

# Моделирование ключевых элементов беспроводных систем

Джозл Киршман (joel.kirshman@ni.com)

Залогом успешной разработки современных систем мобильной, спутниковой связи и радиолокации в настоящее время становится качественная оценка параметров элементов этих систем на самых ранних этапах проектирования. Данная статья посвящена преимуществам использования специализированного программного обеспечения для точной оценки ключевых параметров элементов беспроводных систем.

Разработчикам высокопроизводительных устройств сетей 5 поколения (5G) необходимо иметь четкое представление о значениях ключевых параметров (коэффициента шума, точки компрессии, интермодуляционных искажений третьего порядка, отношения сигнал/шум и др.) задолго до передачи прототипов в производство. Стандартные методы оценки таких параметров, включающие применение эмпирических закономерностей или расчёты в табличных процессорах на основе урав-

нений Фрииса, дают лишь ограниченное представление о характеристиках реальных приборов нового поколения.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ САПР

Как правило, для расчётов каскадных параметров тракта традиционно используются табличные процессоры. У такого подхода есть два основных преимущества: простой ввод данных и доступность программного обеспечения. К сожалению, с ростом сложно-

сти проектируемых систем (как в случае перехода к сетям 5G) недостатки табличных расчётов становятся более очевидными. В частности, в основе подобных расчётов лежат стандартные уравнения, которые не учитывают такие параметры реальных систем, как рассогласование между элементами или шум в зеркальном канале. Кроме того, большинство таблиц не поддерживает работу с файлами данных (будь то таблицы спуров или файлы s2p), а статистический анализ или оптимизация в них могут быть сложно реализуемы или в принципе невозможны. При этом упомянутые выше функциональные возможности становятся востребованными и даже необходимыми, особенно если перед разработчиками стоит задача создания высокопроизводительного и конкурентоспособного устройства.

Более современные и эффективные методы решения подобных задач

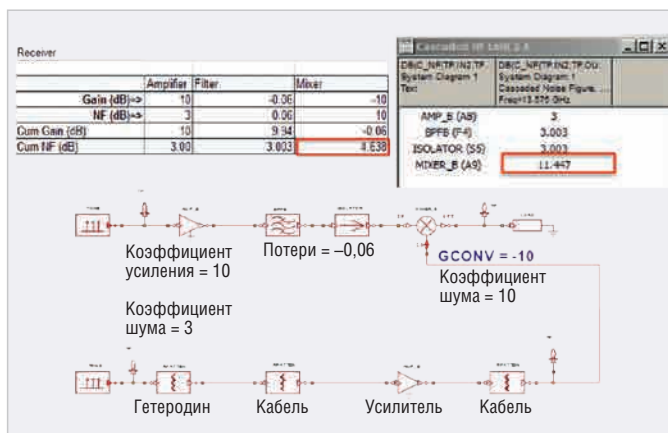


Рис. 1. Расчёт трактов ВЧ и гетеродина в таблице и в VSS

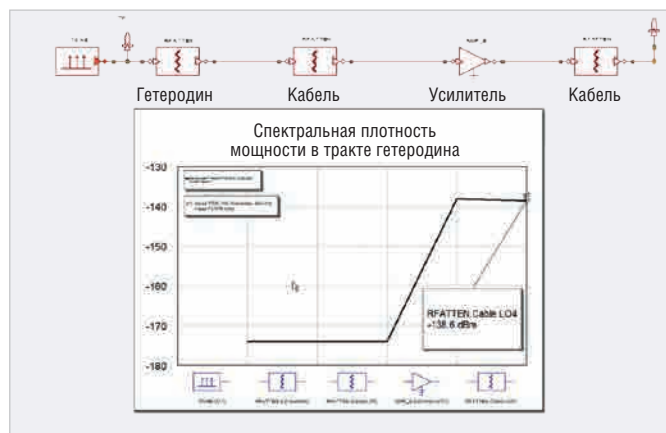


Рис. 2. Анализ спектральной плотности мощности по шуму

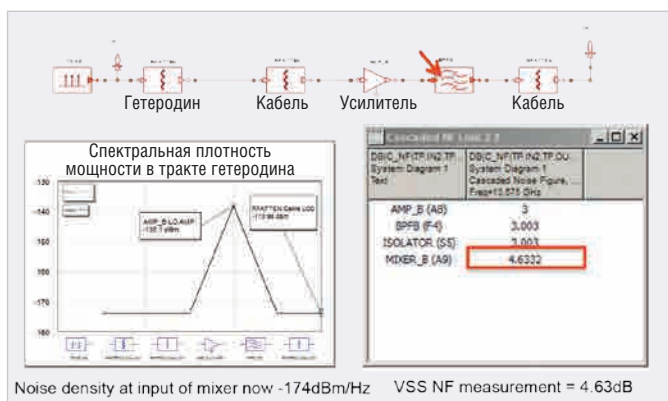


Рис. 3. Добавление фильтра на выходе усилителя для снижения плотности и коэффициента шума

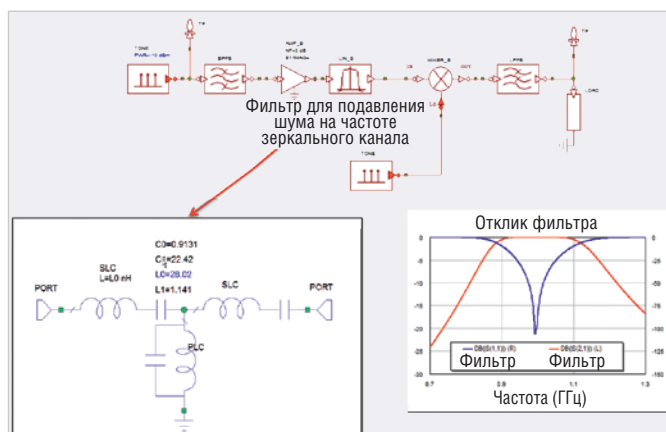


Рис. 4. Замена поведенческой модели фильтра на реальную схему

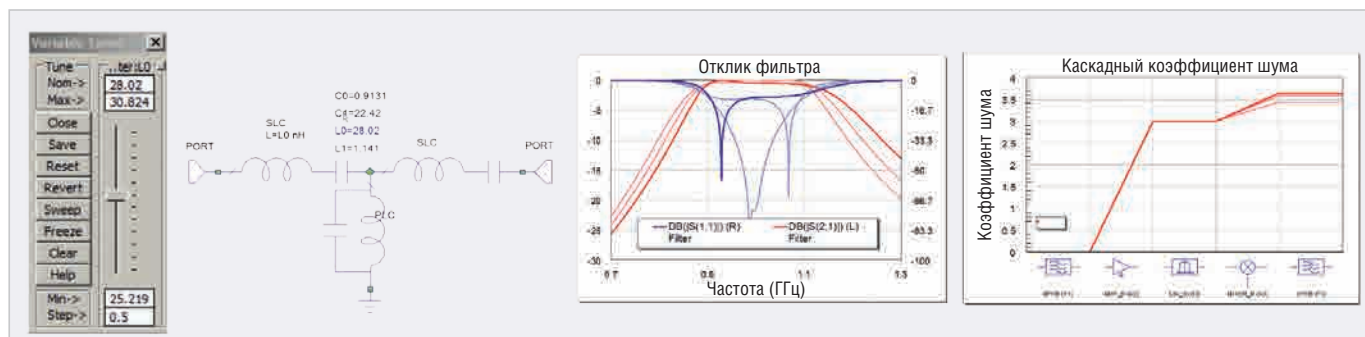


Рис. 5. Поведение отклика фильтра и коэффициента шума при изменении значения индуктивности  $L_0$

заканчиваются в использовании специализированных инструментов для расчёта параметров системы. Именно таким инструментом является модуль проектирования на системном уровне Visual System Simulator™ (VSS), входящий в состав NI AWR Design Environment. Симулятор VSS создавался специально как дополнение к стандартным табличным расчётам, обладающее значительным расширенным набором инструментальных средств для решения таких задач, как каскадный анализ тракта, расчёт спуров и других. Пользователь VSS начинает работу с ввода в табличный интерфейс данных о компонентах, после чего переходит к измерению необходимых каскадных параметров, а также получает автоматически сгенерированную системную диаграмму. Встроенные в VSS поведенческие, схемотехнические и файловые модели компонентов позволяют не только учесть частотные зависимости и эффекты, связанные с коэффициентом стоячей волны по напряжению, но и провести статистический анализ и оптимизацию, что в совокупности обеспечивает значительно более детальное понимание процессов в разрабатываемой системе.

### УЧЁТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ НА ВХОДЕ СМЕСИТЕЛЯ

В качестве первого примера можно рассмотреть стандартный проект, в котором производится расчёт спектральной плотности мощности на входе смесителя. Как видно из рисунка 1, ВЧ-тракт начинается с источника незатухающих колебаний, за которым следуют усилитель, фильтр, аттенуатор и смеситель. Тракт гетеродина (LO) состоит из источника, аттенуатора, модели кабеля и усилителя. После выполнения моделирования в VSS легко заметить существенную разницу в значении коэффициента шума: он составит 11,45 дБ вместо полученных в таблице 4,64 дБ. В чём причи-

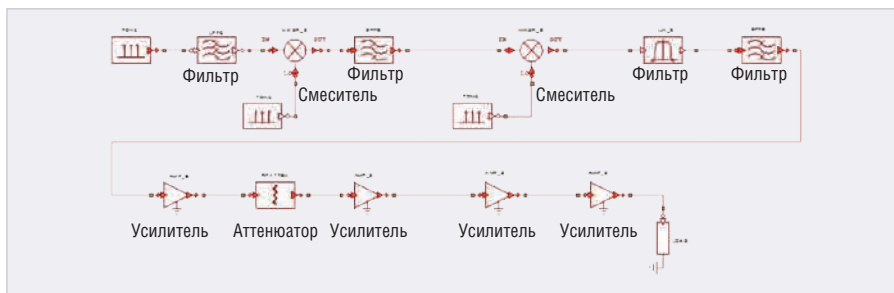


Рис. 6. Схема измерения интермодуляционных искажений 3-го порядка

на такого значительного отклонения в поведении тракта? Математически все расчёты в таблице верны, поэтому коэффициент шума должен составлять 4,6 дБ. Тем не менее моделирование в VSS показывает далёкий от ожидаемого результат. Понять происходящее можно, воспользовавшись мощными возможностями анализа LO-тракта в VSS.

Проанализируем спектральную плотность мощности в тракте опорного генератора (см. рис. 2). На входе смесителя плотность шума повышается до  $-138,6$  дБм/Гц по сравнению с  $-174$  дБм/Гц в начале тракта. Очевидно, это вызвано наличием в тракте усилителя. С учётом коэффициента усиления и шума усилителя изменяется и тепловой шум в тракте, что и наблюдается на рисунке 2. В табличных расчётах данные процессы не учитываются, поэтому разработчик, делая всё «по учебнику», оказывается лишённым возможности оценить влияние подобных эффектов на параметры тракта.

Решить обнаруженную проблему можно, поместив фильтр на выходе усилителя. На рисунке 3 показано, что включение фильтра позволяет уменьшить плотность шума на входе LO-смесителя до 174 дБм/Гц, а значение коэффициента шума теперь согласуется с ожидаемым и составляет 4,63 дБ.

### УЧЁТ ОТРАЖЕНИЙ

Во втором примере рассмотрим замену поведенческой модели фильтра его схемотехнической реализацией (см. рис. 4),

измерение S-параметров и соответствующий системный анализ. В контексте перехода на схемотехнический уровень представляет интерес, как будут влиять конкретные параметры компонентов на характеристики системы – например, как изменится коэффициент шума при подстройке значения одной из индуктивностей фильтра. Регулируя значение индуктивности  $L_0$  на схеме фильтра, можно обнаружить не только изменение коэффициентов отражения  $S_{11}$  и пропускания  $S_{21}$ , но и одновременно с этим изменение коэффициента шума в исследуемой системе (см. рис. 5).

В приведённых выше примерах показано, как с помощью VSS можно преодолеть функциональную ограниченность расчётных таблиц. Так, анализ спектральной плотности мощности позволил обнаружить увеличение коэффициента шума на усилителе тракта опорного генератора. Выполнение совместного моделирования на системном и схемотехническом уровнях даёт возможность наблюдать изменения в коэффициенте шума при вариации значения одной из индуктивностей фильтра.

### ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

В третьем, более сложном примере будут произведены измерения интермодуляционных искажений третьего порядка IM3 относительно несущей (см. рис. 6). Параметры системы вводятся в таблицу, после чего выпол-

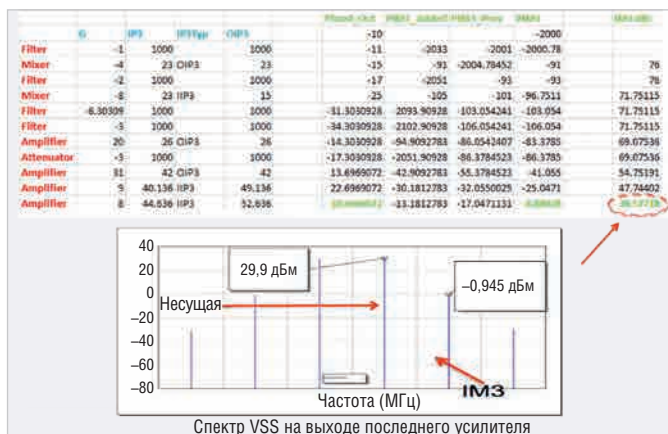


Рис. 7. Сравнение табличного расчёта IM3 и результатов, полученных в VSS

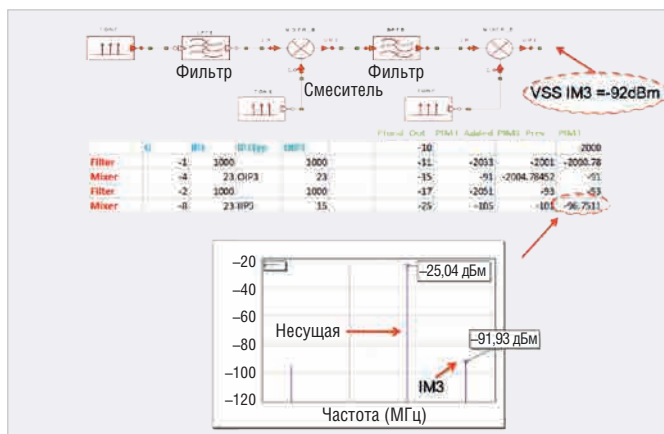


Рис. 8. IM3, измеренная на выходе второго смесителя, в сравнении с табличным расчётом

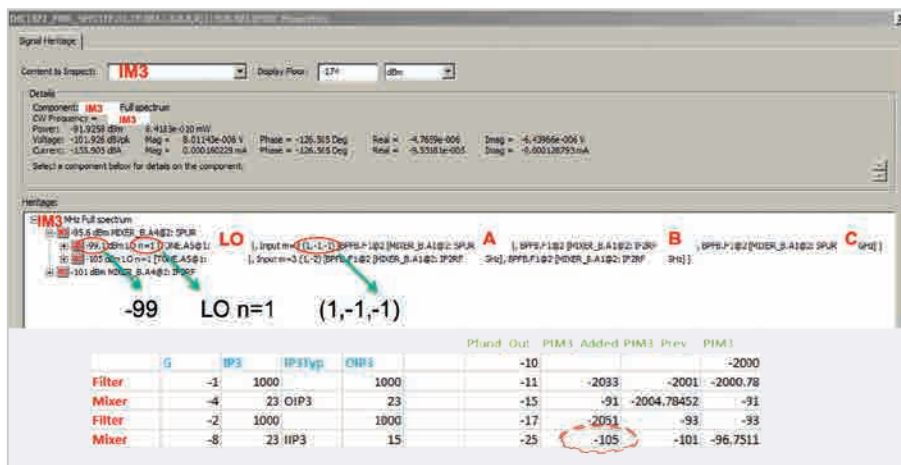


Рис. 9. Анализ паразитного сигнала в модуле RFI в сравнении с табличными расчётами

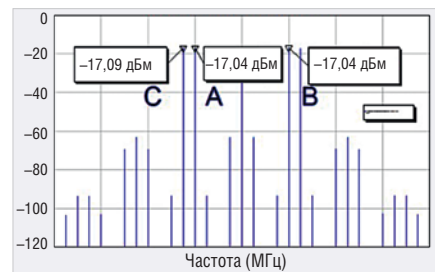


Рис. 10. Тоны А, В на выходе фильтра после 1-го смесителя в RFI

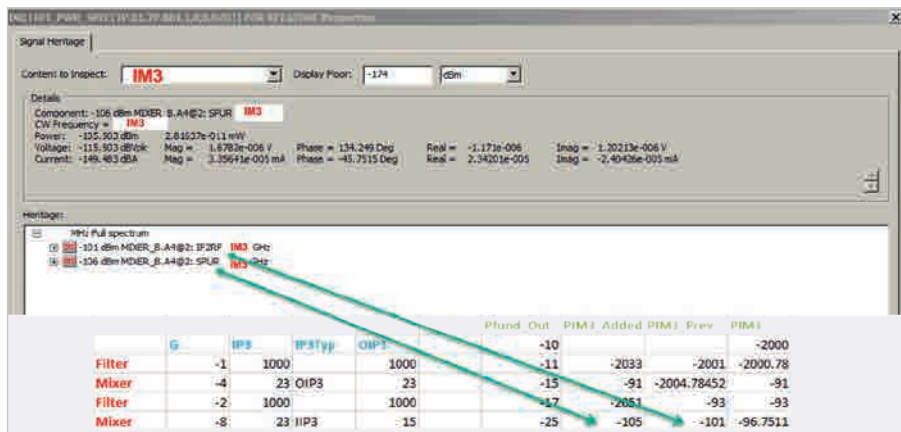


Рис. 11. Добавление фильтра в RFI для подавления нежелательных тонов

няется построение системы в VSS при помощи модуля каскадного анализа RF Budget (см. рис. 7). Как и в предыдущих примерах, результаты, полученные в VSS, отличаются от табличных. Расчёт в табличном процессоре показал 39,577 дБм, в то время как в VSS получено значение 30,845 дБм.

Рассмотрим результаты подробнее. Интермодуляционная составляющая третьего порядка, измеренная на выходе второго смесителя, сравнивается с

рассчитанной в таблице (см. рис. 8). В VSS она оказывается равной -92 дБм. В табличных расчётах измеряется только отношение данного тона к интермодуляционной составляющей третьего порядка, в результате чего получается величина -97 дБм. Данное значение высчитывается путём сложения по напряжению предыдущего значения -101 дБм и добавочного -105 дБм. Тем не менее результат расчётов в VSS составляет -92 дБм.

В VSS встроен инструмент анализа паразитных компонентов RF Inspector, позволяющий оценить влияние элементов тракта на параметры возникающего сигнала. Как видно из рисунка 9, в тракте наблюдается повышение величины интермодуляционных искажений третьего порядка. Стоит обратить внимание, что значения частот на рисунке не указаны, но представлена комбинация тонов А, В и С с индексом 1 на первом гетеродине. Анализ показывает, что комбинация А-В-С+ЛО второго смесителя превращает -105 дБм в -99 дБм, то есть в тракте что-то накладывается на искажения третьего порядка. Сложенные по напряжению -95,5 дБм и -101 дБм дают -92 дБм. Так что же попадает в смеситель и изменяет искажения 3-го порядка? Моделирование в RF Inspector указывает на то, что причиной является комбинация тонов С, А и В с тоном гетеродина (см. рис. 10). Как устранить эту комбинацию и её влияние?

Математический подход с использованием табличных процессоров разработчику не поможет, однако инструмент анализа цепей VSS способен предложить возможное решение. Например, поместить фильтр (см. рис. 11) для удаления нежелательных тонов. Сигнал гетеродина отфильтровать нельзя, но как только один из

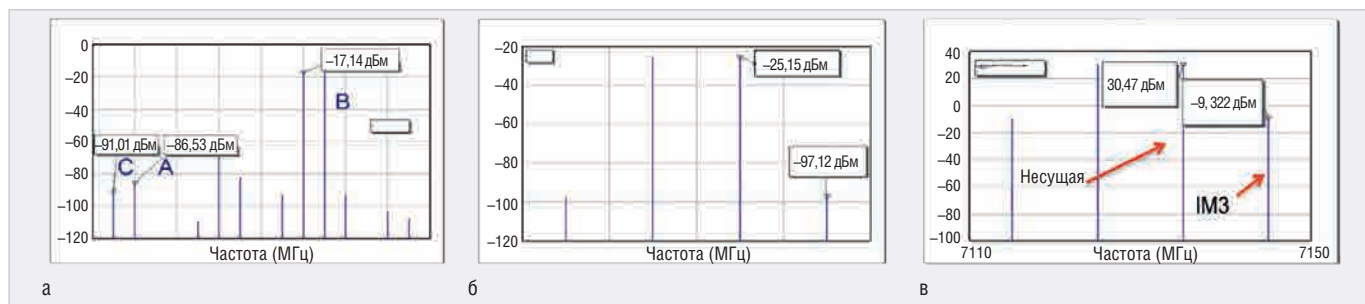


Рис. 12. Спектры сигналов: а) после дополнительного фильтра; б) на выходе второго смесителя; в) итоговый результат

других тонов снимается фильтром, расчёт в программе начинает совпадать с таблицей: -101 дБм от предыдущего элемента и -106 дБм на выходе. При желании можно продолжить исследование и выяснить, что является причиной разницы между ожидаемыми -105 дБм и полученными -106 дБм.

Таким образом, применение VSS помогло выявить проблему и найти подходящее решение (см. рис. 12). После установ-

ки дополнительного фильтра результаты табличных расчётов (39,577 дБм) и моделирования (30,47-(-9,32)=39,79 дБм) хорошо согласуются между собой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных программных средств для моделирования характеристик систем является гораздо более эффективным методом, чем табличные расчёты. Программное обе-

спечение Visual System Simulator предлагает обширную библиотеку моделей и предоставляет возможности учёта реальных эффектов в расчётах, оптимизации, статистического анализа и подробного анализа паразитных компонентов. Такие инструменты, как VSS, позволяют специалистам получать более точные результаты на стадии разработки и определять требования к компонентам проектируемых систем.



## НОВОСТИ МИРА