

УДК 681.2.083

В.Ю. Саяпин

Описание нелинейных цепей на основе X-параметров и методика их измерения

Приведено описание системы X-параметров и их физического содержания для анализа искажений сигналов в нелинейных устройствах. Детально описан процесс получения элементов матриц, определяющих величины X-параметров, приведен пример расчета.

Ключевые слова: X-параметры, S-параметры, гармоника, амплитуда, фаза.

Система X-параметров для анализа характеристик нелинейных цепей. В настоящее время классическим способом описания поведения устройства является расчет S-параметров данного устройства. Данные параметры показывают изменение амплитуды и фазы входного гармонического сигнала при его прохождении через устройство. Система S-параметров адекватно описывает работу устройств в линейном режиме. При анализе нелинейных устройств существует необходимость иметь сведения не только об изменении параметров основной гармоники входного сигнала, но и о продуктах взаимодействия сигналов (при воздействии на вход более одного сигнала), а также о величине гармоник высшего порядка с частотами, кратными частоте основного сигнала. Эти данные можно получить при использовании новой категории параметров, называемых X-параметрами [1].

Нелинейные векторные анализаторы цепей, которые выпускает компания Agilent, позволяют помимо стандартных S-параметров измерять X-параметры – новую категорию параметров для нелинейных цепей, которые удобно использовать для описания свойств нелинейных компонентов. X-параметры являются зарегистрированной торговой маркой Agilent Technologies [1]. В настоящее время в отечественной литературе тема X-параметров слабо освещена. Целью данной статьи является сведение воедино имеющейся информации об X-параметрах, а именно: описание X-параметров, физический смысл элементов матриц X-параметров и способ их расчета. В статье представлены материалы, заимствованные из зарубежных публикаций [2–5].

X-параметры позволяют распространить линейные S-параметры в нелинейную область и получить точное отображение поведения устройства. Они могут быть использованы совместно с программными средствами моделирования системы ADS (Advanced Design System) компании Agilent для точного моделирования и разработки нелинейных систем. Результатом моделирования в данном случае является высокое качество моделей нелинейных устройств и, соответственно, достоверность проектных решений при их разработке, что, безусловно, представляет интерес для ученых и инженеров, создающих современные ВЧ-устройства с высокими рабочими характеристиками.

Значения X-параметров приближаются к значениям S-параметров в пределах сигналов низкого уровня. Однако в отличие от S-параметров X-параметры содержат детальную и полезную информацию, включающую амплитуду и фазу спектральных составляющих, которые возникают при работе устройств в нелинейном режиме.

Описание нелинейных цепей с использованием X-параметров. X-параметры представляют собой линейную аппроксимацию коэффициентов ряда Фурье нелинейной функции при малом изменении амплитуды сигналов в условиях работы с большим уровнем сигналов [2]. Данное представление получается на основе модели PHD (polyharmonic distortion model), предложенной Ферспехтом в [3], и имеет следующий вид [4, 5]:

$$B_{ef} = X_{ef}^{(F)}(|A_{11}|)P^f + \sum_{g,h \neq 1,1} X_{ef,gh}^{(S)}(|A_{11}|)P^{f-h}A_{gh} + \sum_{g,h \neq 1,1} X_{ef,gh}^{(T)}(|A_{11}|)P^{f+h}A_{gh}^*, \quad (1)$$

где B_{ef} – комплексная амплитуда гармоники с номером f на выходном порте e ; A_{11} – входной сигнал на порту 1; A_{gh} – дополнительно подаваемый пертурбационный сигнал на порт g вблизи гармоники h основного сигнала; P – начальная фаза входного сигнала основной гармоники на порту 1;

$X_{ef}^{(F)}$, $X_{ef,gh}^{(S)}$, $X_{ef,gh}^{(T)}$ – элементы матриц X-параметров.

Выражение (1) содержит три составляющие. Первая составляющая $X^{(F)}$ является матрицей комплексных коэффициентов, позволяющих получить отклик идеально нагруженной (для всех гармоник) нелинейной системы, стимулированной одним синусоидальным сигналом высокого уровня на порту 1. Вторая составляющая $X^{(S)}$ также является матрицей комплексных коэффициентов, описывающей появляющиеся на выходных портах интермодуляционные составляющие при подаче на один из входных портов дополнительного искажающего сигнала. Это аналогично «горячим» S -параметрам при подаче сигнала высокого уровня. Последней составляющей в (1) является $X^{(T)}$. Она связана с комплексной составляющей введенного дополнительного искажающего сигнала. Для этой части нет аналогии в теории S -параметров. Ее происхождение может быть понято исходя из теории анализа смесителей [4]. 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 тестируемое устройство. Суммирование трех составляющих определяет вклад в B_{ef} на каждой гармонике с индексом f каждой гармонической компоненты падающей волны от каждого порта. Таким образом, учитываются свойства трансляции частоты, которые не учитывались стандартными S -параметрами.

В [4] приводится пример, показывающий происхождение слагаемых, основанных на продуктах смешения (рис. 1). Три составляющие находятся вблизи каждой из гармоник. На третьей гармонике частота определяется как $3f_0$ 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_{j2} также подвергается инверсии, поэтому $X^{(T)}$ умножается на A_{j2}^* вместо A_{j2} .

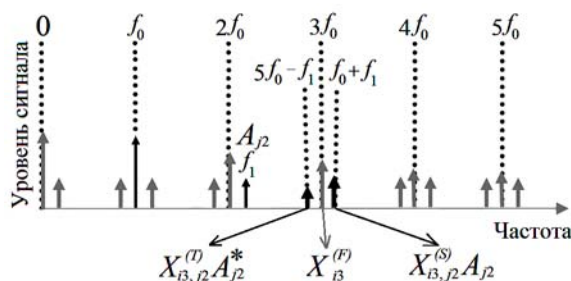


Рис. 1. Иллюстрация составляющих $X^{(F)}$, $X^{(S)}$, $X^{(T)}$

В [4] приводится связь X - и S -параметров. На рис. 2 выражения справа от рисунка показывают, как X -параметры приближаются к S -параметрам в условиях работы с малым сигналом [4]. 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 S_{22} ») на высоких уровнях мощности.

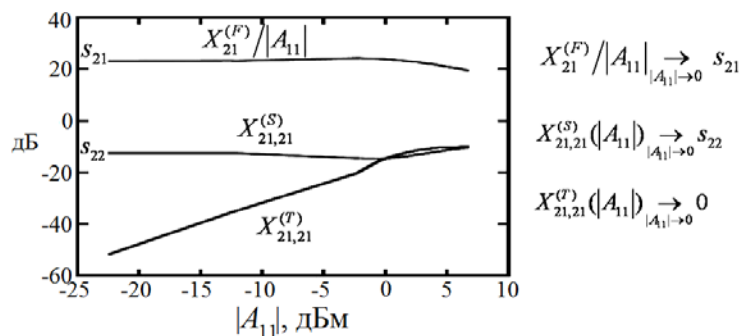


Рис. 2. Связь X - и S -параметров

X -параметры характеризуют выходной сигнал с учётом множества спектральных составляющих и требуют измерения амплитуд и фаз этих спектральных компонентов [4]. При этом необходимо проводить измерения при всех возможных значениях импеданса источника и нагрузки. Основная проблема формирования X -параметров – это дорогостоящая аппаратура для их измерения: нелинейный векторный анализатор, а также тюнеры импеданса.

Как уже было сказано, для каждого тона существуют индивидуальные слагаемые, которые находятся на одной частоте. Методика получения этих слагаемых использует несколько независимых измерений для их разделения [4]. Подход заключается в прямом определении $X^{(F)}$ путем возбуждения одного тона высокого уровня и затем проведении дополнительных экспериментов с введением искажающего сигнала на каждый порт и каждую гармонику с разными (приблизительно ортогональными) фазами для получения $X^{(S)}$ и $X^{(T)}$ [4].

Пример расчета X -параметров 2-портового устройства с оценкой гармоник до 3-го порядка. Требуется провести несколько независимых измерений для получения набора из трех X -параметров, относящихся к выходному сигналу на порту e , для гармоники f , при подаче на первый

порт однотонового сигнала высокого уровня ($|A_{11}|$), и однотонового сигнала низкого уровня (пертурбационного сигнала) на порту g для гармоники h .

1) Получение элементов матрицы $X^{(F)}$. На все порты устройства устанавливается согласованная нагрузка, на порт 1 подается сигнал 1-й гармоники (основной). Проводятся измерения амплитуд и фаз (комплексного коэффициента передачи) всех гармоник (f) выходного сигнала на всех портах (e), при условии подачи на вход большого сигнала (под большим сигналом понимается сигнал, при котором устройство работает в нелинейном режиме). Полученные значения поправляются на фазу P^f , исходя из формулы (1), где P – начальная фаза основной гармоники.

Например, при подаче на первый порт сигнала основной гармоники измеряются значения:

На порте 1:

- 1-й гармоники – $X_{11}^{(F)}$;
- 2-й гармоники – $X_{12}^{(F)}$;
- 3-й гармоники – $X_{13}^{(F)}$.

На порте 2:

- 1-й гармоники – $X_{21}^{(F)}$;
- 2-й гармоники – $X_{22}^{(F)}$;
- 3-й гармоники – $X_{23}^{(F)}$.

2) Получение элементов матриц $X^{(S)}$ и $X^{(T)}$. Для каждой комбинации входного порта (g) и гармоники (h) и выходного порта (e) и гармоники (f) выполняются следующие действия.

На все порты устройства устанавливается согласованная нагрузка, на порт 1 подается сигнал 1-й гармоники (основной). На порт g подается пертурбационный сигнал (дополнительный сигнал возмущений), частота которого должна незначительно отличаться от гармоники h , содержащий составляющую с комплексной амплитудой a_{gh} на частоте ($\omega_a = h \cdot \omega_1 + \Delta\omega$, где ω_1 – частота основной гармоники, а $\Delta\omega \ll \omega_1$) и «комплексно сопряженную» a_{gh}^* ($\omega_a^* = -h \cdot \omega_1 - \Delta\omega$, т.е. отрицательная частота). Для заданного выходного порта (e) и гармоники (f) измеряются значения возникших спектральных составляющих в окрестности гармоники (f). Полученные значения комплексных амплитуд спектральных составляющих делятся на значение a_{gh} и вводится поправка на фазу P^{f+h} (исходя из формулы (1), на P^{f-h} для элементов матрицы $X^{(S)}$ и на P^{f+h} для элементов матрицы $X^{(T)}$). Полученные в итоге значения являются элементами матрицы $X^{(S)}$ (для частот больше f); и элементами матрицы $X^{(T)}$ (для частот меньше f).

Покажем измерение значений $X_{23,12}^{(S)}$ и $X_{23,12}^{(T)}$, при $\omega_1 = 1000$ МГц и $\Delta\omega = 10$ МГц. Первые два числа (23) означают, что измеряются спектральные составляющие вблизи 3-й гармоники на порте 2; вторые два числа (12) означают, что пертурбационный сигнал подается с частотой $\omega_a = 2 \cdot \omega_1 + \Delta\omega$ на порт 1.

Для измерения на порт 1 подается сигнал основной частоты (гармоника) $\omega_1 = 1000$ МГц и пертурбационный сигнал a_{gh} с частотой $\omega_a = 2 \cdot \omega_1 + \Delta\omega = 2 \cdot 1000 + 10 = 2010$ МГц. Значения амплитуды и фазы спектральных составляющих вблизи 3-й гармоники ($3 \cdot \omega_1 = 3000$ МГц), а именно 3010 МГц и 2090 МГц ($\omega_1 + \omega_a = 3010$ МГц и $5 \cdot \omega_1 - \omega_a = 2990$ МГц), деленные на $a_{gh} \cdot P$ и $a_{gh} \cdot P^5$ соответственно, и являются искомыми значениями $X_{23,12}^{(S)}$ и $X_{23,12}^{(T)}$ соответственно. На рис. 1 показан вид спектра на выходе одного из портов, где обозначены спектральные составляющие, необходимые для расчета элементов матриц X -параметров.

Заключение

1. X -параметры являются нововведением в области описания нелинейных устройств, т.к. они более адекватно определяют поведение нелинейного устройства в широком диапазоне уровней входных сигналов, в том числе при работе в режиме больших сигналов. Их использование позволяет проводить более глубокий и качественный анализ нелинейных систем.

2. Значения X -параметров, в отличие от S -параметров, содержат информацию о гармониках высшего порядка и продуктов, обусловленных интермодуляционными искажениями.

3. Для получения элементов всех матриц необходимо провести ряд экспериментов. Один эксперимент для получения матрицы $X^{(F)}$, где на порт 1 подается основной сигнал, и несколько экспериментов для получения элементов матриц $X^{(S)}$ и $X^{(T)}$, где кроме основного сигнала на порте 1 подается пертурбационный сигнал на порт 1 или 2, с центральной частотой вблизи 1, 2 или 3-й гармоники, и далее проводятся измерения для всевозможных комбинаций e и f .

Автор выражает благодарность проф. каф. РТС ТУСУРа Тисленко В.И. за совместное обсуждение вопросов и замечания по теме статьи, которые способствовали ее корректному изложению.

Литература

1. Agilent – Network Analyzer Basics. Agilent Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf> (дата обращения: 06.05.2012).
2. Linearization of large-signal scattering functions / J. Verspecht, D.J. Williams, D. Schreurs et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – Vol. 53, № 4. – P. 1369–1376.
3. Polyharmonic distortion modeling / J. Verspecht and D. Root // IEEE Microwave mag. – 2006. – Vol. 7, № 3. – P. 44–57.
4. New LDMOS Model Delivers Powerful Transistor Library 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 // TEST & Measuring instruments and systems. – 2008. – № 5. – P. 20–24.
5. Going Nonlinear / C. Baylis, R. J. Marks II, J. Martin et al. // IEEE Microwave mag. – 2011. – Vol. 12, № 2. – P. 55–64.

Саяпин Вячеслав Юрьевич

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: 8-923-425-03-27

Эл. почта: nasl@sibmail.com

Sayapin V.Y.

Description of nonlinear circuits based on X-parameters and the methods of their measurement

In the article we describe the X-parameters and their physical content for the analysis of distortion of signals in non-linear devices. The process of obtaining of X-parameters matrix elements is described in detail. It is shown on the example.

Keywords: X-parameters, S-parameters, harmonic, amplitude, phase.
