

Новаторский подход к проектированию скоростных RFIC-передатчиков

Энди ХАУАРД
(Andy Howard)

Для проектирования приемопередатчиков (трансиверов) на основе радиочастотных интегральных схем (RFIC) необходимо использовать различные технологии и возможности моделирования. В этой статье представлен целый ряд методов моделирования в частотной области (гармонический баланс), смешанного моделирования в частотной и временной областях (анализ огибающей модулирующего сигнала), электромагнитного моделирования и смешанного моделирования в числовой, частотной и временной областях (испытательные стенды для беспроводной связи), которые применяются в передатчиках интегрированных RFIC-трансиверов для беспроводных локальных сетей (WLAN), соответствующих стандарту IEEE 802.11b.

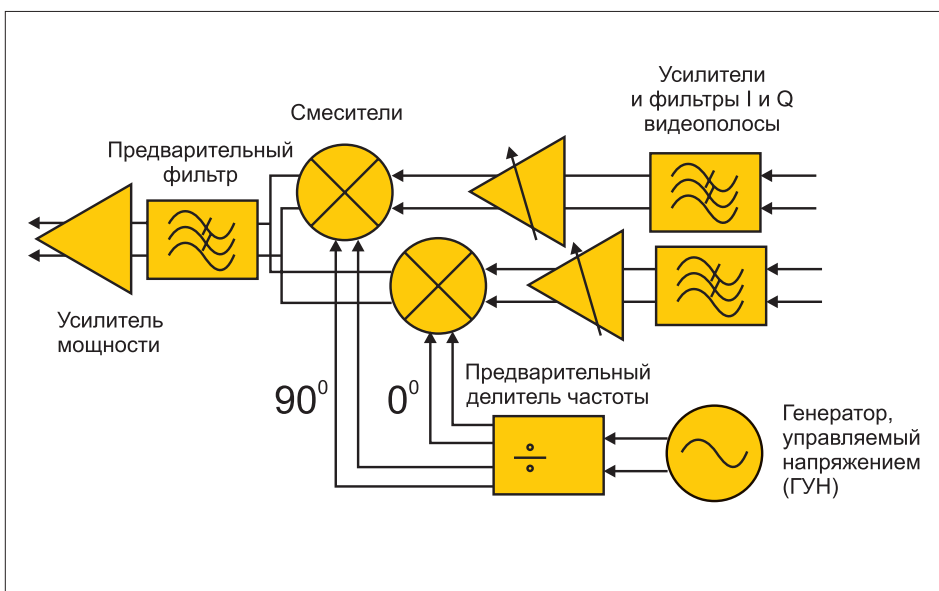


Рис. 1. Блок-схема передатчика

Все перечисленные выше методы моделирования являются в большинстве случаев быстрыми и эффективными, вследствие чего должны вызывать повышенный интерес у проектировщиков радиочастотных интегральных схем, по-прежнему пользующихся традиционными средствами моделирования во временной области.

Передатчик с прямым преобразованием (рис. 1) состоит из генератора, управляемого напряжением (ГУН или VCO), и предварительного делителя частоты, предназначенных для генерирования дифференциальных квадратурных сигналов гетеродина (Local Oscillator — LO), возбуждающих смесители I и Q. Аналоговые широкополосные перестраиваемые фильтры и усилители группового спектра, а также усилитель мощности (относительно небольшой) встроены в чип.

История вопроса

Предположим, что в рамках данного процесса проектирования системотехник выполнил высокоуровневое проектирование с использованием поведенческих моделей и передал приблизительные спецификации для каждого блока проектировщику радиочастотных интегральных схем. У проектировщика RFIC может иметься какой-либо существующий проект, который, возможно, используется в другом производственном процессе, работает в другом диапазоне частот, имеет слишком маленькую или слишком большую выходную мощность, либо недостаточно эффективен и т. д. Поэтому предположим, что этот конструктор начнет переделку каждого блока в своем проекте в соответствии с требованиями целевого производственного процесса. Для обеспечения основных функциональных возможностей проектировщику потребуется изменить проектное решение (главным образом, напряжения и токи смещения, а также размеры устройств) для каждого блока. После этого могут понадобиться дополнительные исследования и проектирование для обеспечения необходимого уровня рабочих характеристик каждого блока, а также для «анализа пространства проектных

параметров» в целях выявления возможностей для повышения рабочих характеристик при одновременном снижении стоимости (за счет уменьшения потребляемой мощности, экономии места и т. д.).

Во время проектирования необходимо найти ответы на целый ряд важных вопросов.

Будет ли ГУН генерировать колебания, и в каком диапазоне частот? Какова его характеристика управления частотой? Как обстоит дело с фазовым шумом? Как изменяются характеристики ГУН при изменении температуры? Имеет ли выходной сигнал предварительного делителя частоты достаточную мощность для возбуждения смесителя? Будет ли ГУН продолжать генерировать колебания после подключения к предварительному делителю частоты? Как зависит усиление преобразования смесителя от амплитуды сигнала гетеродина? Как улучшить IP3 (точку пересечения третьего порядка) смесителя? Как она изменяется в зависимости от тока смещения? Можно ли ее оптимизировать? Как смеситель искажает сигналы с модуляцией WLAN? Кроме того, необходимо найти ответы на те же вопросы и в отношении усилителя канала видеополосы и мощности.

Что касается эффективности, важно, чтобы на этапе предварительного проектирования используемые средства автоматизированного проектирования электронных устройств (EDA) позволяли проектировщикам легко свипировать, настраивать и оптимизировать параметры, которые оказывают непосредственное влияние на важные характеристики схем. Кроме того, важно, чтобы такие инструментальные средства позволяли проектировщикам получать четкие результаты моделирования и обладали необходимой гибкостью, давая возможность осмысления и четкого документирования полученных результатов.

Основная часть интересующих характеристик схемных узлов передатчика может быть рассчитана непосредственно по спектру частотной области, если блок управляется небольшим количеством синусоидальных частот. Поэтому имеет смысл использовать средства моделирования в частотной области при условии, что такие средства рассчитаны на работу со схемами подобной сложности, и мы хотели бы показать здесь, что средства моделирования в частотной области способны определять характеристики гораздо более сложных схем, чем можно было бы предположить. Средства моделирования в частотной области имеют дополнительное преимущество в том, что они могут работать с моделями частотных областей и данными измерений напрямую, не требуя генерирования какой-либо эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами.

Для моделирования сложных модулированных сигналов (например, сигналов WLAN, WCDMA и т. д.) в современных системах связи одного лишь моделирования в частотной области недостаточно (в связи с тем, что этот вид моделирования предназначается только для определения характеристик в установившемся режиме, а сложные модулированные сигналы могут произвольно изменяться во времени). Поэтому мы рассмотрим несколько различных способов моделирования таких модулированных сигналов.

Применение моделирования в частотной области при проектировании ГУН

Двумя важными начальными характеристиками проектирования ГУН являются определение диапазона резонансных частот настраиваемого резонатора и ответ на вопрос, будет ли схема генерировать колебания.

Можно начать с резонансного контура, включая варакторные диоды и идеальную катушку индуктивности вместо спиральной. Моделирование S-параметров в частотной области с изменением напряжения настройки в качестве параметра позволит узнать диапазон настройки резонатора. Регулировка величины индуктивности и размера варакторных диодов должна дать возможность установить диапазон настройки резонатора. После того как вы получите резонатор, работающий в требуемом диапазоне настройки, необходимо заменить идеальную катушку индуктивности планарной спиралью с той же номинальной индук-

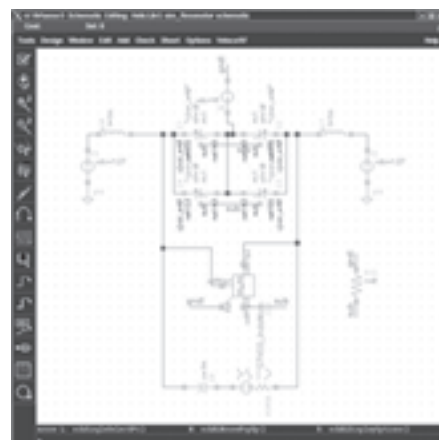


Рис. 2. Моделирование характеристик резонатора в зависимости от напряжения смещения, повторное использование результатов электромагнитной имитации для моделирования спиральной индуктора

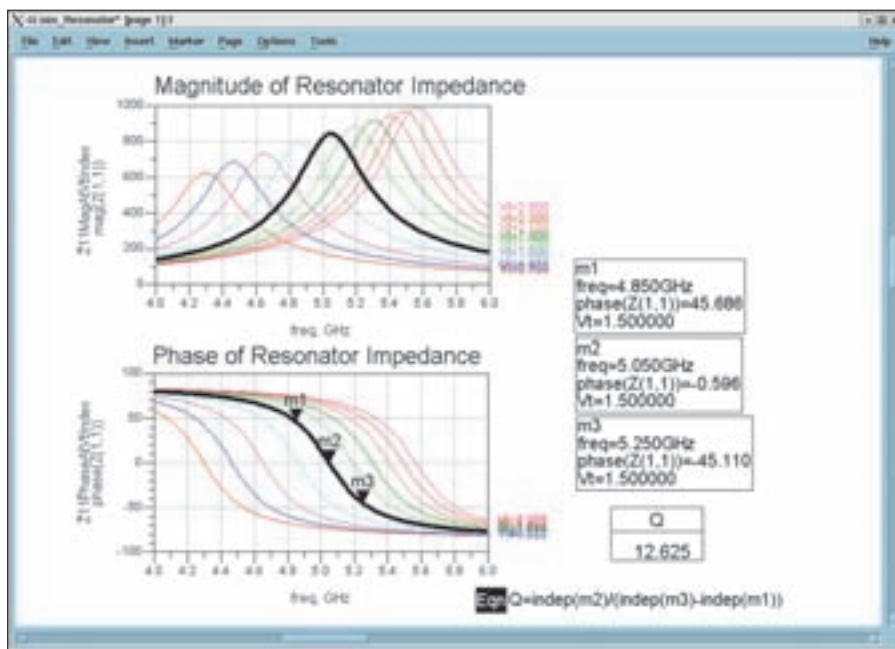


Рис. 3. Частотная характеристика резонатора при изменении напряжения настройки в качестве параметра. Величина Q вычисляется по маркерам

тивностью. (Для синтеза спиральных катушек с нужной величиной индуктивности можно воспользоваться инструментальным средством VelocERF от компании Helic.) Для моделирования спирального индуктора и создания точной модели частотной области, которая может применяться во всех последующих операциях моделирования ГУН, можно использовать какое-либо планарное электромагнитное решающее устройство. Схема моделирования для тестирования диапазона настройки резонатора показана на рис. 2. На рис. 3 изображены частотная характеристика и диапазон настройки резонатора при изменении напряжения настройки в качестве параметра.

Что делать, если ГУН не генерирует колебания? Как использовать средства моделирования для выяснения причины и поиска путей решения проблемы? Одна часть задачи проектирования ГУН связана с резонатором, а вторая — с активной схемой, которая создает отрицательное сопротивление в определен-

ном диапазоне частот, который достаточно велик для того, чтобы компенсировать потери в резонаторе. Если средство моделирования указывает на то, что ГУН не будет генерировать колебания, то можно удалить резонатор, заменить его каким-либо испытательным сигналом, осуществлять изменение сигнала по частоте и амплитуде и использовать его для определения полного сопротивления резонатора. Если действительная часть полного сопротивления не является отрицательной или слишком мала, можно поэкспериментировать с регулировкой таких параметров, как ток смещения и размеры устройств, до тех пор, пока не будут соблюдены условия генерирования колебаний.

Когда вы получите работающий ГУН, важно убедиться в том, что он продолжает генерировать колебания после подключения к предварительному делителю частоты и в требуемом диапазоне частот. На рис. 4 показан выходной сигнал предварительного делителя частоты, воз-

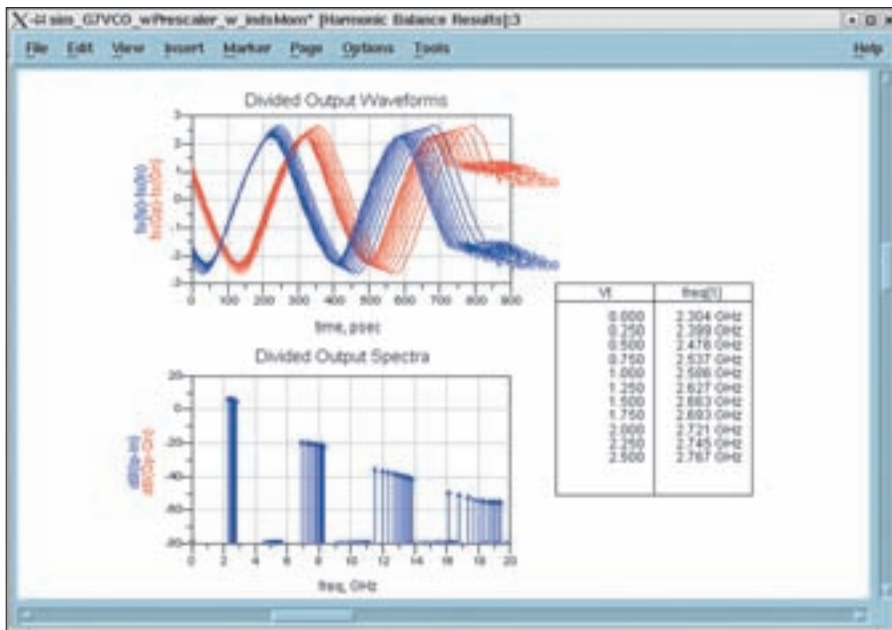


Рис. 4. Формы кривой и спектры выходного сигнала предварительного делителя частоты при изменении напряжения настройки в качестве параметра

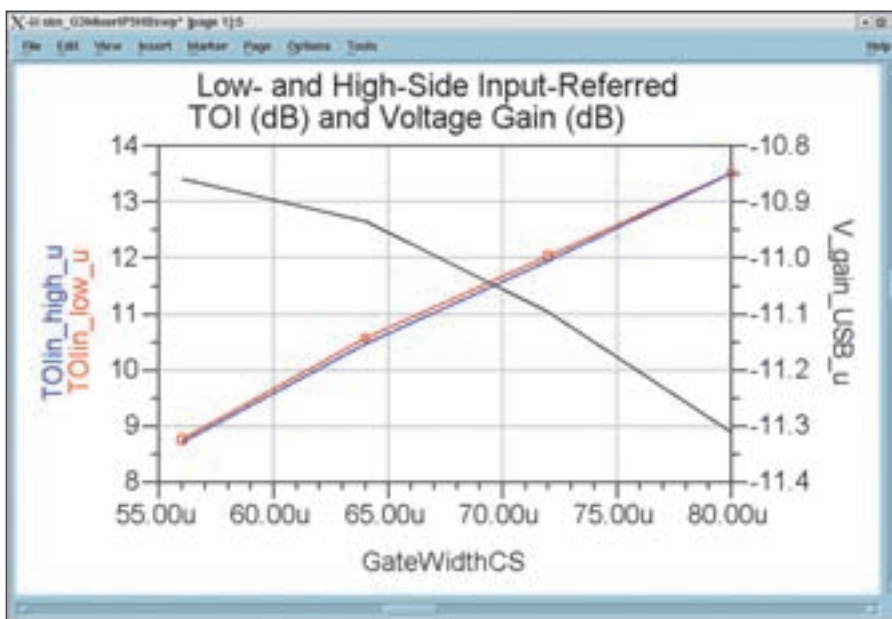


Рис. 5. Компромиссное соотношение между точкой пересечения третьего порядка (часто называемой IP3) и усилением преобразования напряжения в зависимости от длительности стробирующего импульса полевого транзистора

буждаемого ГУН в зависимости от напряжения настройки.

Чтобы убедиться в том, что сочетание ГУН и предварительного делителя частоты нормально работает при изменении температуры и условий производственных процессов, требуется какое-либо инструментальное средство, которое легко определяет характеристики ГУН и предварительных делителей частоты в зависимости от изменения параметров. Для такого вида моделирования с изменением параметров особенно хорошо подходят средства моделирования в частотной области (с учетом начального предположения на основании переходных процессов) при определении характеристик предварительных делителей частоты), которые позволяют наблюдать характеристики схемы в установленном режиме в зависимости от некоторого параметра. Это объясняется тем, что при изме-

нении параметров средство моделирования в частотной области использует характеристики схемы для значения качаемого параметра $n-1$ в качестве начального предположения для определения характеристик схемы для значения изменения параметра n . Характеристики определяются быстро и легко при условии, что они не изменяются слишком сильно относительно изменения значений качаемого параметра.

Применение моделирования в частотной области при проектировании смесителей

В системах с прямым преобразованием смесители обычно используются для преобразования РЧ-сигналов в модулирующие (в приемнике) и модулирующих сигналов в РЧ-сигналы (в передатчике). Такие характеристики смесителей, как,

например, усиление преобразования и IP3 (точка пересечения третьего порядка), могут вычисляться непосредственно по спектрам частотной области входных и выходных сигналов в установленном режиме. Чем больше отношение частоты выходного сигнала к частоте входного сигнала (а величина этого отношения может быть особенно большой для систем с прямым преобразованием, поскольку видеополоса является близкой к нулю по частоте), тем больше времени требуется для моделирования, если используется какое-либо средство моделирования исключительно во временной области, например SPICE. Это связано с тем, что при применении средства моделирования во временной области приходится использовать достаточно малую величину такта для дискретизации радиочастоты и ее гармоник, а также достаточно большое время остановки для захвата полного периода сигнала самой низкой частоты. При использовании средств моделирования в частотной области данная проблема с частотным коэффициентом не возникает, поскольку в этом случае время, необходимое для моделирования, не зависит от частоты сигналов.

Во время определения характеристик смесителей (и других блоков в проекте) и оптимизации их производительности полезно иметь возможность изменения и оптимизации параметров. При моделировании в частотной области можно составлять график зависимости рабочих характеристик, которые необходимо улучшить, от некоторого произвольного качаемого параметра, либо осуществлять оптимизацию напрямую. Таким образом, можно легко увидеть, например, зависимость усиления преобразования напряжения от амплитуды возбуждения гетеродина и определить необходимую величину выходной мощности предварительного делителя частоты. Кроме того, можно увидеть зависимость усиления преобразования от амплитуды входного сигнала, которая показывает, насколько высокой может быть мощность модулирующего сигнала, прежде чем характеристики нелинейных искажений станут неприемлемыми. На рис. 5 показано компромиссное соотношение между усилением преобразования напряжения и точкой пересечения третьего порядка по мере изменения длительности стробирующего импульса одного из устройств (которая определяет величину тока смещения).

При подобном плавном изменении параметров проектировщики должны хотя бы примерно представлять, какие из параметров оказывают наиболее сильное влияние на коэффициент усиления по напряжению и пересечение третьего порядка. Однако если такое изменение параметров может производиться быстро (в рассматриваемом случае установка четырех различных значений длительности импульса полевого транзистора и вычисление усиления преобразования и IP3 занимает всего 75 с), определить, какие параметры имеют значение, а какие нет, очень просто.

Оптимизация позволяет изменять несколько параметров одновременно при попытке улучшения различных рабочих характеристик. В данном случае мы устанавливали несколько различных величин длительности импульса полевого транзистора для одновременной максимизации усиления преобразования и IP3. Для проверки надежности оптимизатора начальные значения параметров были специально установ-

лены таким образом, чтобы рабочие характеристики были неудовлетворительными. Меньше чем за 25 минут оптимизатор улучшил точку IP3 примерно на 14 дБ и усиление преобразования напряжения более чем на 3 дБ.

Как блоки искажают сигналы беспроводной локальной сети (WLAN)

Характеристики и спецификации смесителей и других блоков традиционно определяются с помощью синусоидальных колебаний. Тем не менее синусоидальные характеристики (обычно это компрессия усиления и IP3) могут недостаточно точно предсказывать ухудшение рабочих характеристик, вносимое каждым блоком при обработке комплексных модулированных сигналов. Для выполнения подобного моделирования требуется следующее:

- возможность математической обработки процесса генерации сигналов;
- возможность преобразования этих сигналов в нестационарные сигналы, с которыми способно работать средство моделирования на уровне транзисторов;
- средство смешанного моделирования в частотной и временной областях для эффективной обработки как высокочастотных РЧ-сигналов, так и относительно медленно изменяющихся модулирующих сигналов;
- возможность быстрой характеристики поведения схем и создания моделей, которые могут имитироваться гораздо эффективнее, чем схемы на уровне транзисторов;
- готовые шаблоны для отображения результатов, такие как шаблоны EVM, спектра, пиковой и средней мощности, звездные диаграммы и т. д.

Инструментальные средства, применяемые для моделирования сигналов беспроводной локальной сети (WLAN), основываются на использовании имитатора Ptolemy, разработанного Калифорнийским университетом в Беркли (обработка числовых данных), моделировании по двум источникам входных данных (которое предусматривает одновременное выполнение обработки числовых данных и моделирование на уровне транзисторов и функциональном уровне), применении технологии огибающей модулирующего сигнала (для смешанного моделирования в частотной и временной областях), автоматическом проверочном моделировании (для быстрого создания моделей по результатам моделирования в частотной области с автоматическим изменением мощности) и отображении данных. Все перечисленные возможности были объединены в «испытательный стенд для беспроводной связи» (Wireless Test Bench), поэтому для получения значимых результатов совершенно не обязательно быть крупным специалистом в области всех инструментальных средств и технологий, на которых основывается рассматриваемое решение.

На рис. 6 изображен спектр выходного сигнала смесителя, а также показано, что требование к спектральной маске WLAN соблюдено.

Применение моделирования в частотной области и WTB для канала видеополосы

Моделирование аналоговых цепей видеополосы традиционно осуществлялось с помощью

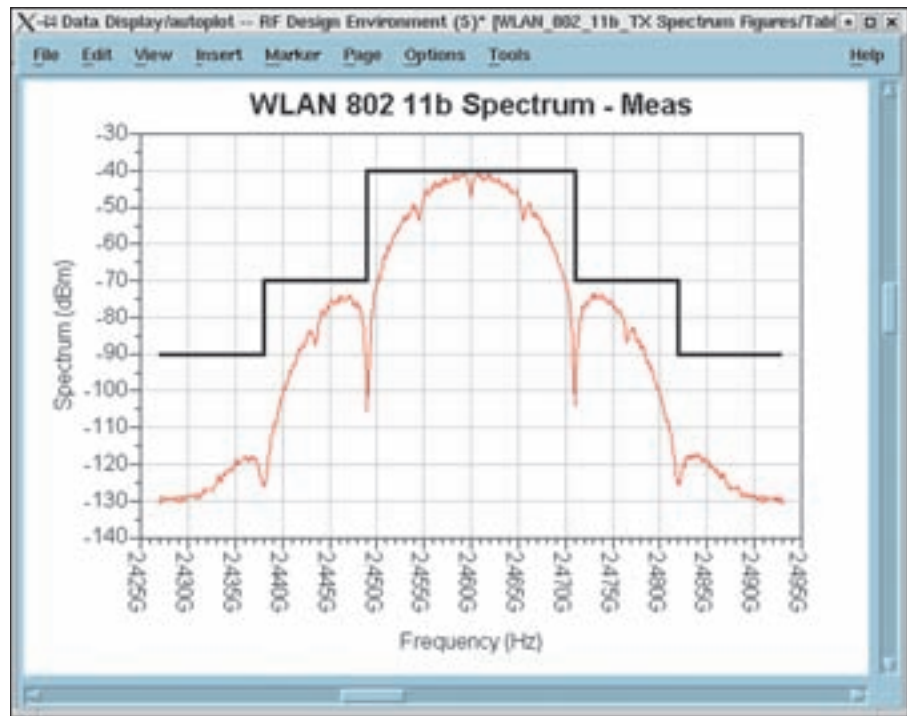


Рис. 6. Спектр выходного сигнала смесителя для входного сигнала стандарта 802.11b

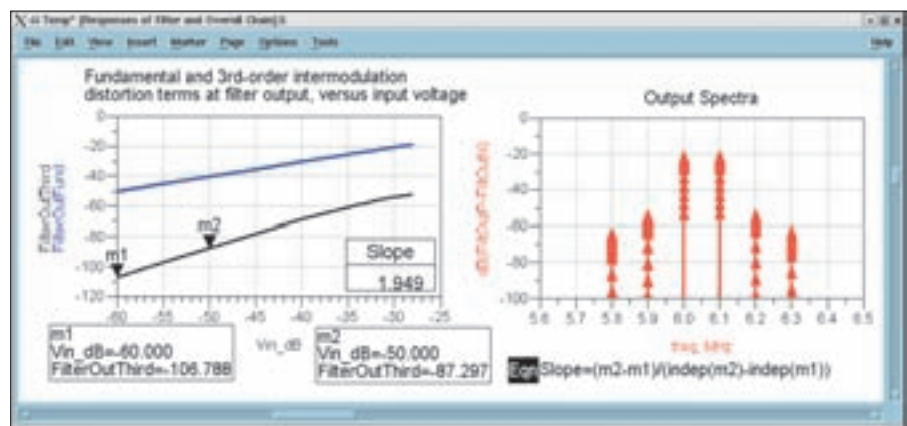


Рис. 7. Основной выходной сигнал и выходной сигнал интермодуляционных искажений фильтра группового спектра

средств моделирования во временной области, таких как SPICE. Тем не менее не существует причин, по которым в данном случае нельзя применять моделирование в частотной области. Для цепей видеополосы в частотной области могут применяться те же самые виды моделирования усиления и IP3, но только без преобразования частоты.

Авторами была предпринята попытка определения характеристик нелинейности (точки IP3) канала видеополосы (фильтра Gm-C [1] и усилителя с регулируемым коэффициентом усиления). Тем не менее, из-за своих особенностей этот фильтр не имеет традиционной нелинейности третьего порядка. Это можно увидеть при проведении двухчастотного моделирования с плавным изменением амплитуды и построении графика зависимости основных частот и частот интермодуляционных искажений третьего порядка от амплитуды входного сигнала, как показано на рис. 7.

Крутизна повышения характеристики тонового интермодуляционных искажений меньше углового коэффициента «3 к 1», а, значит, вычислить точку IP3 нельзя. В этом случае для того,

чтобы увидеть степень искажения модулирующих сигналов каналом видеополосы, лучше применять моделирование с использованием «испытательного стенда для беспроводной связи». Применение данной методики показывает, что характеристика EVM, вносимая каналом группового спектра, сильно зависит от ширины полосы фильтра, и если последняя уже, чем требуется, даже всего на несколько МГц, то характеристика EVM стремительно ухудшается до неприемлемого уровня (от 15 до 25%).

Моделирование усилителя мощности

В связи с ограниченностью места в статье кратко рассматривается только несколько вопросов, связанных с моделированием усилителя мощности. В этом проекте усилитель мощности интегрирован с остальной частью трансивера и предназначается для применения в беспроводных локальных сетях (стандарта 802.11b) с относительно низкой выходной мощностью. Плавное изменение параметров и быстрое моделирование в частотной области позволяют

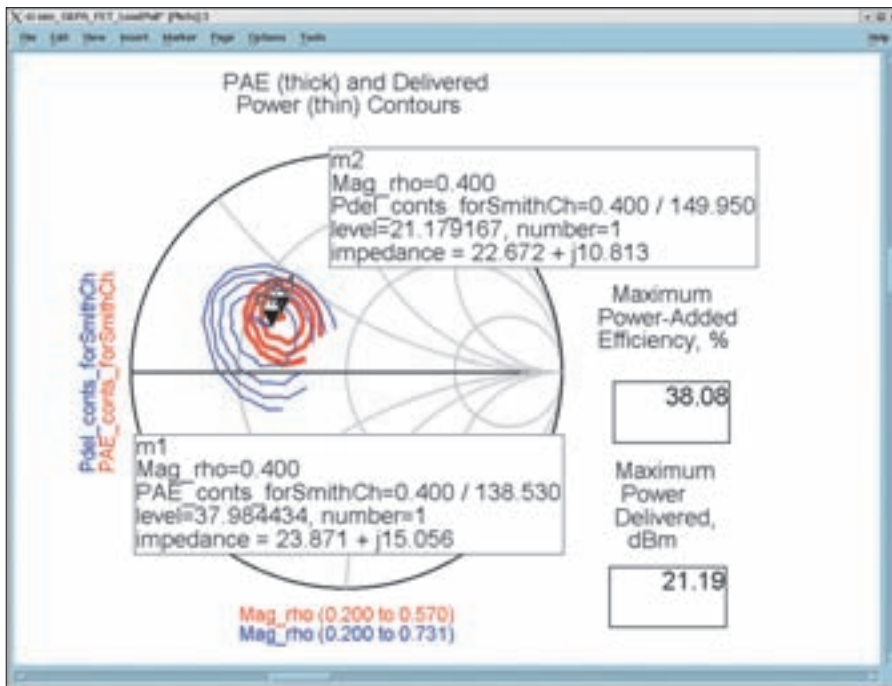


Рис. 8. Результаты моделирования согласования нагрузки

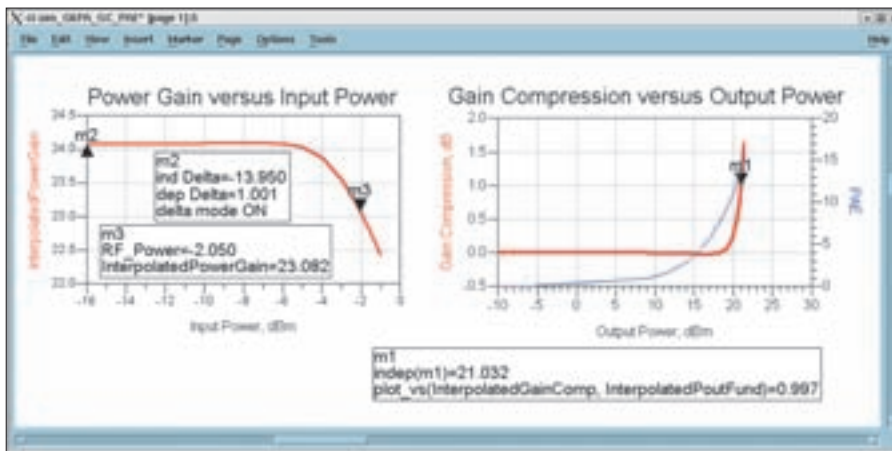


Рис. 9. Результаты однотонового моделирования с изменением мощности извлеченной модели усилителя мощности. Выходная мощность в точке компрессии 1 дБ составляет 21,03 дБм

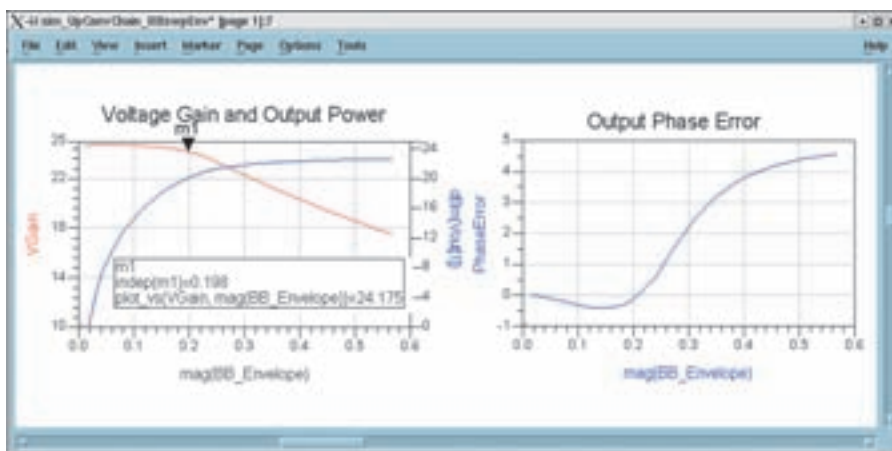


Рис. 10. Фазовая погрешность и нелинейные искажения усилителя при изменении амплитуд модулирующего сигнала I и Q

эффективно моделировать согласование нагрузки и источников активных устройств, которое должно показывать оптимальные величины полного сопротивления согласования нагрузки и источников (и величины гармонического полного сопротивления в случае необходимос-

ти) для максимизации отдаваемой мощности и КПД суммирования мощности. На рис. 8 показаны результаты моделирования согласования нагрузки для одного из полевых транзисторов, используемых в выходном каскаде усилителя мощности.

После того как вы узнали оптимальные величины полного сопротивления, скорее всего, для достижения таких величин потребуются спиральные индукторы. Как указано выше, электромагнитное моделирование плоских спиральных структур позволяет создавать высокоточные модели, которые могут очень эффективно имитироваться в частотной области. В этом случае однотоновое моделирование с изменением мощности за пределами точки нелинейных искажений 3 дБ занимает всего 5 с, а двухтоновое моделирование с изменением мощности точки IP3 — всего 30 с.

Следующим шагом является создание извлеченной модели усилителя, имеющего свыше 250 000 паразитных элементов (включая 754 нелинейных), с помощью инструментального средства Cadence AssuraRF. При использовании того же самого имитатора гармонического баланса в частотной области, который был описан выше, для проведения однотонового моделирования с изменением мощности этой извлеченной модели до уровня за пределами точки нелинейных искажений 1,5 дБ требуется около 2 ч 38 мин. Это свидетельствует о том, что имитаторы гармонического баланса способны работать с очень большими схемами. Результаты подобного моделирования извлеченной модели показаны на рис. 9. Для определения максимальной входной мощности, которая могла бы подаваться при условии соблюдения требований к спектральной маске выходного сигнала, было проведено моделирование усилителя (но не извлеченной модели) с использованием «испытательного стенда для беспроводной связи», что потребовало около 40 с.

Моделирование всего передатчика целиком

Заключительное испытание — это проверка рабочих характеристик всего проекта передатчика. Описанные ниже испытания проводятся с моделированием всех блоков на уровне транзисторов.

Первое моделирование представляет собой медленное изменение амплитуд модулирующего сигнала I и Q на входах в каналы видеополосы I и Q. В идеале амплитуда сигнала на выходе усилителя мощности должна линейно следовать за модулем вектора, создаваемого комбинацией входов I и Q. Любое отклонение линейности амплитуды и изменение фазы выходного сигнала будет считаться искажением. Можно проверять усиление по напряжению и изменение фазы в различных точках передатчика, чтобы увидеть, в каком месте вносятся искажения. Или просто следить за тем, чтобы амплитуды модулирующего сигнала находились ниже уровней, на которых искажение фазы и амплитуды выходного сигнала становится недопустимо большим. Это крупномасштабное моделирование, и его схема включает почти 3500 устройств, из которых более 1500 являются нелинейными, но оно занимает всего 8 мин 20 с после проведения разового моделирования продолжительностью 6 мин 8 с для определения начальных предположений. Результаты моделирования показаны на рис. 10 и свидетельствуют о том, что если модуль вектора, построенного по модулиру-

ющим сигналам I и Q, составляет менее 0,25, нелинейность амплитудной характеристики и фазовая погрешность являются достаточно небольшими.

Также можно одновременно изменять амплитуды и фазы модулирующих сигналов I и Q, чтобы результирующая амплитуда и фаза выходного сигнала усилителя изменялись по спирали. На рис. 11 показаны спираль на входе каналов группового спектра (с меткой «IF», даже несмотря на отсутствие смещения частоты) слева и спираль на выходе усилителя мощности справа. Обратите внимание на то, что спираль уже демонстрирует нелинейные искажения еще до какой-либо обработки РЧ. Это позволяет получить быстрый способ проверки того, насколько хорошо многочисленные комбинации модулирующих сигналов I и Q соответствуют выходному РЧ-сигналу. Время, необходимое для моделирования, зависит от разрешения создаваемой спирали. Например, для создания спирали с крупным шагом, показанной на рис. 12, потребовалось всего около 10 мин.

Для проверки двухполосной модуляции используются входные сигналы I и Q в виде синфазных синусоид с частотой 1 МГц. ГУН устанавливается на частоту, близкую к 5 ГГц, что дает гетеродину около 2,5 ГГц. Таким образом, выходной сигнал усилителя мощности имеет двухполосный спектр, центрированный вокруг частоты гетеродина. Амплитуды модулирующих синусоид могут качаться, демонстрируя соответствующее увеличение интермодуляционных искажений. Это моделирование занимает 1 ч 19 мин, что немного дольше описанных выше более простых проверок точности модуляции. Результаты моделирования показаны на рис. 13.

В качестве заключительного испытания передатчика на уровне транзисторов с помощью имитатора Ptolemy были генерированы модулирующие сигналы беспроводной локальной сети I и Q во временной области. Эти сигналы были переданы в модель передатчика из некоторого набора данных и использовались для возбуждения каналов группового спектра I и Q. На проведение этого моделирования потребовалось почти 10 ч для 666 символов. Такое моделирование занимает много времени, но его можно выполнять в ночное время. По результатам моделирования нам удалось увидеть график траектории выходного сигнала и мощность, а также узнать, соблюдаются ли требования к спектральной маске, как показано на рис. 14.

Заключение

Проектирование беспроводных трансиверов требует использования многочисленных методов и возможностей моделирования, которые часто намного превышают возможности традиционных средств моделирования во временной области, таких как, например, SPICE. В последние годы возможности средств моделирования в частотной области и смешанного моделирования в частотной и временной областях значительно повысились, что показывают представленные в настоящей статье данные о моделировании. Если вы работаете

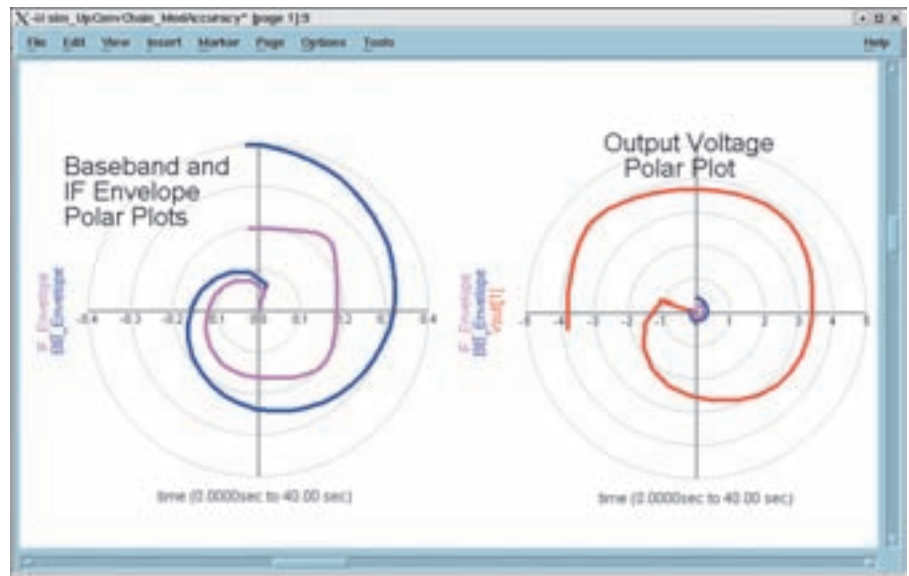


Рис. 11. Проверка точности модулирования передатчика путем изменения амплитуды и фазы входных модулирующих сигналов I и Q для проверки спирали во всем диапазоне. Спираль справа представляет собой выходной сигнал усилителя



Рис. 12. Искажение коэффициента усиления по напряжению и фазовая погрешность выходного сигнала на выходе усилителя мощности при спиральной характеристике входного модулирующего сигнала

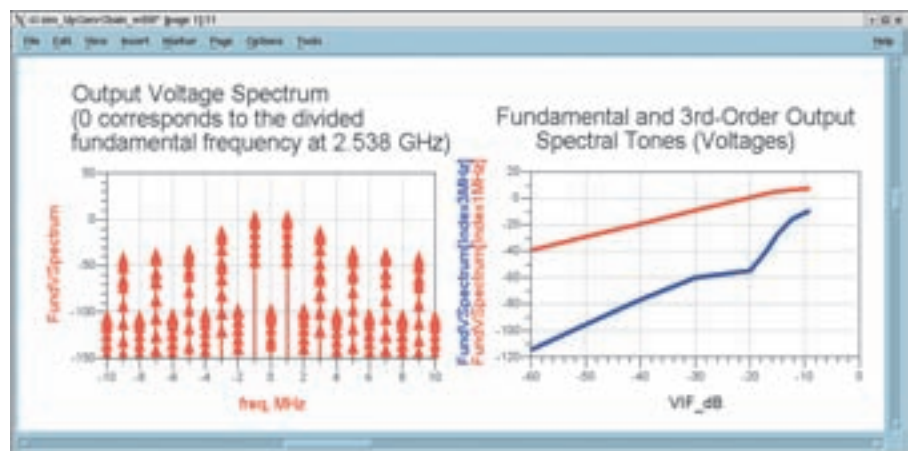


Рис. 13. Искажения на выходе усилителя при проведении моделирования двухполосной модуляции с изменением

в данной области в качестве конструктора РЧ-устройств, возможно, опробование указанных методов моделирования при проектировании будет стоить затраченного времени.

Дополнительную информацию об RFDE (среде радиочастотного проектирования Radio Frequency Design Environment, инструментальных средствах моделирования и отображения

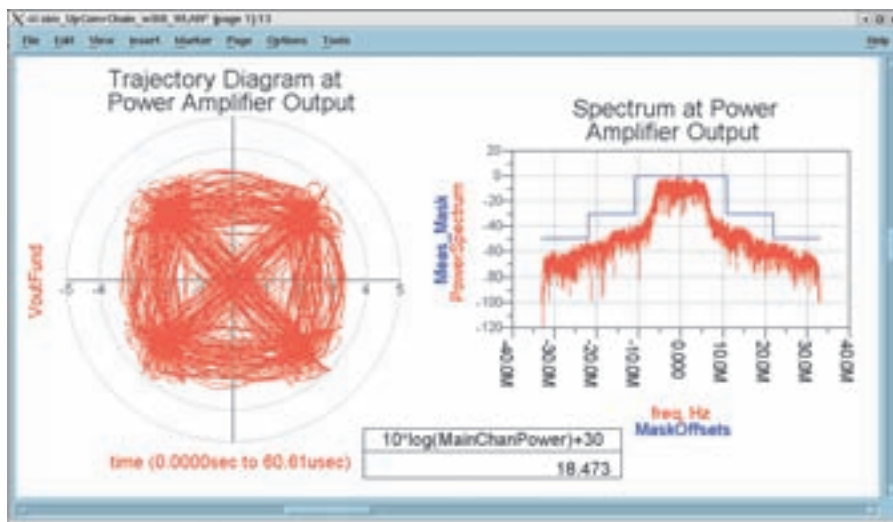


Рис. 14. Спектр выходного сигнала и графики траекторий для модулирующих входных сигналов I и Q беспроводной локальной сети

данных, доступных в среде проектирования Cadence Virtuoso Analog Design Environment) и испытательных стендах для беспроводной связи (являющихся частью RFDE) можно найти в Интернете по следующим адресам: <http://eesof.tm.agilent.com/products/rfde.html> и <http://eesof.tm.agilent.com/docs/rfdoc2004A/rfdemanuals/rfdewtbsim.html>.

База данных по проектированию передатчиков (включая топологию) и результаты моделирования, рассматриваемые в настоящей статье (а также результаты, не включенные в нее), будут доступны позднее. **Б**

Литература

1. Tsividis Y. P., Voorman J. O. Integrated Continuous-Time Filters, Principles, Design, and Applications. IEEE Press. 1993.