

Предисловие

Для СВЧ усилителей мощности и высокочастотных усилительных трактов, технические характеристики которых часто определяют построение всей системы радиосвязи, рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с анализом и оптимизацией разработки соответствующих устройств, — от физических основ функционирования электронных приборов до базовых математических методов, лежащих в основе автоматизированного проектирования схем с мощными транзисторами в нелинейных режимах работы и методов цифровой компенсации динамических нелинейных эффектов памяти на основе поведенческих моделей.

Необходимость данного подхода объясняется тем, что полупроводниковые приборы, используемые в СВЧ усилителях мощности систем мобильной связи, часто работают на пределе возможностей данного материала и технологии, а высокочастотные усилительные каскады — в сложных нелинейных режимах, описываемых системами дифференциальных уравнений высокого порядка, что объясняется отчасти требованиями к высокой эффективности усиления широкополосных сигналов с сильно меняющейся амплитудной огибающей, характерных для современных систем мобильной связи и радиодоступа.

Тем не менее, несмотря на использование новых методов проектирования усилителей мощности, рассмотренных в этой книге, высокий КПД СВЧ усилителей, разработанных на основе технологии НЕМТ на арсениде галлия, составляющий более 80 % на частотах до 5...6 ГГц для двухтактных схем класса D с переключением напряжения и более 90 % на частотах до 10 ГГц для усилителей класса F, не может быть реализован на практике в системах мобильной связи из-за требований к высокой линейности усиления широкополосных сложных групповых сигналов с высоким пик-фактором. Тем более, что традиционные подходы к разработке СВЧ радиотрактов передающей части, когда достаточно использовать упрощенные модели электронных приборов и методики ручного расчета режимов

их работы с использованием справочной литературы, не позволяют получить необходимый результат и приблизить, насколько это возможно, технические характеристики разрабатываемых электронных устройств к потенциально наилучшим показателям.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в разработке профессиональных пакетов компьютерных прикладных программ, позволяющих автоматизировать процедуру проектирования как отдельного усилителя мощности, так и всего высокочастотного усилительного тракта. При этом производители транзисторов обычно приводят таблицы S-параметров, соответствующие рекомендованным режимам их работы в усилителе мощности. В противном случае в нелинейном режиме использования прибора можно с помощью разработанных в настоящее время векторных анализаторов нелинейных цепей измерить и в дальнейшем использовать X-параметры. С другой стороны, S- или X-параметры можно сгенерировать для заданной эквивалентной схемы прибора, а затем использовать при разработке усилителя мощности, поскольку на основе таких измерений можно моделировать импедансы согласующих цепей как на основной частоте, так и на частотах гармоник на входном и выходном электродах активного элемента. В результате можно подобрать согласующие цепи, позволяющие обеспечить максимальные значения выходной мощности и КПД усилителя. Существуют программы, позволяющие разработать топологию согласующих цепей на линиях передачи и проанализировать их электромагнитные характеристики. Затем на основе полученных данных можно собрать усилитель мощности, после чего измерить его рабочие характеристики с помощью нелинейного векторного анализатора цепей (NVNA). Подобные разработки позволяет осуществить, например, САПР Agilent ADS. При этом можно достоверно исследовать поведение усилителя в условиях работы как на согласованную, так и на рассогласованную нагрузку, а также моделировать каскады нелинейных приборов, включая предсказание искажений сигнала в них. При разработке цепей согласования можно использовать и электронную версию диаграммы Смита (Smith's Chart), разработанную Ф. Деллшпергером. Она позволяет наносить точки на нее из файлов типа Touchstone (с расширением .s2p), содержащих значения S- или X-параметров согласуемых элементов, а также вручную. Электронная версия диаграммы Смита позволяет также разрабатывать цепи согласования и суммирования мощностей на отрезках линий, так как позволяет быстро находить сопротивление в любом сечении линии по известной нагрузке, определять необходимую длину отрезка линии при заданном входном сопротивлении, находить се-

чения линии, в которых надо подключать те или иные согласующие элементы. На основе этой диаграммы можно также проводить исследование устойчивости как отдельного усилителя мощности, так и совокупности высокочастотных усилительных каскадов.

Значительные успехи достигнуты в настоящее время в области разработки моделей транзисторов. Представление о них можно получить, например, в базах данных SPICE и AWR Microwave Office, где каждому прибору соответствует эквивалентная схема и описывающая ее система нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Для исследования динамики работы транзистора в различных режимах необходимо инициировать решение этих уравнений путем ввода системы его SPICE-параметров. Эти параметры являются частью математической модели транзистора и включают его параметры по постоянному току, паразитные сопротивления и емкости переходов, параметры подложки и т.д. Для большинства типов транзисторов типовые наборы SPICE-параметров имеются в базе данных AWR Microwave Office. В противном случае их можно ввести, воспользовавшись соответствующим диалоговым окном. Аналогичный подход может быть использован при исследовании усилителей мощности. С этой целью микроскопическая эквивалентная схема транзистора интегрируется в любую схему усилителя мощности, а нелинейные элементы аппроксимируются нелинейными аналитическими функциями. В настоящее время широко используется ряд коммерческих программ моделирования нелинейных объектов на основе, например, методов гармонического баланса или теории рядов Вольтерры.

Анализ монографической и учебной литературы, посвященной радиопередающим устройствам, показывает, что в настоящее время бытуют два подхода. Во-первых, существуют очень хорошие классические книги, ориентированные на упрощенные модели приборов и соответствующие упрощенные ручные методики расчета режимов их работы с использованием справочной литературы, интуиции разработчика, сложившихся традиций. Данный подход отчасти объясняется необходимостью освоения слишком широкого круга вопросов при попытке углубить изложение — от особенностей работы полупроводниковых структур до теории функционального анализа, методов адаптивного управления или теории нейросетей.

Другой подход ориентирован в основном на рассмотрение вопросов работы с существующими профессиональными компьютерными программами, когда сущностная основа предмета исследования и разработки представляется не столь важной и приводится справочно. Предполагается, что разработчику радиоаппаратуры не обяза-

тельно глубоко разбираться в теории радиопередающих устройств, а сам процесс проектирования видится похожим на игру в конструктор. Но в этом случае не следует ожидать и корректных результатов разработок или дальнейшего повышения их уровня.

Целью данной книги является, с одной стороны, рассмотрение традиционных методов анализа и проектирования СВЧ-усилителей мощности и радиокаскадов на их основе, но с учетом новых достижений в этой области и на современной элементной базе, активное внедрение которой в системах мобильной связи и радиодоступа началось примерно 15 лет назад, а с другой стороны, рассмотрение целого ряда вопросов, традиционного не включаемых в литературу по данному вопросу, но без которых невозможно представить современные средства автоматизированного проектирования электронных средств с мощными транзисторами, работающими с большими сигналами. Подчеркнем, что развитие в данной области идет столь быстро, что любые публикации часто устаревают уже в момент их появления. Поэтому в этой книге внимание уделяется основным, фундаментальным принципам, которые можно будет применить в дальнейшем при разработках с приборами и материалами, которые появятся в будущем. Для ее изучения достаточно иметь подготовку, соответствующую первому и второму курсам профильного высшего учебного заведения.

Для специалистов в области проектирования СВЧ усилителей мощности систем мобильной связи и радиодоступа, а также широкого круга разработчиков техники СВЧ. Также книга может быть полезна преподавателям, студентам старших курсов, магистрам и аспирантам, обучающимся по радиотехническим и информационным специальностям.