

Новый подход к моделированию нелинейных устройств

Новый метод нелинейного анализа, разработанный компанией AWR Corporation и получивший название «адаптивный метод гармонического баланса» (Multi-Rate Harmonic Balance, MRHB), дает возможность моделировать СВЧ-схемы с несколькими входными воздействиями на разных частотах, что ранее было затруднено из-за высоких требований к вычислительным ресурсам.

Юрий Потапов

potapoff@eurointech.ru

С начала 80-х годов прошлого века метод гармонического баланса являлся ключевым инструментом для анализа нелинейных схем в частотной области. Современные программные продукты, такие как вычислительный модуль AWR APLAC, могут обрабатывать тысячи гармоник (частот анализа), число которых растет практически линейно с ростом количества элементов и узлов в схеме, а также частотных воздействий. Однако, если в большой схеме присутствует несколько источников сигналов, традиционный метод гармонического баланса начинает работать неэффективно из-за высоких требований к объему оперативной памяти. Чтобы решить данную проблему, компания AWR дополнила семейство частотных и временных вычислителей APLAC новым модулем, реализующим адаптивный метод гармонического баланса (MRHB). Эта новая технология снимает ограничения традиционного метода гармонического баланса, существенно повышает скорость анализа и снижает требования к вычислительным ресурсам при анализе широкополосных нелинейных устройств с многочастотным воздействием. Все это дает возможность выполнять за разумное время сквозное моделирование таких устройств, как трансиверы мобильных телефонов.

В конце 1980-х годов решения на основе метода гармонического баланса обогнали по возможностям программы, использующие в качестве вычислительного ядра алгоритм SPICE, и разработчики стали воспринимать их как абсолютно необходимые инструменты. Анализ переходных процессов по методу SPICE или аналогичным ему технологиям требовал слишком много времени при достижении решения для установившегося состояния, даже для простейших схем, включающих распределенные элементы. Трудность была связана с ограничением памяти для обеспечения сходимости. Ограничения анализа переходных процессов становились ярко выраженными, если требовалось промоделировать смеситель или иное СВЧ-устройство, выполняющее перенос сигнала из одного диапазона в другой. В терминах метода эти значительно отличающиеся по частоте сигналы получили названия тонов.

Использование мультитонального (многочастотного) анализа методом гармонического баланса сделало возможным проектирование приемников и передатчиков с применением САД-программ. Численные методы, использованные в первых реализациях анализа гармонического баланса, задействовали прямые матричные методы. Они были очень полезны для анализа установившегося режима в схемах из нескольких транзисторов, но в схемах с большим количеством нелинейных элементов плотные конверсионные матрицы требовали большого объема памяти и времени вычисления. По мере развития СВЧ-схем росло число используемых в них транзисторов, что в свою очередь сильно усложнило анализ методом гармонического баланса за счет большого количества нелинейных элементов и анализируемых частот, существенно увеличило время анализа, а также требования к объемам памяти.

Технология анализа методом гармонического баланса существенно улучшилась, когда в 1990-х годах в ней были применены численные методы, ориентированные на решение больших задач. Прямые матричные методы были дополнены итерационными методами, и простой метод итераций Ньютона был замещен так называемым неточным методом Ньютона. Большим шагом на пути моделирования нелинейных устройств стало использование, где это было возможно, продвинутой и оптимизированной технологии быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform, FFT).

В то время как метод гармонического баланса активно применялся в области нелинейного анализа установившегося режима схем с распределенными компонентами, стали очевидными его существенные ограничения. По мере роста числа тонов воздействия (независимых частот) число математических неизвестных, требуемых для поиска решения, росло в геометрической прогрессии. Геометрический рост происходил согласно тому факту, что каждый элемент схемы требовал анализа не только на частоте каждого тона и его кратных гармоник, но и на множестве их линейных комбинационных составляющих. В итоге получалось так, что, если пользователь

не мог ввести в вычислительное ядро гармонического баланса для каждого элемента разумное ограничение на число частотных комбинаций, то схема многократно анализировалась на похожих частотах. Для типичной схемы с мультитональным воздействием это означало, что большая часть процессорного времени тратилась на уточнение несущественных составляющих с малыми уровнями.

Число анализируемых частот становилось камнем преткновения при количестве тонов внешнего воздействия, превышающем три. Люди, специализирующиеся на численном моделировании, знали этот феномен и называли его «проклятием размерности». Чтобы понять этот феномен, достаточно обратиться к таблице 1, в которой показано, что случается в умеренно нелинейной схеме при росте числа тонов внешних воздействий. Даже при использовании дающего приемлемую точность метода усечения (стратегии выбора линейных комбинационных частот), а именно так называемого ромбического усечения (diamond truncation), рост числа анализируемых частот, а следовательно, и неизвестных, увеличивается на порядок для каждого дополнительного тона.

Таблица 1. Зависимость количества анализируемых частот от числа тонов внешнего воздействия

Число тонов	Ромбическое усечение	Прямоугольное усечение
1	6	6
2	31	61
3	116	666
4	341	7321
5	842	80 526

Основной концепции метода MRHB является допущение, что блоки СВЧ-системы (смесители, фильтры, усилители) модифицируют частотный спектр. Традиционный метод гармонического баланса предполагает, что все наиболее значимые части спектра будут одинаково воздействовать на все элементы или блоки схемы. В противоположность этому метод MRHB позволяет разработчику определять, что разные части схемы имеют различные доминирующие частоты, и что на определенных частотах поиск решения важен, а на других — нет. Такой интеллектуальный частотно-избирательный подход дает возможность моделировать схемы сложных телекоммуникационных устройств, например, приемников с многократным преобразованием частоты, многополосных усилителей мощности и высокочастотных цифровых плат, на порядок быстрее, чем при использовании традиционного метода гармонического баланса.

В отличие от традиционного метода гармонического баланса метод MRHB динамически формирует уравнения для анализа схемы для спектра с набором множества тонов и гармоник, добавляя ограничение этого спектра для каждого элемента или блока схемы, что позволяет существенно сократить число решаемых уравнений.

Вся необходимая для анализа информация передается от одного элемента (блока) схемы

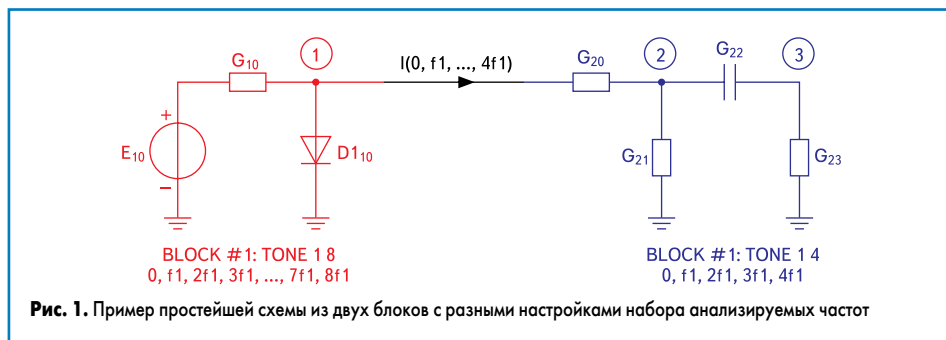


Рис. 1. Пример простейшей схемы из двух блоков с разными настройками набора анализируемых частот

к другому через набор общих частот, как показано на рис. 1. Этот простой пример показывает, что схема была разбита на два блока, каждый из которых моделируется на наборе частот однотонального воздействия. Для первого (красного) блока назначены восемь гармоник тонального воздействия, для второго (синего) — всего четыре. Связь между этими двумя частями схемы осуществляется на пяти частотах — четырех гармониках основного тона и нулевой частоте (DC). При моделировании первого блока учитываются все девять частот, что делает результат более точным.

Для таких простых схем, как правило, нет необходимости в ограничении частотного спектра на отдельных ее элементах, но многие схемы требуют, чтобы один из их нелинейных элементов был промоделирован более точно. При использовании метода MRHB это требование локальной точности никак не повлияет на моделирование других частей схемы. Это означает, что, если для делителя частоты необходим анализ более 2000 гармоник однотонального воздействия, он может быть промоделирован локально с более широким набором частот, без нежелательного влияния на используемый в этом же проекте смеситель, моделируемый со своим набором частот двутонального воздействия.

Другими словами, метод MRHB предполагает, что доминирующие наборы частот различны для разных частей схемы, и что благодаря разному их назначению анализ всей схемы методом гармонического баланса может быть выполнен более эффективно и даже более точно. При этом время анализа и требуемые ресурсы памяти будут существенно ниже, по сравнению с использованием традиционного метода гармонического баланса.

Для иллюстрации некоторых фундаментальных основ метода MRHB рассмотрим ряд примеров. Полезно начать с простой схемы, показанной на рис. 1, в которой первый блок имеет источник напряжения и нелинейный диод, для которых строится система уравнений для девяти частот (DC и восьми гармоник). Допустим, что диод смещен настолько, чтобы генерировать спектр гармоник с большим уровнем. В этом случае обычный метод гармонического баланса потребует анализа всех элементов схемы (линейных и нелинейных) на всех восьми гармониках. Вторая часть схемы представляет собой фильтр нижних частот, в котором, как предполагается, будут подавляться гармоники высокого порядка, и на последующие каскады на этих частотах будут передаваться ничтожные уровни энергии.

При анализе этой схемы с помощью модуля MRHB разработчик получает возможность индивидуально настроить параметры анализа для резистора и конденсатора, чтобы ограничить спектр анализируемых частот только четырьмя гармониками и нулевой частотой. В итоге разработчик может получить преимущество от того, что во втором блоке схемы отсутствуют частоты $5f_1$, $6f_1$, $7f_1$ и $8f_1$, и что ток I , текущий из блока 1 в блок 2, будет иметь только пять частотных составляющих: DC, f_1 , $2f_1$, $3f_1$ и $4f_1$. При использовании метода MRHB только наиболее важные частоты и гармоники учитываются для каждой определенной части схемы. В результате мы получаем новый принцип нелинейного моделирования, дающий возможность более эффективно выполнять моделирование более сложных схем.

Таким образом, метод MRHB дает преимущество при моделировании следующих случаев:

- Однотональное воздействие, многочастотный анализ. В этом случае выигрыш происходит за счет того, что неполный набор нелинейных гармоник распространяется по схеме, а метод MRHB позволяет выбирать только нужные из них (рис. 1).
- Многотональное воздействие, многочастотный анализ. Выигрыш происходит за счет общего ограничения пространства решений «тон-частота» через использование гибридных тонов.

Для пояснения идеи гибридных тонов рассмотрим пример QPSK-приемника, показанный на рис. 2. Это достаточно сложная схема для использования обычного метода гармонического баланса на уровне схемы, так как она многотональная по сути, и несколько гармоник сигналов должны пройти через все ее нелинейности. Схема содержит реализованный на транзисторном уровне QPSK-приемник, состоящий из 130 транзисторов, описанных моделью BSIM3, и свыше 100 пассивных элементов.

Для анализа схемы мог быть использован традиционный метод гармонического баланса при двутональном воздействии с прямоугольным усечением (box-style truncation) сигнала RF до седьмой гармоники ($f_{RF} = 2,45$ ГГц) и сигнала гетеродина LO до четвертой гармоники ($f_{LO} = 2,44$ ГГц). Однако, благодаря разбиению схемы на части с учетом проходящего через них частотного спектра, анализ методом MRHB может задействовать многотональные наборы частот и подавлять многие из гармоник на схемных элементах, где их присутствие не критично.

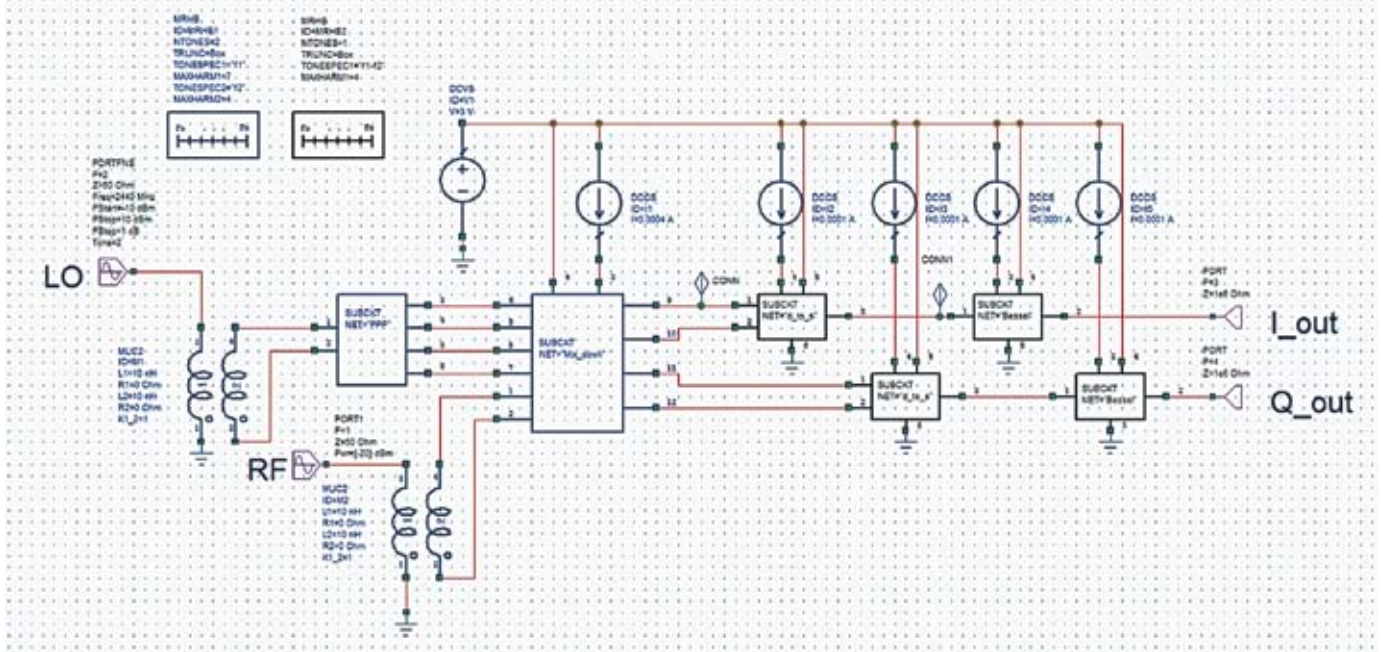


Рис. 2. QPSK-приемник, состоящий из 130 транзисторов и более 100 пассивных элементов

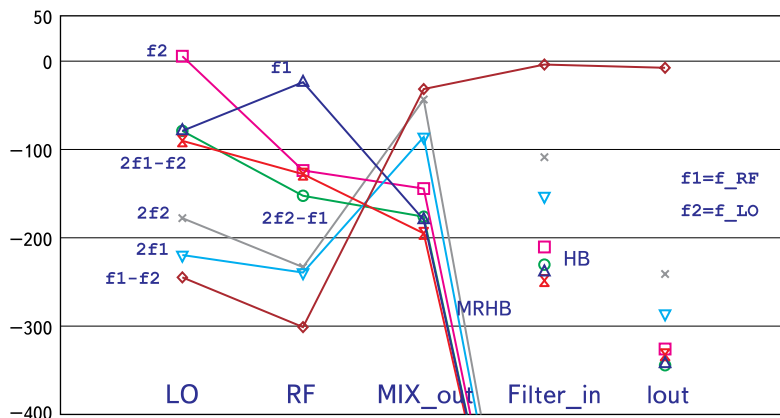


Рис. 3. Результаты расчета продуктов преобразования на выходе смесителя QPSK-приемника

Для подсхемы, представленной на рис. 2, моделирование методом MRHB было выполнено за вдвое меньшее время с использованием вдвое меньшего объема памяти без существенного отличия в результатах, по сравнению с полученными с помощью традиционного метода гармонического баланса. Для блоков несимметричных и бесселевских фильтров моделирование выполнялось для однотонального воздействия с учетом четырех гармоник фундаментальной частоты, представляющей собой гибридный тон, рассчитываемый по формуле $f_{RF} - f_{LO}$. Благодаря использованию этой уникальной функции ме-

тода MRHB, а также возможности назначения мультитонального воздействия на конкретные блоки значительно снижаются затраты вычислительных ресурсов по сравнению с традиционным методом гармонического баланса при использовании прямоугольного или ромбического усечения.

В таблице 2 приведены сравнительные данные по времени расчета и затратам памяти для обычного метода гармонического баланса и метода MRHB при анализе проекта QPSK-приемника. Уровни сигналов заданных комбинационных составляющих частот LO и RF в разных частях схемы показаны на рис. 3.

Таблица 2. Сравнение производительности методов обычного гармонического баланса и MRHB

Параметр	Обычный HB	MRHB
Время анализа, с	43,9	13,5
Требуемая память, Мбайт	50	23

Рассчитывались: основной продукт преобразования, вторые гармоники и интермодуляционные составляющие третьего порядка. Рассчитанные данные очень хорошо согласуются с поведением реальной схемы, хотя были получены с использованием вдвое меньшего объема памяти, при этом было затрачено в четыре раза меньшее время.

Заключение

Традиционный метод гармонического баланса сохраняет свои позиции, он до сих пор, пусть и с трудом, соответствует требованиям индустрии моделировать сложные высокочастотные схемы. Однако новые технологии, например, адаптивный выбор частот анализа, дают возможность модифицировать классический метод. Компания AWR потратила несколько лет на разработку адаптивного метода гармонического баланса (MRHB) и в настоящее время реализовала его в вычислительном модуле APLAC системы проектирования СВЧ-устройств AWR Microwave Office.