

X-ПАРАМЕТРЫ: НОВЫЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЧ И СВЧ КОМПОНЕНТОВ

X-PARAMETERS: THE NEW PARADIGM FOR MEASUREMENT, MODELING, AND DESIGN OF NONLINEAR RF AND MICROWAVE COMPONENTS

David E. Root, Jason Horn, Loren Betts, Chad Gillease, Jan Verspecht*, компания Agilent Technologies, Inc. Santa Rosa, CA (*Jan Verspecht, bvba, Opwijk, Belgium)

Уже более 40 лет S-параметры (от англ. Scattering — рассеяние) были важнейшим элементом микроволновой теории и являлись основными измерениями характеристик СВЧ и ВЧ устройств.

S-параметры могут быть измерены на высоких частотах с помощью векторного анализатора цепей (VNA). Калиброванные измерения S-параметров позволяют определить собственные характеристики тестируемого устройства (ТУ) не зависимо от системы анализатора цепей, на которой проводились измерения. Эти характеристики тестируемого устройства (усиление, потери, коэффициент отражения и т.д.) уже знакомы и интуитивно понятны, и остаются крайне важными. S-параметры по-прежнему популярны для определения характеристик нелинейных устройств, таких как усилители и транзисторы. При этом зачастую забывается или пренебрегается тем, что S-параметры точно описывают характеристики нелинейных устройств только при воздействии сигналами низкого уровня, относительно которых поведение тестируемого устройства может быть приближено к линейным компонентам при фиксированном значении постоянного тока или статической рабочей точке.

В настоящее время появилась необходимость в появлении точного, практически реализуемого метода для моделирования и разработки нелинейных компонент на высоких частотах. Революция в области коммуникаций непреклонно заставляет активные устройства соответствовать все более жестким требованиям работы. X-параметры являются наиболее точной и расширенной версией S-параметров, подходящих для линейных и нелинейных компонентов, в условиях работы с сигналами как низкого, так и высокого уровня. Они сокращаются до S-параметров в пределах сигналов низкого уровня. Однако, в отличие от S-параметров, X-параметры содержат детализированную и полезную информацию, включающую амплитуду и фазу искажений, которые возникают при работе с сигналами высокого уровня.

X-параметры позволяют реализовать иерархическую методику разработки каскадов нелинейных устройств,



Agilent Technologies

зная X-параметры отдельных компонентов. X-параметры могут быть применены везде, где используются S-параметры для активных и нелинейных устройств, давая при этом существенные преимущества.

PHD СТРУКТУРА: ИСТОКИ X-ПАРАМЕТРОВ

Установившийся режим ВЧ или СВЧ компонентов при работе с сигналами высокого уровня полностью определяется его нелинейным материальным уравнением $V(A)$, которое характеризует выходящие (рассеянные) В-волны как комплексные нелинейные функции комплексных значений падающих А-волн. Это показано на рисунке 1 для многокаскадного усилителя и описано формулой 1. Первый индекс показывает номер порта ($e=1,2$). Второй индекс является

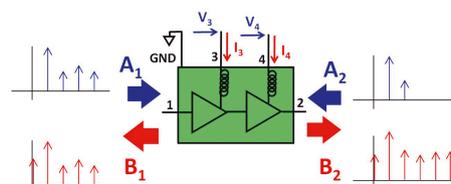


Рис. 1. PHD структура: модель выражена в частотной зависимости и отображает связь падающих (А) и рассеянных (В) волн. Информация, полученная из амплитуды и фазы падающих и рассеянных волн на всех гармониках сигнала, эквивалентна информации во временной области, поэтому полные входные и выходные нелинейные характеристики могут быть получены

порядком гармоники ($f=1,2,...N$). Для упрощения, на рисунке 1 показан случай, когда спектральные компоненты падающего сигнала определяют гармонический состав. Обратите внимание, что входной и выходной фазор имеет компоненты на каждой гармонике несущей волны, отличающ при этом от комплексного фазора одиночного сигнала низкого уровня, который используется для определения S-параметров. Важно принимать во внимание, что сигналы падают на разные порты одновременно, так как нет эффекта суперпозиции. Это означает, что в нелинейном устройстве

будет возникать взаимодействие (смешивание) различных частотных компонент падающего сигнала.

$$V_{ef} = F_{ef}(DC, A_{11}, A_{12}, \dots, A_{21}, A_{22}, \dots) \quad (1)$$

Возникает режим каскадности при двух условиях, которые должны быть удовлетворены во внутреннем узле соединения двух компонентов. Эти два условия могут быть эквивалентны двум стандартным законам теории цепей, KLC и KVL, выраженных в промежутке между А и В. Каскад PHD компонент должен быть описан традиционными линейными (S-параметры) и нелинейными моделями в симуляторе, включающем PHD компоненты.

Помимо измерений, проводимых на традиционном векторном анализаторе цепей, нахождение нелинейного материального уравнения требует знания амплитудной и фазовой информации множества спектральных компонент налагающихся друг на друга одновременно. Нелинейный векторный анализатор цепей (NVNA), разработанный компанией Agilent Technologies, представляет собой новый инструмент, позволяющий измерять эти параметры с высоким динамическим диапазоном на современном техническом уровне анализаторов цепей [1]. Это единственный коммерческий прибор, который позволяет измерять X-параметры.

ПРИНЦИП X-ПАРАМЕТРОВ: СПЕКТРАЛЬНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ

Чтобы сделать практически реализуемым определение материального уравнения $V(A)$ тестируемого устройства, приходится делать упрощения. Наиболее радикальное упрощение приводит к случаю уже знакомых S-параметров. S-параметры получаются из аппроксимации целых значений зависимости каждой В-волны, представляемой линейной для каждой спектральной компоненты, от каждой А-волны. Другая крайность возникает, если мы не применяем аппроксимаций, что дает случай, когда каждая компонента В-волны зависит нелинейно от каждой падающей А-волны. На практике, это обычно только на один или два уровня выше, чем S-параметры, которые требуются для наилучшего приближения к нелинейной зави-

симости $V(A)$, даже при ярко выраженных нелинейных свойствах.

В большей части этой статьи, мы оперируем простейшим случаем, который сложнее S-параметров. В нем мы сохраняем полную нелинейную зависимость V -волн от одной спектральной компоненты одного падающего сигнала, а именно A_{11} — несущей компоненты падающей волны на входном порту. В этом случае, мы связываем составляющую постояняного тока и A_{11} , определяя рабочую точку сигнала высокого уровня (LSOP). Все остальные спектральные компоненты входят в материальное уравнение как линейные величины. Эта ситуация характерна для усилителей мощности (УМ) с импедансом 50 Ом и применима для множества имеющихся коммерческих ВЧ усилителей с низким и средним коэффициентом усиления (мобильная связь), даже когда они работают в режиме насыщения или при высоком значении компрессии.

Формула для этой, так называемой, «спектральной линейризации» представлена в выражении 2 [2]. Суммы получаются путем сложения сигналов на всех портах, они все, кроме пары (1,1), индексированы в зависимости от гармоник. «Чистая» фаза P , представлена как $P = e^{j\text{Phase}(A_{11})}$.

$$B_{e,f} = X_{ef}^{(F)}(DC, |A_{11}|)P^f + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(S)}(DC, |A_{11}|)P^{f-h} \cdot A_{gh} + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(T)}(DC, |A_{11}|) P^{f+h} \cdot A_{gh}^* \quad (2)$$

В формуле 2 имеется три составляющие. Первая составляющая представляет собой отклик идеально нагруженной (для всех гармоник) нелинейной системы (с управляющим постоянным током), стимулированной одним синусоидальным входным сигналом высокого уровня на порту 1. Дополнительная функция $X(S)$ тока смещения и тона высокой амплитуды является коэффициентом, который умножает комплексный фазор (A_{gh}) для всех гармоник и несущей частоты падающей волны на порт 2. Это аналогично «горячим» S-параметрам, при подаче сигнала высокого уровня. Суммирование определяет вклад в V на каждой гармонике с индексом f из каждой гармонической компоненты падающей волны от каждого порта. Таким образом, учитываются свойства трансляции частоты, которые не учитывались S-параметрами. Последней составляющей выражения 2 является произведение фазора A_{gh}^* (сопряженного комплексного значения фазора A_{gh}). Для этой части нет аналогии в теории S-параметров. Ее происхождение может быть понято, исходя из теории анализа смесителей. Графическая интерпретация представлена на рисунке 2. Возникновение сопряженной составляющей связано с наличием зеркальных составляющих (имиджей) при

смешивании тонов высокого уровня (A_{11}) и тонов низкого уровня (A_{gh}), одновременно падающих на ТУ. Фазовая зависимость A_{11} в выражении 1 может быть вынесена из аргумента X-параметров, применяя принцип временной независимости [2,3]. (Примечание: источники [2,3,6] оперируют другими условиями, нежели эта статья для индексов X-параметров и переносу $X(F)$ к термину $X(S)$ в выражении 2).

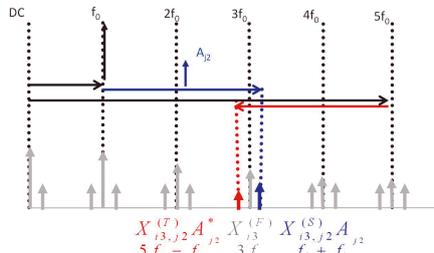


Рис. 2. Эта диаграмма показывает происхождение слагаемого $X(T)$, основанного на продуктах смешения. Три составляющие попадают на каждую гармонику из-за продуктов смешения первого порядка или ниже на тоне малого уровня. На третьей гармонике частота определяется как $3f_0 + 0f_1$ и входит в слагаемое $X(F)$. Верхняя боковая полоса $f_0 + f_1$ входит в слагаемое $X(S)$. Нижняя боковая полоса $5f_0 - f_1$ входит в слагаемое $X(T)$. Поскольку слагаемые смешения включают $-f_1$, то фазовая зависимость A_{12} также подвергается инверсии, поэтому $X(T)$ умножается на A_{12}^* вместо A_{12} .

Выражение 2 верно до тех пор, пока все присутствующие спектральные компоненты A_{gh} достаточно малы, при этом они не изменяют составляющую постоянного тока и не вносят продуктов интермодуляционных искажений выше первого порядка. Для некоторых усилителей мощности с высоким коэффициентом усиления, работающих в условиях сильного рассогласования, падающая волна на порт 2 на несущей частоте может быть достаточно большой, что приводит к необходимости включить ее в рабочую точку сигнала высокого уровня (LSOP), нежели трактовать в качестве линейной составляющей (как в выражении 2). Пример этого последует далее.

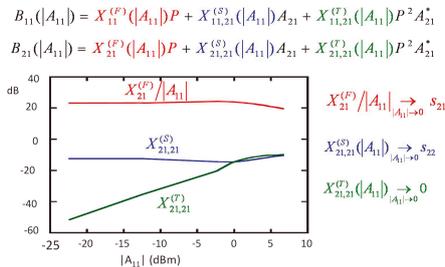
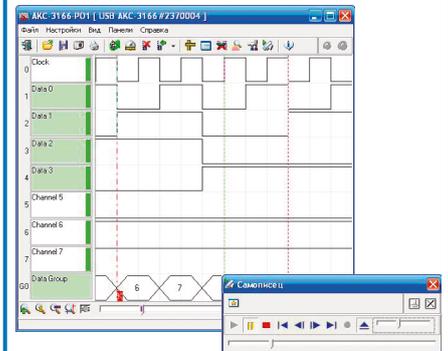


Рис. 3. Выражение в верхней части рисунка показывает как шесть X-параметров (на несущих частотах) заменяют четыре типичные S-параметра при двухпортовых измерениях. Выражение справа от рисунка показывает как эти X-параметры сокращаются до S-параметрах в условиях работы с малым сигналом. График слева показывает важность слагаемого $X(T)$, возрастающего при увеличении мощности входного сигнала. Этот параметр становится даже более важным, чем $X(S)$ (который соответствует «горячему S22») на некоторых уровнях мощности.

НОВОСТИ на www.kipis.ru

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ АКТАКОМ АКС-3166 И АКС-3116

В цифровых логических анализаторах АКТАКОМ АКС-3166 и АКС-3116, помимо анализа потока цифровых данных одновременно по 16-ти каналам, в полном объеме обеспечивается цифровая регистрация данных в режиме самописца, позволяющих на частотах до 50 кГц записать цифровую последовательность данных в память ПК в виде файла, объем которого определяется возможностями дисковой памяти компьютера, и, в дальнейшем, осуществить детальный анализ любого участка цифровых данных как в виде поканальных временных диаграмм, так и в виде групповой диаграммы.



Для выбора анализируемого участка записанных данных используется специальная панель просмотра файлов самописца. Набор управляющих кнопок позволяет записывать и загружать файлы данных, запускать просмотр записанных данных на экране логического анализатора, выбирать нужный участок и ставить прокрутку на паузу. Перемещаться по файлу данных удобнее с помощью ползункового управляющего элемента. Ещё один ползунок регулирует скорость автоматической прокрутки данных, считываемых из файла.

Важным улучшением в приборах АКТАКОМ АКС-3166 и АКС-3116 также является возможность использовать для записи в прибор в режиме самописца внешнюю тактовую частоту до 50кГц, что обеспечивает тактирование от исследуемого устройства. В приборе АКТАКОМ АКС-3166 для внешнего тактирования предназначен отдельный разъём, который можно программно сконфигурировать для приёма внешней тактовой частоты и для выдачи частоты тактирования наружу.

Все пользователи логических анализаторов АКТАКОМ могут получить новую опцию в приборе и программном обеспечении, обратившись в сервис-центр АКТАКОМ с сайта www.aktakom.ru.

Несмотря на то, что выражение 2 является более сложным, чем выражение для линейных S-параметров, все же оно сильно упрощено по сравнению с основным материальным уравнением (1), но при этом оно сохраняет свою полезность для приложения нелинейного анализа. Выражение 2 может быть определено из нескольких измерений, при этом сокращая объем данных и время на их получение, а также упрощая само моделирование. Все же, эта аппроксимация «классического 1-тонового X-параметра» позволяет включить в модель влияние гармоник и эффектов рассогласования на несущей частоте и гармонических составляющих. При этом модель включает влияние всех эффектов АМ-АМ и АМ-ФМ, даже генерируемых нечетными гармониками при тоне высокого уровня, а также эффект постоянного тока при вариации амплитуды ВЧ сигнала, следовательно позволяет определять значение тока смещения от мощности. Все эти эф-

фекты также чувствительны к гармоническим составляющим источника сигнала на каждом порту.

Для 2-портового усилителя, даже не учитывая гармонических составляющих, существует шесть X-параметров, относящихся к рассеиванию сигнала на несущей частоте и гармонических составляющих.

$$B_{pm} = X_{pm}^{(f)} \left(|A_{11}| \right) P_m^m + X_{pm,qp}^{(s)} \left(|A_{11}| \right) P_m^{m-n} A_{qn} + X_{pm,qp}^{(t)} \left(|A_{11}| \right) P_m^{m+n} A_{qn}^*$$

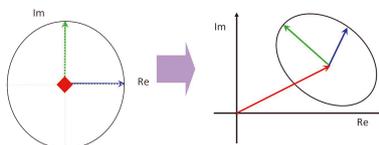


Рис. 4. Требуется провести три независимых измерения для получения набора из трех X-параметров, относящихся к рассеянной волне на порту p, для гармоники m при рабочей точке сигнала высокого уровня ($|A_{11}|$), и для падающей волны сигнала низкого уровня на порту q, для гармоники n. Эти три измерения показаны красным, зеленым и синим цветом. Слагаемые, соответствующие каждому измерению, представлены в выражении в верхней части рисунка

шей частоте при его прохождении от одного порта к другому (при высоком входном сигнале). Это на два порядка сложнее, чем четыре традиционных S-параметра. Эти шесть X-параметров показаны на рисунке 3, где три параметра, связанных с выходным портом, также представлены как функции от падающего сигнала (амплитуда A11) для усилителя мощности. Первые два X-параметра сокращаются до знакомых S21 и S22 в пределах входного сигнала низкого уровня. Новый параметр X(T)21,21 исчезает, при уменьшении входной мощности. Этот параметр характеризует интермодуляционные искажения третьего порядка между A11 и A21. При входном сигнале высокого уровня, появляется влияние параметра X(T)21,21, он становится даже большим чем традиционный «горячий» S-параметр X(S)21,21. Высокое значение X(T)21,21 является показателем полного перехода усилителя в режим насыщения (распространенный случай для GSM) [4]. Все же, этот параметр должен быть получен и включен в рассмотрение для определения рассогласования. Линейность параметров A21 и A21*, при их умножении на X(S)21,21 и X(T)21,21, ведет к получению эллиптической зависимости согласования от фазы A21 (подтверждаемая данными), тогда как «горячие» S-пара-

метры не могли дать даже грубого представления о рассогласовании ТУ при сигналах высокого уровня [4].

ПОЛУЧЕНИЕ X-ПАРАМЕТРОВ

Для каждого тона существует три индивидуальных слагаемых, которые находятся на одной частоте. Методика получения этих слагаемых использует три (или более) независимых измерения для их разделения. Идеальный подход представлен на рисунке 4. Идея заключается в прямом определении параметра X(F) путем возбуждения одного тона высокого уровня, и затем проведении еще двух экспериментов на каждый порт и каждую гармонику с разными (приблизительно ортогональными) фазами для получения достоверных измерений, из которых получают набор трех X-параметров. На практике, наличие собственных гармоник источника сигнала и гармонических рассогласований измерительной системы требует более сложного подхода. В приложении нелинейного анализа, разработанного компанией Agilent Technologies (Agilent NVNA), измерение и получение X-параметров тестируемого устройства возможно даже при наличии гармоник источника сигнала и гармонических рассогласований измерительной системы.

ОТОБРАЖЕНИЕ X-ПАРАМЕТРОВ В ХОДЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Приложение для отображения X-параметров, измеренных с помощью Agilent NVNA, показано на рисунке 5. Полученные X-параметры экспортируются в файл данных MDIF формата

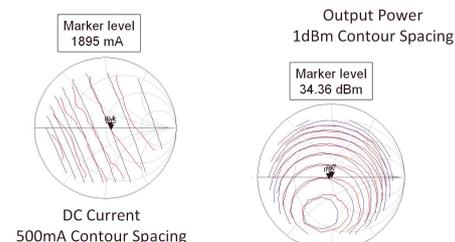


Рис. 6. Сравнение симулированных X-параметров (синий) и измерений Load-pull (красный) при нанесении результатов по постоянному току и выходной мощности на коммерчески доступном GSM усилителе

и помещаются в директорию ADS PHD_Files. Меню выбирает автоматически сконфигурированную PHD компоненту, которая соответствует файлу данных с необходимым числом ВЧ портов и портов постоянного тока. В схематическом интерфейсе ADS необходимо просто выделить и перенести компоненту на схематическую страницу, после этого можно мгновенно начать процесс нелинейного моделирования этой компоненты, а также разработки нелинейных цепей.

GSM УСИЛИТЕЛЬ

GSM усилитель разработан для интегрирования в мобильный телефон, чтобы поднимать уровень сигнала антенны. Поскольку нагрузка на усилите-

НОВОСТИ на www.kipis.ru

НОВИНКА ОТ АКТАКОМ: КОНФЕРЕНЦ-СТОЛ АРМ-4427

Новая модель стола для конференц залов специально разработана для проведения тренингов, семинаров или презентаций. Основное достоинство конференц-стола АКТАКОМ это удобный складной механизм, а также небольшой, но практичный размер столешницы 120x60 см. Под крышкой стола может быть установлен блок розеток с сетевым фильтром АТР-9106 (опция), который позволяет подключать демонстрационное электрооборудование.



АКТАКОМ

Складной механизм дает возможность быстрой трансформации и удобной транспортировки столов, при этом они занимают мало места при складировании. Ножки стола можно сложить внутрь, и тогда корпус стола будет не толще 8 см! Такие столы можно хранить в небольшом подсобном помещении или шкафу.

Стол АРМ-4427 снабжен металлическими ножками и обладает повышенной прочностью и устойчивостью. Материал столешницы — меламиновая ДСП цвета бук. Окантовкой столешницы служит противоударная кромка из пластика. Размеры стола 120x60 см. Высота 70 см. Крышка стола имеет толщину 16 мм.

www.aktakom.ru

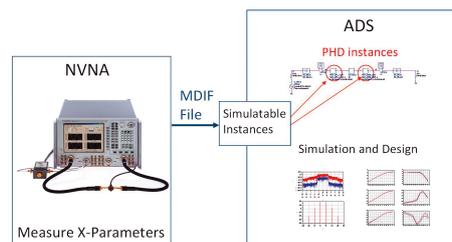


Рис. 5. Рисунок демонстрирует процесс получения и отображения X-параметров в САПР Agilent ADS, что является важным моментом для ученых и разработчиков

ле, обеспечиваемая антенной, варьируется в широких пределах в зависимости от окружения телефона, то при разработке требуется получить информацию о том, как на усилитель повлияет рассогласование. В связи с тем, что GSM усилители работают в режиме насыщения, традиционные подходы, такие как «горячие» S22, не дают нужных результатов, а измерения Load Pull (примечание: речь идет об измерениях с тюнером импеданса) не достаточно достоверны. X-параметры дают альтернативный (более точный и полный) подход к разработке и определению характеристик устройств, чем «горячие» S22. Он требует меньше времени, чем измерения Load Pull, при этом он интегрируется в САПР Agilent ADS EDA. На рисунке 6 показано сравнение выходной мощности и постоянного тока, рассчитанным с помощью X-параметров, с измерениями полезной нагрузки для коммерческого GSM усилителя.

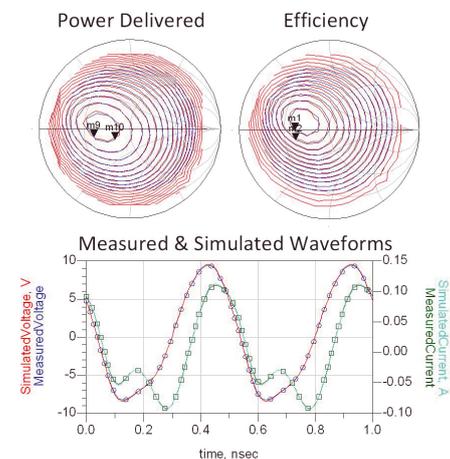


Рис. 7. Зависимые от нагрузки X-параметры для WJ коммуникационного транзистора: в верхней части показано сравнение симулированных (синий) и измеренных (красный) значений подаваемой мощности и производительности. Внизу показано сравнение симулированных (линии) и измеренных (маркеры) значений напряжения и тока на одной фиксированной нагрузке ($\Gamma_{\text{match}} = 0.383 + j \cdot 0.31$)

Точное определение ВЧ и токовых (DC) характеристик, включая гармоники, в условиях рассогласования позволяет оптимизировать выходную мощность, производительность и искажения, что не было возможно ранее. Возможность определения поведения усилителя при рассогласовании также позволяет реализовать моделирование каскадов нелинейных приборов, включая предсказание искажений для цепей устройств.

ЗАВИСИМЫЕ ОТ НАГРУЗКИ X-ПАРАМЕТРЫ

Примеры, которые до сих пор рассматривались в этой статье, были ограничены условиями измерений X-параметров при рабочей точке с сигналом высокого уровня, предполагая наличие постоянной составляющей тока и одиночного тона высокого уровня на одном порту. Для некоторых приборов, таких как мощные усилители, работаю-

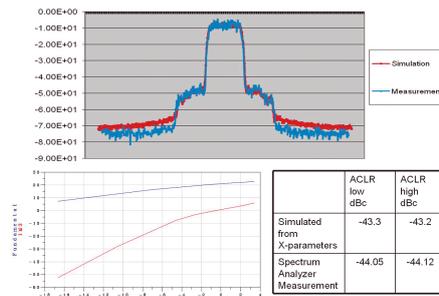


Рис. 8. PHD компоненты могут быть использованы в симуляции огибающей (Envelope simulation), для определения ACSRR и IM3 с гарантированной точностью в пределах узкой полосы. В верхней части рисунка показано наложение измеренного и симулированного спектра для стимула 3GPP WCDMA на 13 дБм выходной мощности. Внизу показана симуляция IM3 по отношению к входной мощности. Таблица справа показывает сравнение параметра ACLR

щие в условиях сильного рассогласования, падающая волна на порт 2 на несущей частоте может быть слишком большой, чтобы она была определена как малый сигнал. Соответственно она должна быть включена в рабочую точку сигнала высокого уровня (LSOP). Это позволит провести более точное определение характеристик прибора. Один из способов реализации этого является включение параметра Γ_{21} (коэффициент отражения порта 2) на несущей частоте в рабочую точку сигнала высокого уровня. В результате получается Выражение 3. Суммы теперь не включают связанные с A21 слагаемые.

$$B_{e,f} = X_{ef}^{(F)}(DC, |A_{11}|, \Gamma_{21}) P^f + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(S)}(DC, |A_{11}|, \Gamma_{21}) P^{f-h} \cdot A_{gh} + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(T)}(DC, |A_{11}|, \Gamma_{21}) P^{f+h} \cdot A_{gh}^* \quad (3)$$

На практике, это может быть выполнено, используя тюнер импеданса с анализатором NVNA, чтобы измерить X-параметры в интересующем диапазоне нагрузок [5]. В результате этого, мы получаем набор зависимых от нагрузки X-параметров, которые точно измерены в заданном диапазоне нагрузок. На рисунке 7 показано сравнение результатов зависимых от нагрузки X-параметров и независимых измерений Load Pull.

МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ

Несмотря на то, что X-параметры измеряются при периодических синусоидальных или многотоновых сигналах, они могут быть использованы в Circuit Envelope симуляторе системы автоматического проектирования Agilent ADS для оценки работы прибора в условиях модулированного сигнала. X-параметры, померенные при однотоновом сигнале источника, позволяют оценить отклик ТУ на двухтоновый или многотонный сигнал, поскольку сигнал с источника может быть представлен как модулированный сигнал на одной несущей частоте. В дополнении, можно оценить отклик на комплексно модулированный сигнал. Это позволяет из однотоновых измерений X-параметров определять такие параметры как IP3 или ACLR. На рисунке 8 показан пример симуляции двухтонового и WCDMA сигнала, полученных из однотоновых измерений X-параметров.

Х-параметры могут быть применены при измерениях многопортовых нелинейных устройств, таких как смесители, а также проблем, связанных с влиянием эффектов памяти [6]. Метод X-параметров может быть применен для таких задач как моделирование транзисторов, разработка многокаскадных усилителей, проектировка нелинейных ВЧ цепей, анализ стабильности усилителей мощности и многих других.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

X-параметры представляют собой расширенный набор S-параметров, результатов полученных с помощью Load Pull и измерений формы сигнала. Новый универсальный принцип ВЧ измерений, моделирования и разработки РЧ компонентов и систем. Мы можем измерить и получить X-параметры благодаря нелинейному векторному анализатору цепей Agilent NVNA. С их помощью можно моделировать компоненты, разрабатывать нелинейные цепи и системы в САПР Agilent ADS. Все необходимое для полноценного нелинейного анализа теперь собрано в едином решении. X-параметры позволяют распространить линейные S-параметры в нелинейную область работы устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.agilent.com/find/nvna>
2. D. E. Root et al IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol. 53. No. 11, November, 2005 pp. 3656-3664.
3. J. Verspecht and D. E. Root, in IEEE Microwave Theory and Techniques Magazine, June, 2006.
4. J. Horn et al in IEEE European Microwave Conference, Amsterdam, October, 2008.
5. G. Simpson et al, IEEE MTT-S ARFTG Conference, Portland, OR, December, 2008.
6. J. Verspecht et IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Honolulu, HI, USA, June 2007. ☑

For more than 40 years, S-parameters, or scattering parameters, have been among the most important of all the foundations of microwave theory and techniques. The communications revolution is inexorably forcing active components into more and more strongly nonlinear regimes of operation. X-parameters are the rigorous supersets of S-parameters that are applicable to linear and nonlinear components, excited by small and large-signal conditions.