

Стивен Маас

Нелинейный анализ в СВЧ проектировании

Нелинейный анализ электронных схем представляет собой важную часть современного автоматизированного проектирования. Действительно, без него не были бы возможны современные разработки в области цифровой техники, а достижения в системах связи хотя и в меньшей степени, но также обязаны аналитическому инструментарию, реализованному на базе компьютеров. Ведь в системах связи этот анализ дает возможность разработчику оценивать влияние нелинейных искажений на различные характеристики системы.

Важность нелинейного анализа невозможно переоценить. Новые типы систем связи весьма чувствительны к различного рода искажениям. Помехи, являющиеся результатом интермодуляционных искажений (ИМ), представляют собой фундаментальный предел, накладывающий ограничения на характеристики различных военных и коммерческих космических систем связи, а также главный источник проблем в системах беспроводной мобильной связи. Кроме того, необходимость в хороших, "чистых" смесителях и усилителях в обычных СВЧ системах со временем никак не уменьшилась.

По мере роста важности компьютерного анализа систем увеличивалось число программ, предлагающих нелинейный схемотехнический анализ. Всего лишь несколько лет назад единственной возможностью нелинейного анализа была система SPICE и ее модификации, сейчас пользователь имеет широкий выбор разнообразных программ (в широком диапазоне цен), предлагающих анализ во временной области, а также методы гармонического баланса и рядов Вольтерра. В этой статье мы обсудим их достоинства и недостатки, проанализируем их работу, дадим рекомендации по их оптимальному использованию.

Что имеем?

Начиная с момента своего создания в Калифорнийском университете в Беркли в середине 1970-ых, SPICE [1] был основополагающим компонентом анализа схем в электронной промышленности. С того момента, как система SPICE стала достоянием широкой общественности, различные компании по разработке программного обеспечения переносили ее на популярные платформы DOS и Macintosh, добавляли средства текстового и графического ввода описаний схем и вывода результатов анализа. Однако, под изящной оболочкой графических интерфейсов скрывался один и тот же "движок", говоря обычным языком, это были реализации SPICE2. Затем в Беркли разработали собственную версию симулятора следующего поколения, так называемую SPICE3, полностью переделанную программу, которая дала старт развитию новых коммерческих продуктов. Вы можете приобрести один из них или даже получить вашу собственную копию исходных кодов программы в Industrial Liaison Office отдела Berkeley Computer Science Dept.

Более современным дополнением к этому продукту является симулятор методом гармонического баланса (НВ). Как и ранее, один из первых симуляторов НВ был разработан в Калифорнийском университете в Беркли [2], но благодаря работам Sarnoff Lab. и Университета Bologna [3] в Италии, был разработан способ введения его в состав наиболее распространенных программ ведущих производителей, в том числе, в состав последней версии симулятора VoltaireXL производств компании APPLIED WAVE RESEARCH.

Основное назначение программ на

основе метода гармонического баланса — проектирование СВЧ схем. В этих симуляторах модели высокочастотных устройств и схемотехнических элементов представлены недостаточно широко, и именно по этой причине среди разработчиков СВЧ систем прозвучивает некоторая степень разочарования ими. Факт этот весьма печален, потому что именно НВ симуляторы могут предложить СВЧ разработчику большие преимущества. В то же самое время многие проблемы применения метода гармонического баланса до сих пор остаются нерешенными. Мы рассмотрим эти проблемы несколько позже.

Третий продукт, который мы рассматриваем, — симулятор Вольтерра [4]. Метод анализа на основе рядов Вольтерра был разработан и программно реализован несколько раньше, чем метод гармонического баланса и система SPICE. К сожалению, анализ рядов Вольтерра никогда не был понят, потому что этот метод работает хорошо как раз для тех типов задач, с которыми не мог справиться метод гармонического баланса. Таким образом, методы гармонического баланса и рядов Вольтерра почти идеально дополняют друг друга и позволяют охватить больший объем проектных задач.

Анализ во временной области

Система SPICE осуществляет моделирование главным образом линейных электронных схем. Она также позволяет выполнить анализ нелинейных схем во временной области, который в документации SPICE назван анализом переходных процессов. Чтобы анализировать нелинейные схемы, SPICE строит уравнения

схемы в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, записанных в форме матрицы, и интегрирует их во временной области (рис. 1).



Рис. 1. Анализ во временной области. Напряжения в узлах схемы определяются в виде последовательности отсчетов в дискретные моменты времени t_n , полученных в результате численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений

Чтобы провести интегрирование, система SPICE должна многократно получить решение в каждом из многих последовательных интервалов времени. Для сравнительно сложных схем это продолжительный процесс, поэтому считается, что анализ переходных процессов — достаточно медленный метод.

Уже это простое описание иллюстрирует самую большую проблему использования системы SPICE для анализа СВЧ схем: как описать дисперсионные линии передачи с потерями и другие элементы схемы с распределенными параметрами во временной области? Схема, анализируемая системой SPICE, может включать идеальные линии передачи, но не может содержать что-либо более сложное (некоторые компании все же делали попытки модифицировать SPICE с целью реализации более сложных моделей линий передачи). Вторая проблема — необходимость интегрирования длительных переходных характеристик для получения решения в установленном режиме. Особенно эта проблема проявляется в высокочастотных схемах, имеющих большие постоянные времени. Версия SPICE2 не позволяет решить ее, но версия SPICE3

уже включает некоторые функции, призванные минимизировать время анализа. В заключение отметим, что SPICE прерывает анализ, если схема содержит контуры из конденсаторов и источников напряжения или сечения катушек индуктивности и источников тока, а СВЧ фильтры и схемы согласования имеют именно такие структуры.

В то же время система SPICE почти идеальна для анализа логических и переключательных схем. Она позволяет моделировать широкий выбор нелинейных устройств, схем и явлений. Так, например, SPICE может быть использован (хотя иногда с некоторыми трудностями) при разработке генераторов, в то время как метод гармонического баланса с этой задачей не справляется.

Гармонический баланс

Метод гармонического баланса делит анализируемую схему на две части: линейную подсхему, содержащую все линейные элементы, и нелинейную, содержащую только нелинейные элементы. Обе подсхемы связаны между собой множеством портов. Рис. 2 наглядно иллюстрирует это разделение.

Напряжения в этих портах соединения на нулевой частоте, фундаментальной частоте и ее гармониках рассматриваются как переменные. В процессе расчета методом гармонического баланса итерационно находится такой набор этих напряжений, который удовлетворяет системе линейных уравнений линейной подсхемы (обычно это многовходовая матрица полных проводимостей), и системе нелинейных уравнений, описывающей нелинейную подсхему. Система линейных уравнений легко решается в частотной области, но нелинейные уравнения должны быть решены во временной области. Величины в частотной и временной областях связаны между собой преобразованием Фурье.

Здесь проницательный читатель может выделить следующие проблемы:

1. Итерационный процесс поиска

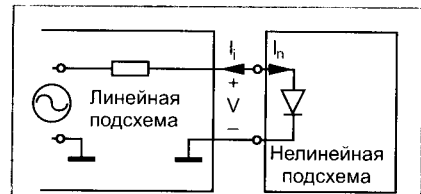


Рис. 2. Метод гармонического баланса. Нелинейная схема разделяется на линейную и нелинейную подсхемы. Напряжения в портах соединения представляют собой переменные, и, чтобы получить их значения, симулятор гармонического баланса многократно решает систему уравнений схемы. По значениям токов через порты подсхем можно судить о правильности полученного решения: если оно правильное, токи в нелинейной и линейной подсхемах должны удовлетворять закону Кирхгофа для токов

решения не имеет никакой гарантии успеха. Диагноз "отсутствие сходимости" является настоящим проклятием для всех пользователей НВ симуляторов.

2. Если имеется только одна частота возбуждения, все прекрасно. Однако, как провести преобразование между частотной и временной областями, если используются две частоты (например, в двучастотном анализе интермодуляционных искажений)? Прямое и обратное преобразование Фурье для таких "несоразмерных" частот существуют, но они работают не как классические одночастотные преобразования Фурье.

3. Преобразования Фурье (особенно если их использовали для двучастотного анализа интермодуляционных искажений) имеют ограниченный числовой диапазон. Слабые интермодуляционные составляющие часто теряются в числовом шуме преобразования Фурье.

4. Не совсем очевидный из всего вышесказанного факт — каждая итерация процесса поиска решения требует инверсии огромной матрицы. По этой причине анализ методом гармонического баланса, как правило, очень медленный; для эффективного анализа большой схемы потребуется большой объем памяти и процессор высокой производительности.

Несмотря на все эти проблемы, и частично из-за агрессивного маркетинга, НВ симуляторы стали наиболее популярными инструментами для анализа нелинейных СВЧ схем, и сейчас завоевывают область ВЧ проектирования.

Метод анализа на основе рядов Вольтерра

Анализ на основе рядов Вольтерра может быть описан как метод возмущений: высокочастотный сигнал рассматривается как слабое возмущение постоянного напряжения смещения в каждом узле схемы. Это почти не отличается от анализа линейных эквивалентных схем, с которыми мы уже знакомы. Например, проводимость g_d смещенного диодного перехода равна:

$$g_d = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}}, \quad (1)$$

где V_d — напряжение перехода, I_d — ток, и V_{bias} — напряжение смещения. Отсюда, ток перехода i_d при возбуждении малым высокочастотным сигналом равен:

$$i_d = g_d v_d = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}} v_d, \quad (2)$$

где v_d — напряжение перехода при малом сигнале.

Здесь это не что иное как линейный отклик диода. Равенство (2) может рассматриваться как первый член разложения в ряд Тейлора нелинейного тока утечки:

$$i_d = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d=V_{bias}} v_d + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 I_D}{dV_d^2} \right|_{V_d=V_{bias}} v_d^2 + \frac{1}{6} \left. \frac{d^3 I_D}{dV_d^3} \right|_{V_d=V_{bias}} v_d^3 + \dots, \quad (3)$$

где очевидно нелинейные члены v_d^2 и v_d^3 определяют искажения в устройстве. Основу анализа рядов Вольтерра составляет рекуррентный метод вычисления составляющих тока, соответствующих каждому члену разложения, непосредственно в частотной области (рис. 3).

С этими токами обращаются, как с входными сигналами линейной схемы, а значит должен быть выполнен только линейный анализ схем! По этой причине метод на основе рядов Вольтерра намного быстрее или чем методы гармонического баланса, или анализа во временной области. Кроме того, не используется никаких преобразований Фурье, поэтому числовой диапазон ограничен только точностью вычислительной машины, и этим методом могут быть рассчитаны очень низкие уровни интермодуляционных составляющих.

Замечательная эффективность метода рядов Вольтерра имеет свою цену, о чем свидетельствует выражение (3): ряд Тейлора точен только для малых отклонений напряжения вблизи точки смещения. Если сигнал слишком большой, точность метода падает. Анализ на основе рядов Вольтерра полезен только для слабо нелинейных схем или схем, работающих значительно ниже насыщения. Однако, он хорошо подходит для анализа интермодуляционных искажений, а большинство СВЧ инженеров находит вычисление уровней интермодуляционных составляющих весьма полезным.

Пакет VoltaireXL для Windows производства компании APPLIED WAVE RESEARCH — наиболее передовой симулятор на основе рядов Вольтерра на настоящий момент. И хотя анализ искажений в SPICE по сути представляет собой разновидность анализа Вольтерра, он применим только для диодов и биполярных транзисторов, а из-за низкого уровня описания моделей устройств имеет низкую точность.

Модели устройств

Нелинейный анализ схемы — всего лишь половина задачи. Анализ какой-либо схемы без построения точной модели твердотельного устройства подобен покраске ржавого автомобиля без предварительной чистки: результаты вроде бы получены, но совсем не те, которые ожидалось.

Система SPICE существует уже достаточно долго, поэтому на настоящий момент доступны обширные биб-

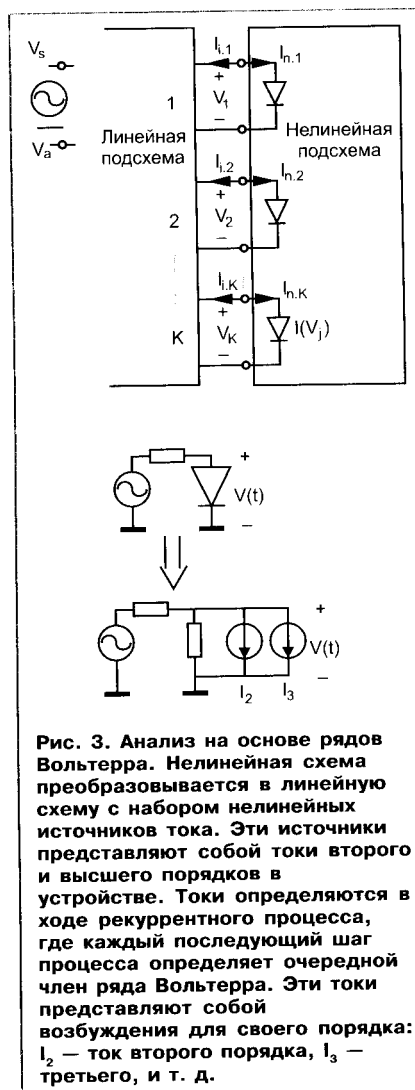


Рис. 3. Анализ на основе рядов Вольтерра. Нелинейная схема преобразовывается в линейную схему с набором нелинейных источников тока. Эти источники представляют собой токи второго и высшего порядков в устройстве. Токи определяются в ходе рекуррентного процесса, где каждый последующий шаг процесса определяет очередной член ряда Вольтерра. Эти токи представляют собой возбуждения для своего порядка: I_2 — ток второго порядка, I_3 — третьего, и т. д.

лиотеки коммерческих устройств. Они создают у пользователя иллюзию, что проблема моделирования уже решена и достаточно найти нужную библиотеку, чтобы получить приемлемое решение. К сожалению, многие из этих моделей недостаточно точны, кроме того, имеется большой разброс параметров отдельных устройств, а многие модели в определенных системах просто неприменимы. Так, например, далеко не все модели транзисторов подходят для задачи вычисления искажений, а имеющаяся в системе SPICE модель биполярного транзистора для анализа искажений вообще непригодна.

В настоящее время ведется огромная работа в области построения

правильных моделей устройств, особенно полевых FET транзисторов для метода гармонического баланса. Большинство усилий моделирования направлено на одночастотные мощные схемы: усилители мощности, умножители частоты и т.п. Фактически все "защитные" модели FET транзисторов в НВ симуляторах не подходят для анализа интермодуляционных искажений. Биполярные модели для этой задачи развиты лучше, но все же они еще недостаточно совершенны. Модели диодов представлены здесь наиболее точно, но диоды используются прежде всего в смесителях, а симуляторы на основе метода гармонического баланса настолько неточны, что они являются бесполезными для интермодуляционного анализа смесителей. В то же время НВ симуляторы почти идеально подходят для расчета потерь преобразования смесителя.

Анализ на основе рядов Вольтерра предлагает самую легкую задачу моделирования [6] — [8]. Все, что необходимо для построения модели устройства для этого типа анализа — линейная эквивалентная схема и еще два параметра для каждого нелинейного элемента схемы: вторые и третьи производные, показанные в выражении (3). Это верно также для нелинейных конденсаторов и катушек индуктивности, в этом случае потребуется только знание кулон-вольтовой или вебер-амперной характеристики требуемых устройств и их производных. Производные могут быть найдены методом численного дифференцирования, а при слабой нелинейности устройства — непосредственным измерением.

Почему он не работает?

3 а время своей работы я наблюдал многих инженеров, которые успешно использовали SPICE, но получали плохие результаты, пользуясь методом гармонического баланса, настолько часто, что впадали в уныние и готовы были совсем отказаться от его использования. Это факт весьма печальный, потому что при правильном использовании описанные инструменты чрезвычайно ценны.

Компании — разработчики программного обеспечения — должны взять на себя часть вины за сложившуюся ситуацию. Долгие годы они считали, что инженер может обращаться с нелинейным анализом, не подходя к проблеме творчески: только обозначить задачу, перемолоть массу чисел и принять результаты. Линейные симуляторы более или менее терпимы к этой разновидности невежества, но нелинейные симуляторы не позволяют обходиться с собой так примитивно. Инженер должен постоянно осознавать, что он делает в данный момент времени.

Ниже приведен краткий список трудностей, возникающих при решении задач нелинейного анализа.

1. НВ симуляторы не могут решить все задачи, какие могут стоять перед вами. Они лучше всего справляются с анализом одночастотных мощных схем и расчетом потерь преобразования смесителей. В то же время они практически бесполезны для расчета интермодуляционных искажений смесителей и усилителей мощности, работающих в режиме насыщения, а также расчета точки компрессии смесителей. Достаточно хорошо симуляторы справляются с анализом интермодуляционных искажений для малосигнальных усилителей, но используемые модели устройств, скорее всего, неточны. Решением этой проблемы может стать введение пользовательской модели полевого транзистора.

2. Не забывайте, что ваши пользовательские модели должны правильно работать помимо основной частоты на ее гармониках, а также на нулевой частоте.

3. Для расчетов смесителей по возможности лучше использовать конверсионно-матричный анализ, а не двухчастотный метод гармонического баланса, так как он намного быстрее и точнее.

4. Не используйте число гармоник большее, чем вам необходимо. Для схем на полевых транзисторах достаточно учитывать четыре или пять гармоник, при условии, что устройство не находится в режиме глубокого насыщения. Диодные схемы могут требовать учета восьми гармоник из-за более сильных нелинейностей.

5. Если вы приступаете к новой задаче, начните с простейшего. Используйте только идеальные элементы (например, идеальный трансформатор вместо симметрирующего трансформатора), не учитывайте сложные схемы смещения и так далее. Когда основы вашего проекта будут заложены, начните заменять идеализированные элементы реальными, но не все сразу, а по одному. Попытка внести все сложные вещи в схему в самом начале процесса проектирования ставит перед вами слишком много переменных, что существенно затрудняет оптимизацию схемы.

6. Точность метода гармонического баланса приемлема для расчета выходных сигналов на основной частоте и нескольких ее гармониках. С ростом количества гармоник точность резко падает, поэтому попытка вычислить уровень пятой гармоники на выходе усилителя мощности будет безрезультатной.

7. Большинство продуктов нелинейных явлений (особенно интермодуляционные составляющие высоких порядков, паразитные продукты преобразования, гармоники) очень чувствительны к уровням подаваемых сигналов и параметрам схемы. Эта высокая чувствительность неизбежно снижает точность расчета. Не думайте, что сможете правильно посчитать уровень интермодуляционных составляющих пятого порядка или продукт преобразования высокого порядка смесителя, симуляторы здесь не помогут.

8. Имейте в виду, что метод гармонического баланса не подходит для анализа интермодуляционных искажений. Для этой задачи лучше всего воспользоваться методом на основе рядов Вольтерра.

Проблемы сходимости:

1. Убедитесь, что в схеме нет узлов, изолированных по постоянному току. Например, узел между двумя последовательно соединенными конденсаторами имеет неопределенное постоянное напряжение.

2. Определенные проблемы могут

возникнуть в процессе разделения схемы на линейные и нелинейные подсхемы. Часто, случается так, что часть линейной схемы остается "висящей в воздухе", а это приводит к получению неправильного численного результата. Проблема разрешается добавлением резисторов большого сопротивления (порядка 1 МОм) между узлами нелинейных элементов и землей.

3. Часто ошибки случаются в результате введения неправильных данных в описание модели устройств, поэтому такие модели могут просто не работать. Убедитесь, что ваша характеристика тока стока имеет значение равное нулю в точке отсечки и не имеет подъема левее ее. Проверьте значения крутизны характеристики и линейного усиления, полученные с помощью нелинейной модели, и убедитесь, что это согласуется с измеренными S- или Y-параметрами.

4. Проблемы сходимости чаще всего проявляются на высоких уровнях мощности. На практике полезнее и быстрее выполнить моделирование

схемы в некотором диапазоне уровней входных сигналов вместо всего одного большого шага. НВ симуляторы зачастую используют предыдущий результат расчета как начальные данные для всех последующих. Скорость сходимости метода при использовании многих маленьких шагов намного выше, чем при одном большом шаге от нулевого до заданного высокого уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.W. Nagel. *SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits*, Electron. Res. Lab., Univ. of California, Berkeley, Memo ERL-M520, May, 1975.
2. K.A. Kundert and A. Sangiovanni-Vincentelli. *Simulation of Nonlinear Circuits in the Frequency Domain*, IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. CAD-5, 1986, p. 521.
3. V. Rizzoli, A. Lipparini, and E. Marazzi. *A general-Purpose Program for Nonlinear Microwave Circuit Design*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-31, 1983, p. 762.

4. S.A. Maas. *A General-Purpose Computer Program for the Volterra-Series Analysis of Nonlinear Microwave Circuits*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1988, pp. 311-314.

5. S.A. Maas. *C/NL2 for Windows: Linear and Nonlinear Microwave Circuit Analysis and Optimization*, Artech House, Norwood, MA, 1993.

6. S.A. Maas. *Analysis and Optimization of Nonlinear Microwave Circuits by Volterra Series*, Microwave J., vol. 33, no. 4, April 1990, p. 245.

7. S.A. Maas. *How to Model Intermodulation Distortion*, Invited Paper, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1991, pp. 149-151.

8. S.A. Maas, D. Neilson. *Modeling GaAs MESFETs for Intermodulation Analysis*, Microwave J., vol. 34, no. 5, May 1991, pp. 295-300.

По материалам фирмы
APPLIED WAVE RESEARCH.

Перевод Ю. Потапова