диапазона. В нашем примере требуемые параметры задаются для «комнатной температуры» с разумным допуском при её изменении. Подробнее мы обсудим это чуть позже.

Исходя из условий, изложенных в табл. 1, можно подобрать необходимые биполярные транзисторы, работающие в требуемом диапазоне частот при заданных временных параметрах

импульса. Выбранные транзисторы обеспечивают мощность около 100 Вт. Следовательно, потребуется не менее четырёх транзисторов для обеспечения необходимой выходной мощности. Транзисторы данного частотного диапазона обладают усилением около 8 дБ. Это значит, что понадобится не менее трёх каскадов усиления для достижения необходимой мощности. Хорошим решением является защита выхода транзисторного усилителя с помощью развязки (согласованного циркулятора). Это не только защищает усилитель от рассогласования на выходе, но и изолирует его от посторонних сигналов, отрицательно влияющих на его характеристики.

Усиление трёх каскадов в нашем случае больше требуемого, что является положительным фактором. Регулируя ослабление сигнала, можно добиться нужного усиления и компенсировать разброс параметров при серийном производстве.

Межкаскадные потери улучшают стабильность усилителя, но уменьшают эффективность его работы и увеличивают стоимость. Эти недостатки компенсируются существенным улучшением параметров усилителя. Для увеличения его эффективности наиболее целесообразно минимизировать потери, прежде всего, в выходных каскадах. Минимизация потерь должна осуществляться в направлении «от выхода к входу» усилителя. Как только его суммарное усиление превысит 10...15 дБ, небольшие дополнительные потери будут слабо влиять на эффективность работы устройства.

Для увеличения усиления отдельные каскады соединяются последовательно, а для увеличения мощности – параллельно. Как правило, усилительные каскады обладают одинаковым импедансом (например, 50 Ом). В случае параллельного соединения используются делители и сумматоры. Конструкции делителей и сумматоров достаточно разнообразны. Хорошо зарекомен-

довали себя квадратурные мостовые схемы сложения мощности. Квадратурные схемы обладают свойством направлять отражённые волны на изолированный выход. Это происходит из-за того, что в подобных схемах отражение одинаково для каждого выхода. В четырёхполосных квадратурных схемах коэффициент отражения для входа имеет небольшое значение даже в том случае, когда коэффициенты отражения для выходов достаточно велики. При этом обеспечивается хорошее согласование последних. Дополнительную информацию по данному вопросу можно получить в специализированной литературе.

Существует множество вариантов схемотехнического решения квадратурных сумматоров на два направления. Некоторые из них доступны в виде готовых коммерческих продуктов. 2^й этап усиления могут быть объединены путём каскадирования *N* квадратурных сумматоров на два направления. Часто подобную схему называют «корпоративным суммированием» (corporate combining), поскольку блок-схема подобного усилителя напоминает схему построения организации.

ТАБЛИЦА ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЯ

После того как значения параметров единичного усилительного модуля найдены, определяются характеристики всего усилителя в целом, для чего составляется таблица его параметров (см. табл. 2). Данная таблица включает в себя усиление активных приборов, потери в аттенуаторах, делителях и сумматорах, а также усиление или потери в прочих цепях. В то же время таблица определяет общий ток потребления и КПД усилителя в целом.

Такая таблица составляется «от выхода к входу» усилителя. Это сделано потому, что выходной каскад мощного усилителя является наиболее критичной его частью и определяет количество активных приборов для достиже-

Таблица 1. Требуемые характеристики разрабатываемого усилителя S-диапазона

| Параметр | Требуемые характеристики |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Диапазон рабочих частот, ГГц | 3,1...3,4 |
| Выходная мощность, Вт | 350 |
| Ширина импульса, мкс | 100 |
| Рабочий цикл, % | 10 |
| Время нарастания/спада импульса, нс | <100 |
| Усиление, дБ | 20 |
| Эффективность % | 27,5 |
| Вносимый сдвиг фазы, град | ± 20 |
| Типовое значение КСВН | 1,5 : 1 |
| Максимальный КСВН | 3:01 |
| Напряжение питания, В | 36 |
| Диапазон рабочих температур, °С | -20...+50 |
| Диапазон температур хранения, °С | -40...+100 |

ния требуемой выходной мощности. Разработчик вначале выбирает компоненты выходного каскада, а уже потом, основываясь на их характеристиках, компоненты для менее критичных каскадов усиления, предшествующих выходному. Разработчиком определяется необходимая мощность для «раскачки» выходного каскада, что, в свою очередь, позволяет подобрать оптимальный драйвер. Необходимое ослабление, если это требуется, вносится со стороны входа усилителя, там, где это возможно. Как упоминалось выше, перенесение цепей ослабления сигнала ко входу усилителя позволяет улучшить эффективность его работы и снизить его стоимость. Процесс добавления участков усиления идёт по направлению от выхода к входу до тех пор, пока требуемое усиление не будет достигнуто или превышено.

Первая строка в таблице 2 содержит показатели усиления или потерь в каждом из компонентов усилителя. Данные для этой строки вводятся вручную, т.е. не рассчитываются. Следующая строка содержит показатели мощности. Значение первой ячейки в этой строке (350 Вт) вводится вруч-

Таблица 2. Таблица параметров усилителя

| Параметр | P _{вых} | Развязка | Сумматор | Q3, тип IB3134M100 | Делитель | Аттенуатор | Q2, тип IB3134M70 | Аттенуатор | Q1, тип IB3134M25 | P _{вх} | Всего |
|---------------------------------|------------------|----------|----------|--------------------|----------|------------|-------------------|------------|-------------------|-----------------|--------|
| Усиление/потери, дБ | | -0,25 | 0,45 | 8 | -0,25 | 0 | 7 | -2,5 | 9 | | |
| Мощность, Вт | 350 | 350 | 371 | 411 | 65 | 69 | 69 | 14 | 24 | 3,1 | |
| Количество транзисторов | | | | 4 | | | 1 | | 1 | | |
| Мощность на один транзистор, Вт | | | | 103 | 16,3 | | 69 | | 24 | | |
| Эффективность | | | | 40% | | | 40% | | 40% | | 27,70% |
| Ток, А | | | | 28,6 | | | 4,8 | | 1,7 | | 35,1 |

ную, остальные значения рассчитываются исходя из значений в строке показателей усиления или потерь. Ниже идет строка, в которой указывается количество параллельно подключенных транзисторов на каскад усиления. Далее идет строка, где показаны вычисленные значения входной и выходной мощности для каждого транзистора. За ней следует строка, где вводятся значения КПД коллекторной цепи каждого транзистора. Самая нижняя строка в таблице показывает рассчитанный ток потребления для каждого каскада. И, в заключение, крайний правый столбец таблицы показывает результирующие параметры всего усилителя: его усиление, КПД и потребляемый ток.

Характеристики транзисторов вводятся покаскадно: слева направо. Характеристики компонентов указываются либо согласно спецификации, либо по итогам измерений. Как только становятся известны параметры транзистора для данного каскада усиления, они автоматически определяют параметры предшествующего каскада. Транзисторы, используемые в усилителе, являются стандартными компонентами, поставляемыми компанией Integra Technologies. Это кремниевые биполярные транзисторы, которые предназначены для работы в усилителях класса С, построенных по схеме с общей базой. Транзисторы были специально разработаны Integra Technologies для радарных применений.

Оценка дизайна усилителя

После того как таблица параметров усилителя заполнена, необходимо сравнить прогнозируемые значения его параметров с требуемыми. В нашем случае эти значения близки, но не совпадают. Поскольку в спецификациях на компоненты характеристики последних указываются с определенным допуском, прототип усилителя, скорее всего, будет удовлетворять требованиям технического задания. Однако следует отметить, что разброс значений параметров компонентов может создать проблемы при серийном производстве.

Наиболее важными характеристиками усилителя являются его выходная мощность и КПД. Если выходные

транзисторы обеспечивают мощность 100 Вт, а потери в сумматоре и цепях развязки такие, как указано в таблице, то выходная мощность составит менее 350 Вт. То есть КПД усилителя едва соответствует заявленным требованиям.

Избежать этого можно следующими способами:

- понизить требования к выходной мощности усилителя;
- применить сумматоры и цепи развязки с малыми потерями;
- увеличить число транзисторов на выходе усилителя.

Системотехническое решение проблемы может состоять в понижении требований к единичному усилителю, например, требований к его выходной мощности и, затем, увеличению числа усилительных модулей, чтобы скомпенсировать эти изменения. Довольно часто такое решение практически оправдано, поскольку в этом случае в схему усилителя добавляется минимум дополнительных компонентов. Вообще создание усилителя должно базироваться на наиболее оптимальном использовании имеющихся схем построения приборов подобного типа.¹ В данном примере мы полагаем, что параметры, показанные в табл. 2, удовлетворяют нашим требованиям.

Как только мы определились с выходным усилительным каскадом, необходимо заняться предшествующими ему каскадами. В промежуточном каскаде Q2 можно использовать тот же транзистор, что и в выходном каскаде. При этом потребуются межкаскадный аттенуатор на 1,5 дБ, но это позволит использовать однотипные схемотехнические решения для пяти цепей. Применение аттенуатора понизит эффективность всего усилителя на 2%. Поскольку нам необходимо обеспечить максимальную эффективность, разумнее использовать альтернативное решение – применить 70-ваттный транзистор в качестве драйвера выходного каскада. В предварительных цепях усиления использование однотипных компонентов предпочтительнее, даже если при этом незначительно снизится эффективность усилителя в целом.

И наконец, выбирается транзистор для входного каскада усиления. При использовании аттенуатора на 2,5 дБ мы можем применить имеющийся

транзистор на 25 Вт. В данном случае применение аттенуатора оправдано, поскольку он обеспечивает согласование импеданса двух усилительных каскадов.

После того как основные параметры тракта усиления определены, отдельные цепи (как активные, так и пассивные) прорабатываются более детально. На этом этапе необходимо более точно определить параметры используемых компонентов, что позволит корректно провести разработку и оптимизировать вышеуказанные цепи. Разработчики, как правило, пользуются данными, приведенными в документации на используемые приборы, однако это должно служить лишь отправной точкой в разработке. Для каждого критичного компонента схемы необходимо определить его параметры при работе в реальной схеме усилителя, со всеми ограничениями, накладываемыми используемым схемотехническим решением и конструктивными особенностями. В результате мы получаем информацию о работе используемых компонентов в реальных условиях с учетом паразитных связей, зависящих от материала подложки, системы заземления и т.д. Эту информацию невозможно получить из спецификаций.

Разработка активных цепей усилителя (каскадов усиления)

Как уже говорилось выше, мы должны более точно определить параметры критичных компонентов схемы. Например, если мы намереваемся использовать квадратурные сумматоры для поверхностного монтажа, нам необходимо определить точные параметры этих компонентов в схеме включения, которая будет использована в нашем усилителе, поскольку характеристики сумматоров будут сильно зависеть от схемы заземления и расположения сигнальных цепей.

При этом используются различные методики, такие как измерение параметров сигнала в различных точках схемы, измерение коэффициента отражения методом совмещения прямого и отраженного испытательных сигналов и т.д.

Наилучшим методом для определения характеристик мощных СВЧ-

¹ Следует отметить, что запас по эффективности и требования к мощности усилителя в данном примере приведены для иллюстрации типичных проблем, возникающих при создании усилителя. В любом случае в процессе разработки усилителя важно, чтобы проектируемые параметры соответствовали или превосходили требуемые.

транзисторов является метод согласования нагрузок (load pull). Суть данного метода заключается в том, чтобы испытать транзистор при различных значениях импеданса нагрузки, измеряя при этом его характеристики. Например, транзистор подключается к источнику импульсного сигнала определённой частоты, при этом измеряются значения входной и выходной мощности, тока коллектора, параметры импульса и другие важные характеристики. После обработки данных определяются точки импеданса, и на круговой диаграмме полных сопротивлений строятся кривые равной мощности, равной эффективности и т.д. Набор кривых, например, выходная мощность и эффективность, могут быть наложены друг на друга с целью определения «точек наибольшей эффективности». Данные измерения повторяются для различных частот внутри интересующего нас диапазона. Частоты измерений должны быть достаточно близко расположены друг к другу для выделения тенденции изменения параметров в интересующем нас диапазоне. В нашем случае (в диапазоне 3,1...3,4 ГГц), мы можем начать с трёх точек измерения параметров. Если полученные данные будут достаточно «гладкими», то возможно провести экстраполяцию данных. В противном случае придётся уменьшить шаг проведения измерений до 100 или 50 МГц. Этот процесс можно автоматизировать, используя специализированное коммерчески доступное оборудование.² Ниже мы опишем, как провести процесс вручную.

Уточнение характеристик методом согласования нагрузок

Процесс уточнения характеристик включает в себя согласование транзистора в нескольких точках с использованием специальных подстроечных цепей. При этом снимаются значения КПД и импеданса. Затем по полученным значениям на плоскости полных сопротивлений строится кривая равного КПД. Важно

в начале измерений включить транзистор в схему «предварительного согласования» для обеспечения приемлемого согласования.³ Эта схема должна представлять собой съёмную конструкцию для обеспечения возможности измерения суммарного импеданса коллекторной цепи согласования транзистора и внешних подстроечных цепей.

Измерения проводятся следующим образом. Транзистор включается по вышеуказанной схеме, и к его выходу подключается внешняя настроечная цепь. Последняя должна допускать подстройку в небольших пределах для обеспечения либо оптимального согласования, либо известного рас- согласования (но не более чем 3 : 1).

Настройки подстроечной цепи фиксируются или записываются, и производится измерение параметров производительности.

Внешняя цепь «предварительного согласования», включая подстроечные цепи, подсоединяется к измерительной цепи.⁴ Измерительная цепь может состоять из микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Она позволяет проводить измерения импеданса, используя специализированный анализатор спектра с расширенными возможностями. В идеале ширина полосковой линии должна соответствовать ширине вывода коллектора применяемого транзистора. Целесообразно также использовать в качестве подложки для данной линии материал с малым значением диэлектрической проницаемости. Измерительный электрод анализатора подключают в том месте, где должен находиться коллекторный вывод нашего транзистора. После этого измеряется импеданс цепи.

Процесс уточнения характеристик может быть полуавтоматизирован при использовании специальных подстроечных цепей с низкими потерями. Схема с транзистором подключается к подстроечной цепи, и диэлектрические настроечные элементы устанавливаются таким образом, чтобы получить известные значения импеданса. Показания снимаются по-

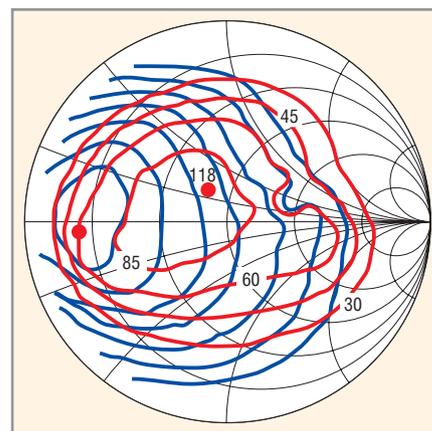


Рис. 1. Диаграмма согласования нагрузок

Кривые постоянной мощности на диаграмме помечены, кривые постоянной эффективности – не помечены

следовательно через 20...30° вращения фазы. При этом мы получаем от 12 до 18 точек измерений на один настроечный элемент при условии, что мы охватываем все 360° поворота фазы. Количество точек измерения может быть увеличено путём использования диэлектрических элементов, вносящих различную степень рассогласования цепи. Точки импеданса, отнесённые к коллекторной цепи транзистора, вместе с другими показателями наносятся на круговую диаграмму полных сопротивлений, где строятся кривые равных значений выбранных параметров. Кривые строятся либо прямым соединением точек, либо путём экстраполяции. Данная методика даёт результаты, сходные с теми, которые получаются при использовании коммерческих систем аналогичного назначения. К сожалению, точность метода зависит от опыта оператора, а проведение измерений занимает значительное время. Но, тем не менее, применение данной методики считается целесообразным, поскольку мы получаем необходимую информацию для проведения оптимизации цепей согласования транзистора.

На рис. 1 показана диаграмма, составленная вышеуказанным методом. Точки были нанесены по полученным данным, а линии – нарисованы от руки.

² См. описания оборудования компаний Maury Microwave (www.maury-microwave.com) и Focus Microwave (www.focusmicrowave.com). На вышеуказанных сайтах представлена информация не только об оборудовании, но и об особенностях методики проведения измерений.

³ В случае, когда цепь «предварительного согласования» плохо настроена, потери будут велики. Вследствие этого невозможно будет измерить параметры транзистора, поскольку потери будут меняться в зависимости от КСВН в цепях нагрузки и мы получим не реальные параметры транзистора, а их значения с учётом неизвестных потерь.

⁴ Используя две идентичные цепи «предварительного согласования», можно вынести подстроечные цепи из транзисторной схемы во вторую цепь «предварительного согласования» и таким образом избежать процедуры удаления транзистора для проведения измерений импеданса.

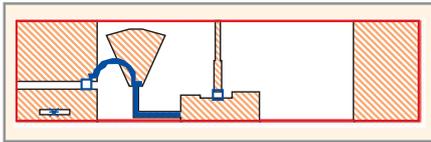


Рис. 2. Выходные цепи согласования для транзистора IB3134M100

После того как получены необходимые данные, выбираются оптимальные значения импеданса для каждой из рабочих частот. Часто эти значения не согласуются с двумя или несколькими другими параметрами усилителя, как правило – эффективностью и пиковой мощностью.

Следующим шагом является создание согласующих цепей, которые трансформируют импеданс нагрузки (50 Ом) в необходимый импеданс коллекторной цепи транзистора. И здесь не обходится без компромиссов, поскольку невозможно одновременно достигнуть оптимального импеданса для каждой частоты. Так как с ростом частоты эффективность усилителя уменьшается, разработчики стараются достичь оптимального согласования в верхнем конце рабочего диапазона, допуская некоторое рассогласование на низших частотах. Полученная выше диаграмма позволяет подобрать наилучшее согласование на этих частотах.

СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСА ТРАНЗИСТОРА

Одной из признанных методик согласования импеданса транзистора является выделение комплексной составляющей импеданса, а затем – преобразование оставшейся действительной его составляющей. При этом используется цепь согласования, выполненная в виде нескольких секций ФНЧ. Если действительная составляющая импеданса нагрузки при изменении частоты остаётся сравнительно неизменной, то в качестве первого элемента схемы согласования используются последовательно включенные компоненты или линии передачи сигнала. В случае, когда сравнительно неизменной остаётся действительная составляющая полной проводимости нагрузки, в качестве первого элемента используются шунтирующие цепи или линии передачи сигнала, использующие эти цепи. Оптимальный импеданс нагрузки мощных СВЧ-транзисторов имеет достаточно малое значение – как правило, около 1 Ом. В случае, когда импеданс нагрузки имеет малое значение и

его мнимая составляющая незначительна, практически невозможно использовать или подключить шунтирующую цепь с малым импедансом. Поэтому на практике в качестве первого элемента согласующей цепи используется последовательная линия передачи с малым полным сопротивлением. Оставшиеся секции цепи согласования состоят из чередующихся участков с высоким и низким импедансом, которые можно представить в виде последовательно включенных катушек индуктивности и шунтирующих конденсаторов – так называемый П-контур. Секции П-контура можно оптимизировать, используя круговую диаграмму полных сопротивлений или специальное программное обеспечение для анализа СВЧ-цепей.

В некоторых случаях для уменьшения размеров в цепь с распределёнными параметрами добавляют компоненты с сосредоточенными параметрами. Перед использованием таких компонентов необходимо определить их импеданс и потери. Поскольку данные компоненты часто добавляются в те точки схемы, где значение импеданса невелико, протекающие в них токи имеют достаточно высокие значения. В связи с этим такие компоненты должны обладать крайне малыми потерями. Паразитная последовательная индуктивность и индуктивность цепей заземления (межслойных соединений и перемычек) также должна быть мала. Вообще следует проводить оценку паразитных явлений, поскольку последние должны быть учтены при разработке и анализе схемы.

Типовая схема согласования коллекторной цепи выходного транзистора IB3134M100, разработанная в результате рассмотренных выше процедур, приведена на рис. 2.

Разработка входных согласующих цепей осуществляется похожим образом. При помощи метода согласования нагрузок определяется оптимальное значение входного импеданса. Для этого внешняя цепь согласования настраивается с целью минимизации обратных потерь на входе. При этом измеряется значение импеданса на выходе цепи входного согласования. Некоторые разработчики также проводят оценку степени согласованности импеданса источника сигнала, однако, это обычно делается только для усилителей, работающих в линейном режиме, поскольку изменение импеданса

источника сигнала в таких схемах может повлечь за собой искажение сигнала. При разработке входных цепей усилителей класса С, работающих в импульсном режиме, подобной операции не требуется. Достаточно добиться оптимального согласования. После того как получены данные по выходному импедансу, данные по входному импедансу измеряются точно – на каждой из заданных частот. Поскольку в транзисторных усилителях существует связь между входными и выходными цепями, входное согласование является менее критичным и может быть определено всего лишь в одной точке для каждой частоты – точке, соответствующей оптимальному согласованию. После определения оптимального значения входного импеданса разрабатывается соответствующая цепь согласования по методике, приведённой выше.

ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ

Для обеспечения работы биполярного транзистора в усилителях класса С необходимо смещение обеспечивается путём включения между эмиттером и базой транзистора ВЧ-дресселя с низким сопротивлением. Это обеспечивает запираение транзистора по постоянному току. Транзисторы рассматриваемого усилителя включены по схеме с общей базой, поэтому выводы базы транзисторов непосредственно соединены с общим проводом. Нам остаётся только соединить их эмиттеры с «земляной» шиной посредством ВЧ-дресселей с низким сопротивлением. Индуктивность между эмиттером и базой должна быть учтена, поскольку она влияет на время нарастания и спада импульса. В момент открытия транзистора, при нарастании импульса, изменение тока в цепи индуцирует отрицательное смещение между базой и эмиттером. Оно препятствует открытию транзистора и увеличивает время нарастания импульса. При спаде импульса, наоборот, изменение тока индуцирует положительное смещение, препятствующее закрытию транзистора. Уменьшение паразитной индуктивности между эмиттером и базой позволяет минимизировать оба эти эффекта. Полная индуктивность цепи между эмиттером и базой включает в себя сумму индуктивностей её компонентов в точке, где к эмиттеру подключается шунтирующий дроссель. Размеры ВЧ-дресселя должны быть настолько малы, насколько это возможно, а

место его подключения должно быть максимально близко к транзистору для уменьшения общей индуктивности. Таковы основные требования к цепям смещения эмиттера.

В коллекторную цепь транзистора включается ВЧ-дроссель, а затем данная цепь шунтируется конденсаторами для уменьшения импеданса источника питания в видеодиапазоне сигнала. (Здесь видеодиапазон – ширина полосы частотного спектра импульса сигнала. – *Прим. переводчика.*) Ширина видеодиапазона сигнала зависит от параметров импульса. В нашем случае при длительности фронта импульса 100 нс видеодиапазон составит чуть более 10 МГц. Уменьшение сопротивления источника питания в подобной полосе частот не является особенно сложной задачей. Коллекторная цепь должна включать шунтирующие конденсаторы, работающие при низких, средних и высоких частотах, поскольку паразитные явления и потери ограничивают «частотную эффективность» отдельно взятого шунтирующего конденсатора. Цепи шунтирования также должны эффективно подавлять сигналы рабочего диапазона частот усилителя, препятствуя межкаскадным наводкам по цепям питания. Наконец, добавление RC-цепочки между коллекторной цепью и «землёй» способствует улучшению стабильности работы усилителя, представляя собой действительную часть импеданса нагрузки на частотах, выходящих за пределы, обеспечиваемые шунтирующими конденсаторами. В случае добавления RC-цепочки её параметры определяются экспериментально.

Оптимизация усилителя

При разработке отдельных каскадов усиления их схемы воплощаются в «реальное железо» и тестируются. При тестировании каждый каскад выполняется в виде отдельного модуля. Такое решение позволяет использовать специальную измерительную аппаратуру для определения параметров входных и выходных согласующих цепей. В случае, когда параметры удовлетворяют ожидаемым значениям, можно собирать линейку усиления в целом, включая активные компоненты, и затем проводить тонкую настройку путём подрезания полосковых линий или иным способом. В противном случае необходимо проанализировать схему для выяснения причин отклонения па-

раметров и устранить эти причины, после чего можно приступать к сборке и окончательной настройке усилителя.

Каскадирование усилителя

Для увеличения выходной мощности отдельные каскады усиления включаются параллельно. Существует несколько методов суммирования мощностей. Вообще в области СВЧ делители и сумматоры могут быть разделены на две большие категории: синфазные и квадратурные. Мост Вилкинсона (the Wilkinson hybrid) является типичным синфазным N-полюсным сумматором/делителем. Его преимуществами являются широкополосность, относительно простой процесс расчёта и создания конструкции, а также хорошая развязка между выходами. Между тем, достаточно сложно разместить изолирующие резисторы на планарных подложках в случае, когда требуется более чем два выхода (в случае делителя). И что более важно, мосты Вилкинсона допускают проникновение отражённых от выходов сигналов на вход. Квадратурные мосты более сложны в расчёте и создании, однако они не допускают проникновения отражённого сигнала на вход, т.е. имеют высокие значения обратных потерь на входе даже в случае, когда выходные порты (в случае делителя) подключены к несогласованным нагрузкам. Квадратурные мосты обеспечивают близкое значение импеданса, т.е. одинаковую амплитуду и фазу сигнала, для выходов. Подобная особенность квадратурных мостов значительно облегчает каскадирование квадратурно-комбинированных стадий усиления, поскольку в этом случае каждый каскадируемый порт обеспечивает требуемое значение импеданса (50 Ом) для соседних каскадов. Обычно рассогласование проявляется на входе и выходе каждого отдельно взятого каскада усиления. Оно вызывает расстройку соседних каскадов и часто приводит к нестабильности работы усилителя в целом.

Избежать этого можно, улучшив согласование путём добавления развязки или аттенуатора между каскадами. Следует отметить, что рассогласование увеличивается с расширением рабочего диапазона усилителя. Для устранения рассогласования в широкополосных трактах обычно используют один из следующих способов:

- каждый усилительный каскад выполняется в виде квадратурно вклю-

ченных транзисторов. Это приводит к тому, что обратные потери на входе и выходе являются функцией моста, а не транзисторов;

- добавляется развязка между каскадами усиления;
- вводятся потери между каскадами. Хорошим показателем считаются обратные потери для каждого каскада более 16 дБ. Если транзистор с согласующими цепями обладает обратными потерями в 12 дБ, следует добавить аттенуатор на 2 дБ для достижения необходимого минимума. Если отдельные каскады настроены и соответствуют требуемым параметрам, они объединяются в единый усилитель, и производится конечная настройка последнего с целью устранения нежелательных эффектов рассогласования между каскадами. Альтернативной методикой является создание прототипа усилителя целиком и последующая его настройка. Общепринятой практикой при создании многокаскадных усилителей является добавление в схему контрольных точек, которые, как правило, располагаются вблизи межкаскадных соединений. Подобные точки могут быть выполнены, например, в виде линии с волновым сопротивлением 50 Ом, ориентированной перпендикулярно к межкаскадному соединению в месте расположения разделительного конденсатора. Таким образом, конденсатор может служить как для связи между каскадами (рабочее положение), так и для подключения нужной цепи к контрольной точке (в режиме тестирования). В идеале контрольные точки должны позволять определить параметры во всех промежуточных точках усилителя, т.е. на входе и выходе каждого каскада, что существенно облегчает настройку как отдельных каскадов, так и усилителя в целом.

Нормализация усиления

Широкополосные усилители имеют большее усиление на низких частотах, что обусловлено характеристиками активных элементов, а также увеличением потерь в линиях передачи с ростом частоты. Большее усиление вызывает перегрузку линейки каскадов усиления, причём с ростом количества каскадов данная тенденция проявляется всё чётче. Если каскады усиления используют квадратурно включенные транзисторы, то

можно разработать входные согласующие цепи так, чтобы на низких частотах мощность направлялась на изолированный порт. Альтернативным решением является применение корректирующих амплитуду сигнала цепей, которые поглощают мощность на низких частотах. Эти цепи должны быть сконструированы так, чтобы вносить минимальные потери или вообще не вносить потерь на высоких частотах. Данный метод хорошо подходит для усилителей, где в оконечных каскадах используется по одному активному прибору, поскольку корректирующие амплитуду цепи улучшают согласование путём внесения затухания на низких частотах. Важно «нормализовывать» усиление последовательно, каскад за каскадом, чтобы каждый из них входил в насыщение при нужном нам уровне сигнала. Если подключить одиночную цепь частотной коррекции уровня сигнала к усилителю, состоящему из нескольких каскадов усиления, то, скорее всего, один или несколько каскадов будут «недораскачены» на некоторых частотах. Эти каскады будут искажать форму импульса, и их параметры будут сильно зависеть от температуры, поскольку каскады не смогут обеспечить компрессию усиления.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОТИПА УСИЛИТЕЛЯ

Общее усиление прототипа усилителя должно быть приблизительно равно сумме усиления отдельных его каскадов. Неравенство этих двух значений обычно вызвано факторами, рассмотренными ниже.

Рассогласование нагрузки

Отдельные каскады усиления настраиваются на работу с нагрузкой 50 Ом. Обратные потери на входе каждого из каскадов на некоторых частотах обычно составляют не более 10 дБ ($K_{СВН} = 2 : 1$). Такое рассогласование вызывает изменение усиления, искажает форму импульса, а также изменяет показатели мощности смежных каскадов в режиме насыщения. Эффект рассогласования нагрузки может быть оценен путём определения параметров каждого каскада при минимально допустимых обратных потерях последующего каскада. Как уже не раз упоминалось выше, добавление в схему развязывающих цепей или аттенюатора поможет решить эту проблему.

Паразитные связи внутри каскадов или между каскадами

Стабильность работы многокаскадных усилителей в открытом исполнении достигается за счёт топологии схемы, исключающей нежелательные взаимодействия между её компонентами. Небольшое изменение параметров усилителя происходит, когда сумма наводок по крайней мере на 15 дБ меньше, чем уровень входного сигнала. Например, усилитель с усилением 25 дБ будет работать стабильно и лишь незначительно искажать форму сигнала на выходе, если паразитные связи между входами каждого каскада будут на 15 дБ меньше по сравнению с входным сигналом.

В случае, когда усилитель выполнен в корпусе, резонансные эффекты могут привести к искажению сигнала. Корпус часто резонирует на одной или более частотах. При резонансе происходит искажение сигнала и может возникнуть нестабильность работы усилителя. Существует несколько методов устранения данного эффекта. Одним из них является разбиение усилителя на отдельные экранированные области. Межкаскадные соединения выполняются через специальные отверстия в экранирующих перегородках. Данные отверстия играют роль заградительного волновода, обеспечивая пропускание сигнала только нужной полосы частот.

Когда добавление экранирующих перегородок невозможно по той или иной причине, специально разработанная система заземления корпуса часто позволяет исправить положение. С помощью специальных контактных лепестков корпус усилителя заземляется, причём заземляющие контакты располагаются преимущественно вдоль короткой его стороны. Расположение и количество заземляющих контактов, как правило, определяется экспериментально.

Наводки по цепям питания

Цепи питания и смещения многокаскадных усилителей должны хорошо шунтироваться во всём диапазоне рабочих частот для предотвращения попадания ВЧ-сигнала по этим цепям из одного каскада в другой. Как правило, для этой цели используют конденсаторы с низким эквивалентным последовательным сопротивлением, подключенные в точках, куда подводится питающее напряжение. При-

чём эти конденсаторы подбираются так, чтобы получить эффект последовательного резонанса на рабочих частотах усилителя. Необходимые данные для достижения последовательного резонанса можно получить, используя математическую модель конденсатора, однако эти данные следует проверить на практике, поскольку паразитная индуктивность понижает частоту последовательного резонанса.

Примечание переводчика. В качестве оптимального средства для выбора подходящего высокодобротного конденсатора для цепей согласования можно использовать программу ATC TechSelect версии 3.2, доступную на сайте www.atceramics.com. Программа позволяет для выбранного конденсатора на заданной частоте получить значения добротности, комплексного и реактивного сопротивления, рабочего тока и частоты последовательного резонанса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Becciolini B.* Motorola Application Note AN-721. Impedance Matching Networks Applied To RF Power Transistors.
2. *Cristal E.G.* Tables of Maximally Flat Impedance-Transforming Networks of Low-Pass-Filter Form. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT 13. No 5. September 1965.
3. *Fano R.M.* Theoretical Limitations on the Broadband Matching of Arbitrary Impedances. J. of Franklin Institute, January – February 1950.
4. *Horwitz J.H.* Design Wideband UHF-Power Amplifiers. Electronic Design 11. May 24. 1969.
5. *Matthaei G.L., Young L., Jones E.M.T.* Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures. McGraw-Hill Book Company. 1964.
6. *Matthaei G.L.* Tables of Chebyshev Impedance-Transforming Networks of Low-Pass Filter Form. Proc. IEEE, August. 1964.
7. Motorola Application Note AN-282A. Systemizing RF Power Amplifier Design.
8. *Ostroff E., Borkowski M., Thoms H., Curtis J.* Solid-State Radar Transmitters. Artech House. 1985.
9. *Pitzalis O., Gilson R.A.* Tables of Impedance Matching Networks which Approximate Prescribed Attenuation Versus Frequency Slopes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT-19. No 4. April 1971.

