

УДК 621.314.26

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ X -ПАРАМЕТРОВ

Фролов Д. Р., Левченко А. С., Коротков К. С., Бабенко А. А.

FEATURES OF DEFINING THE SCATTERING MATRIX OF NON-LINEAR MICROWAVE DEVICES USING X -PARAMETERS

Frolov D. R., Levchenko A. S., Korotkov K. S., Babenko A. A.

Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia
e-mail: frolov.drf@gmail.com

Abstract. We propose a theoretical analysis of method for determining scattering parameters of frequency converters by measuring X -parameters with non-linear vector network analyzer (NVNA). Analysis uses flow graphs theory. Diagrams of NVNA calibration and their equivalent flow graphs in X -parameters system are presented. Expressions are obtained for uncertainties of determining complex transmission coefficients of frequency converters under test by NVNA, calibrated by a comb generator standard. The analysis showed that the process of defining components of X -matrix of non-linear device under test using a comb generator is equal to the process of defining components of S -matrix of non-linear device under test using a reference mixer or frequency converter. Therefore in this type of measurements it is possible to determine only relative scattering parameters of frequency converter under test and in this case a comb generator becomes a new type of standard, that is much more broadband and universal. Consequently by using the studied calibration procedure it is impossible to define true phase response and group delay of frequency converter under test if true phase response and group delay of comb generator are unknown.

Keywords: X -parameters, microwave measurements, frequency converter, network analyzer

Введение

Первой фундаментальной работой, в которой были изложены принципы определения матриц рассеяния нелинейных цепей, следует считать диссертацию Я. Верспехта [1] 1995 г. В ней были описаны схемы построения векторных анализаторов нелинейных СВЧ-цепей. Однако в виде промышленного прибора такой анализатор начал выпускаться фирмой Agilent Technologies лишь в 2008 году [2, 3]. Этому предшествовало создание Верспехтом и Руттом, а также другими исследователями из Agilent Technologies математического аппарата так называемых X -параметров в работе [2] и [4]. Изначально технология X -параметров разрабатывалась для измерения параметров устройств без ге-

теродинного преобразования частоты, однако в 2008–2010 годах в работах [5, 6] был предложен метод и реализующее его устройство применения X -параметров и векторного анализатора цепей для измерения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Позднее Agilent Technologies была подана заявка на получение патента на указанное устройство [7].

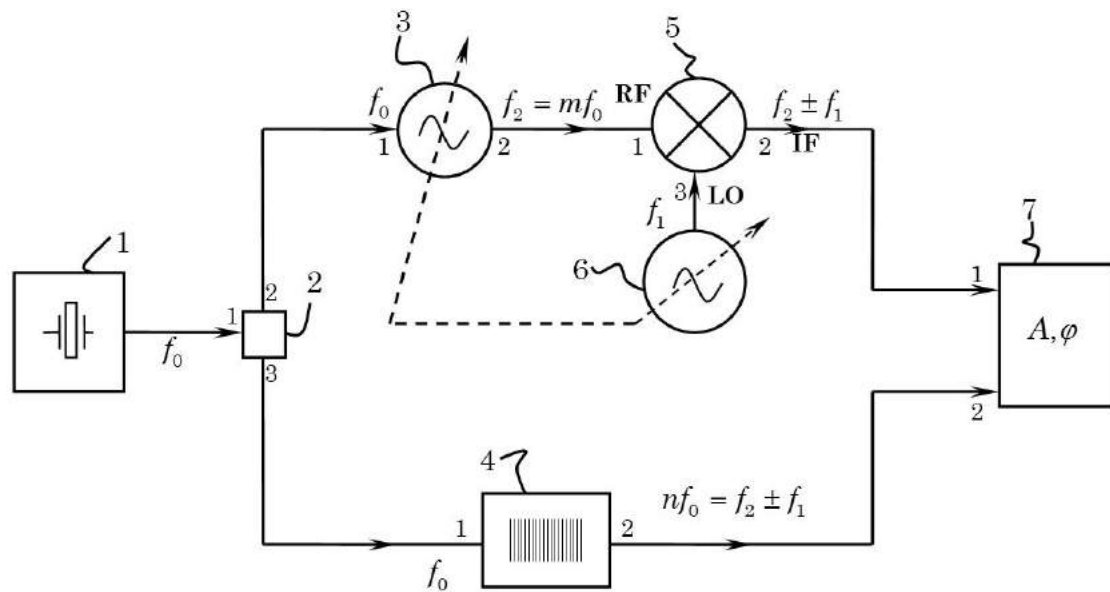
Суть работы генератора комбинационных частот состоит в следующем. На вход подается прямоугольный меандровый сигнал стабильной, обычно достаточно низкой частоты около единиц-десятков мегагерц. Выходной сигнал данного генератора имеет форму прямоугольного импульса длительно-

Фролов Даниил Русланович, аспирант физико-технического факультета Кубанского государственного университета; e-mail: frolov.drf@gmail.com.

Левченко Антон Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: poorly@mail.ru.

Коротков Константин Станиславович, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: korsar@phys.kubsu.ru.

Бабенко Аким Алексеевич, студент физико-технического факультета Кубанского государственного университета; e-mail: akbabenko@mail.ru.

Рис. 1. Упрощенная схема измерения X -параметров

стью порядка 20 пс и высокой скважностью. Спектр такого сигнала образован целой гаммой гармоник, каждая из которых сдвинута относительно предыдущей на величину частоты входного сигнала. Например, для генераторов, описанных в [8], частота входного сигнала 10 МГц, таким образом, генератор вырабатывает 6300 гармоник. В работе [6] указывается, что фазовый сдвиг между любой из гармоник и входным сигналом может быть вычислен. Действительно, если входной сигнал генератора комбинационных частот разложить в ряд Фурье, получим [9]

$$\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n},$$

где φ_n — начальная фаза n -й гармоники, a_n и b_n — коэффициенты ряда Фурье.

Таким образом, зная фазу начальной гармоники, можно рассчитать фазу любой из гармоник, вырабатываемых генератором комбинационных частот. В [5] говорится, что эти фазы могут быть достаточно точно определены и привязаны к национальным стандартам, а технология изготовления таких генераторов комбинационных частот хорошо отработана и позволяет изготавливать генераторы с чрезвычайно малым расхождением характеристик. Однако в работах [5, 6, 10], как и в других работах создателей этой тех-

нологии, не упоминается о том, каким именно образом, кроме вычисления, могут быть определены фазовые сдвиги между гармониками. Тем не менее, в настоящее время фирма Keysight Technologies (бывшая Agilent Technologies) позиционирует данный тип генераторов как новый тип эталона для нелинейных измерений.

1. Новый эталон для нелинейных измерений

Проанализируем данный метод измерения. Для этого составим упрощенную схему измерений (рис. 1) и её граф в системе X -параметров (рис. 2).

Согласно [2] обозначения X -параметров будем использовать в виде ${}^n X_{km}^{(F)}$. Индекс слева сверху обозначает номер устройства, к которому относится параметр. Индекс (F) обозначает тип параметра (еще есть типы S и T). У параметров типа (F) нижний правый индекс состоит из двух чисел ab , где a — номер выходного порта устройства, b — порядок гармоники на порту a . У параметров типов (S) и (T) нижний правый индекс записывается в виде: $ab; cd$ и обозначает: a — номер выходного порта устройства, b — порядок гармоники на порту a , c — номер входного порта устройства, d — порядок гармоники на порту c .

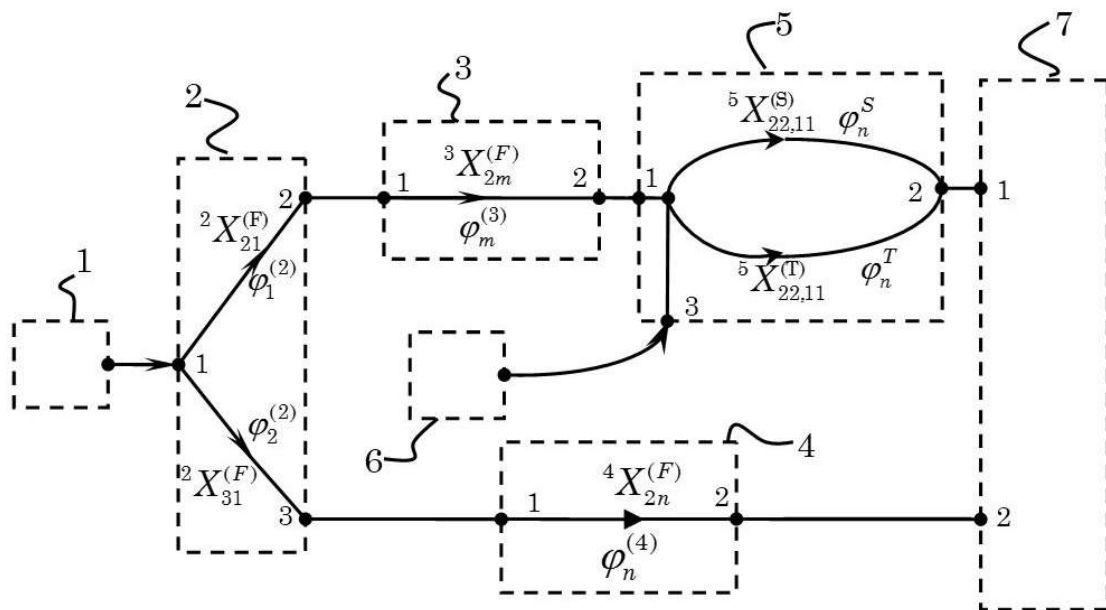


Рис. 2. Граф измерения X-параметров смесителя

Схема состоит из опорного кварцевого генератора — 1, тройника — 2, синтезатора частот — 3, генератора комбинационных частот — 4, испытываемого устройства с преобразователем частоты — 5, гетеродина — 6 и векторного вольтметра — 7.

В синтезаторе частот 3 применена цифровая система фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ), за счет чего его выходной сигнал с частотой f_1 всегда синхронизирован с сигналом опорного генератора постоянной частоты f_0 . Синтезатор частот 3 также синхронизирован с гетеродином 6, а их частоты f_1 и f_2 могут перестраиваться в любой комбинации, как в режиме с постоянной промежуточной частотой, так в режиме с переменной промежуточной частотой. Векторный вольтметр работает по супергетеродинному принципу и может измерять отношения амплитуд и разность фаз сигналов в широком диапазоне частот, но при этом частоты сигналов на его входах 1 и 2 должны быть одинаковыми.

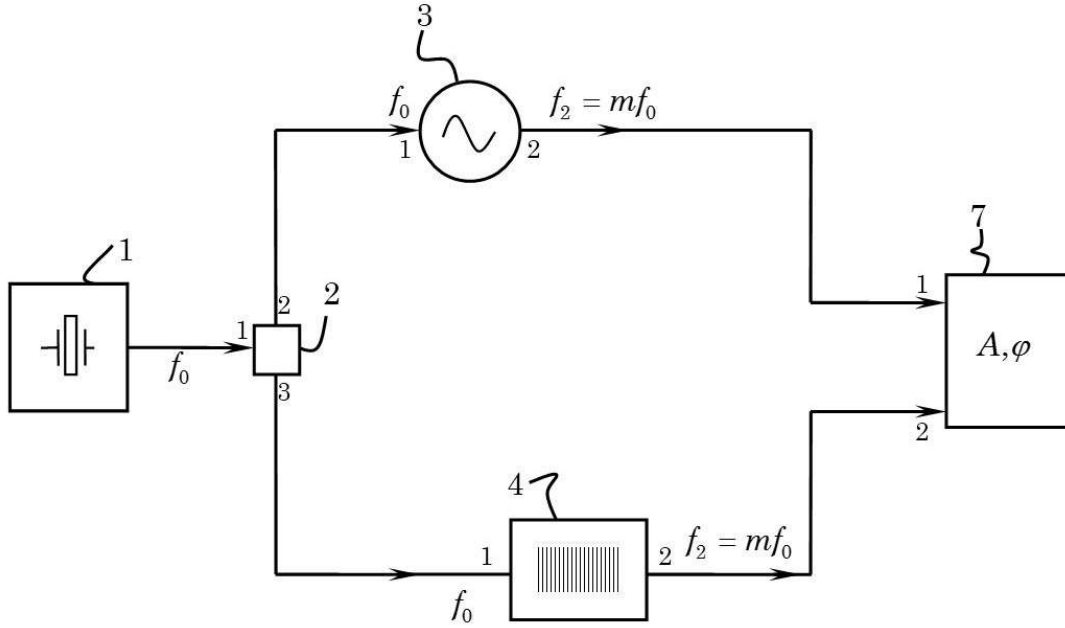
Работа схем на рис. 1 и 2 осуществляется следующим образом. Стабильный сигнал с частотой f_0 с выхода опорного генератора 1 поступает через одно из плеч тройника 2 на вход 1 синтезатора частот 3. В синтезаторе частот 3 сигнал опорной частоты f_0 тактирует работу системы ФАПЧ, которая управляет частотой внутреннего генератора

синтезатора частот 3 (на схеме не обозначен), который вырабатывает сигнал с частотой f_2 , поступающий на его вход 2 и который полностью синхронизирован с входным опорным сигналом с частотой f_0 . С выхода 2 синтезатора частот 3 сигнал с частотой $f_2 = mf_0$ поступает на вход 2 испытываемого преобразователя частот 5, в котором он преобразуется в сигнал промежуточной частоты $f_2 \pm f_1$ при помощи гетеродинного сигнала с частотой f_1 , поступающего на его порт 3 от гетеродина 6. С выхода 2 испытываемого смесителя 5 сигнал промежуточной частоты $f_2 \pm f_1$ поступает на вход 1 векторного вольтметра 7, на вход 2 которого поступает сигнал с частотой $nf_0 = f_2 \pm f_1$, образованный умножением сигнала опорной частоты f_0 , в генераторе комбинационных частот 4, поступающего на его вход 1 через одно из плеч делителя 2 от опорного генератора 1. Векторный вольтметр при этом измеряет отношения напряжений для преобразования частоты вверх

$$\Delta U_n^{(1)} e^{-j\Delta\varphi_n^{(1)}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (1.1)$$

$$\Phi_1 = \left[{}^2X_{21}^{(F)} e^{-j\varphi_1^{(2)}} \right] \left[{}^3X_{2m}^{(F)} e^{-j\varphi_m^{(3)}} \right] \times \\ \times \left[{}^5X_{22,11}^{(S)} e^{-j\varphi_n^{(S)}} \right],$$

$$\Phi_2 = \left[{}^2X_{31}^{(F)} e^{-j\varphi_2^{(2)}} \right] \left[{}^4X_{2n}^{(F)} e^{-j\varphi_n^{(4)}} \right],$$

Рис. 3. Схема калибровки при измерениях X -параметров

где ΔU — отношение амплитуд гармоник с номером n на портах 1 и 2 векторного вольтметра 7; j — мнимая единица; $\varphi_1^{(2)}$ — сдвиг фаз плеча делителя 2 между первым и вторым портом на частоте f_0 , $\varphi_m^{(3)}$ — истинный сдвиг фаз между портами 1 и 2 синтезатора частот 3 при преобразовании из частоты f_0 в частоту $f_2 = mf_0$, $\varphi_n^{(S)}$ — истинный сдвиг фаз испытуемого смесителя 5 при преобразовании частоты вверх $f_2 + f_1$, $\varphi_2^{(2)}$ — сдвиг фаз плеча делителя 2 между первым и вторым портами на частоте f_0 , $\varphi_n^{(4)}$ — истинный сдвиг фаз между гармоникой nf_0 на выходе генератора комбинационных частот 4 и сигналом с частотой f_0 , подаваемым на его вход.

Аналогичное выражение может быть записано для преобразования частоты вниз

$$\Delta U_n^{(2)} e^{-j\Delta\varphi_n^{(2)}} = \frac{\Psi_1}{\Psi_2}, \quad (1.2)$$

$$\Psi_1 = \left[{}^2X_{21}^{(F)} e^{-j\varphi_1^{(2)}} \right] \left[{}^3X_{2m}^{(F)} e^{-j\varphi_m^{(2)}} \right] \times \\ \times \left[{}^5X_{22,11}^{(T)} e^{-j\varphi_n^{(T)}} \right],$$

$$\Psi_2 = \left[{}^2X_{31}^{(F)} e^{-j\varphi_2^{(2)}} \right] \left[{}^4X_{2n}^{(F)} e^{-j\varphi_n^{(4)}} \right],$$

где $\varphi_n^{(T)}$ — истинный сдвиг фаз испытуемого смесителя 5 при преобразовании частоты вниз $f_2 - f_1$.

В терминах только сдвигов фаз выражения (1.1) и (1.2) могут быть переписаны следующим образом.

Разность фаз при преобразовании частоты вверх, можно представить

$$\Delta\varphi_n^{(1)} = \left[\varphi_1^{(2)} + \varphi_m^{(3)} + \varphi_n^{(S)} \right] - \\ - \left[\varphi_2^{(2)} + \varphi_n^{(4)} \right]. \quad (1.3)$$

А для преобразования частоты вниз

$$\Delta\varphi_n^{(2)} = \left[\varphi_1^{(2)} + \varphi_m^{(3)} + \varphi_n^{(T)} \right] - \left[\varphi_2^{(2)} + \varphi_n^{(4)} \right].$$

Таким образом, в ходе измерений получают величины $\Delta U_n^{(1)} e^{-j\Delta\varphi_n^{(1)}}$ и $\Delta U_n^{(2)} e^{-j\Delta\varphi_n^{(2)}}$. Однако для нахождения искомых величин коэффициентов передачи испытуемого смесителя ${}^5X_{22,11}^{(S)} e^{-j\varphi_n^{(S)}}$ и ${}^5X_{22,11}^{(T)} e^{-j\varphi_n^{(T)}}$ необходимо определить значение величин ${}^2X_{21}^{(F)} e^{-j\varphi_1^{(2)}}$, ${}^2X_{31}^{(F)} e^{-j\varphi_2^{(2)}}$, ${}^3X_{2m}^{(F)} e^{-j\varphi_m^{(3)}}$ и ${}^4X_{2n}^{(F)} e^{-j\varphi_n^{(4)}}$. Для этих целей собирают новую схему измерений, изображенную на рис. 3 и 4.

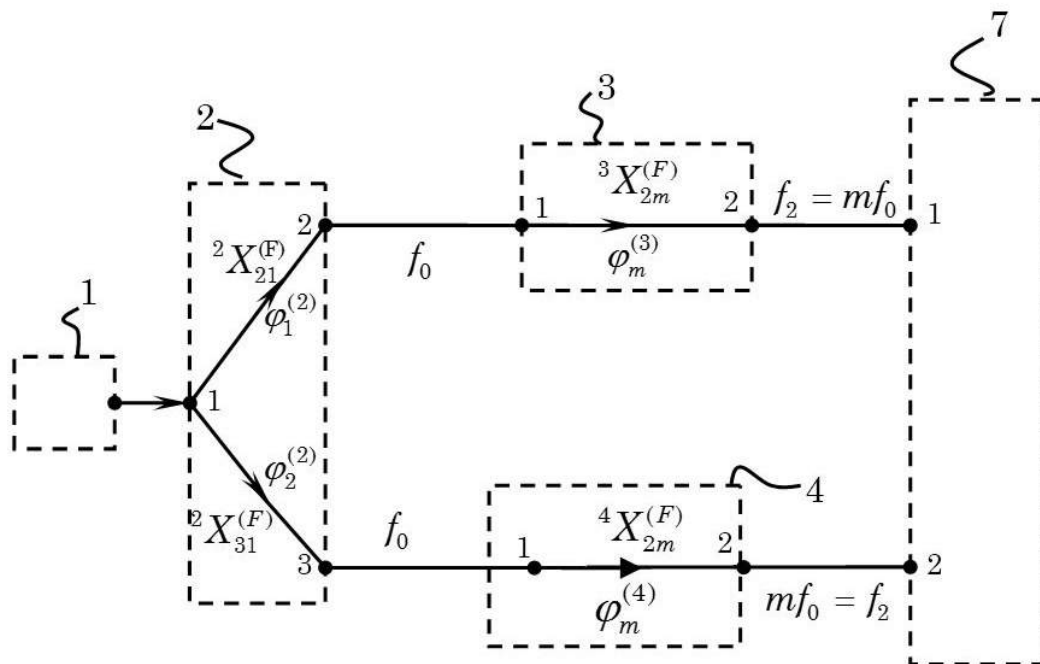


Рис. 4. Граф схемы калибровки смесителя

Работа схемы, представленной на рис. 3, аналогична схеме на рис. 1. Синтезатор частот 3 присоединяют к векторному вольтметру 7 напрямую без испытуемого смесителя. При этом частоту $f_2 = nf_0$ оставляют прежней. Векторный вольтметр 7 измеряет отношение амплитуд и разность фаз на его портах уже на частоте f_2 . Это обеспечивается тем, что супергетеродинный приемник векторного вольтметра автоматически настраивается на нужную гармонику с частотой $mf_0 = f_2$ сигнала от генератора комбинационных частот 4.

Таким образом, векторный вольтметр 7 измеряет отношение амплитуд вида

$$\Delta U_m e^{-j\Delta\varphi_m} = \frac{\Theta_1}{\Theta_2}, \quad (1.4)$$

$$\Theta_1 = \left[{}^2X_{21}^{(F)} e^{-j\varphi_1^{(2)}} \right] \left[{}^3X_{2m}^{(F)} e^{-j\varphi_m^{(3)}} \right]$$

$$\Theta_2 = \left[{}^2X_{31}^{(F)} e^{-j\varphi_2^{(2)}} \right] \left[{}^4X_{2m}^{(F)} e^{-j\varphi_m^{(4)}} \right]$$

и разность фаз

$$\Delta\varphi_m = \varphi_1^{(2)} + \varphi_m^{(3)} - \varphi_2^{(2)} - \varphi_m^{(4)}. \quad (1.5)$$

Решая (1.3) и (1.5) относительно $\varphi_n^{(S)}$, получаем

$$\varphi_n^{(S)} = \Delta\varphi_n^{(1)} - \Delta\varphi_m + \varphi_n^{(4)} - \varphi_m^{(4)}.$$

Очевидно, что для $\varphi_n^{(T)}$ выражение будет аналогичным, поэтому можно записать

$$\varphi_n^{(S,T)} = \Delta\varphi_n^{(1,2)} - \Delta\varphi_m + \varphi_n^{(4)} - \varphi_m^{(4)} \quad (1.6)$$

Тут имеется в виду, что в случае, если в левой части равенства будет выбрана φ с верхним индексом S , то в правой части равенства надо выбирать $\Delta\varphi$ с верхним индексом 1. И соответственно в случае с T , надо выбирать $\Delta\varphi$ с верхним индексом 2. Остальные слагаемые в правой части не меняются.

Аналогично решая (1.1), (1.2) и (1.4) относительно ${}^5X_{22,11}^{(S)}$ и ${}^5X_{22,11}^{(T)}$, получим

$${}^5X_{22,11}^{(S,T)} = \frac{{}^4X_{2n}^{(F)} \Delta U_n^{(1,2)}}{{}^4X_{2m}^{(F)} \Delta U_m}. \quad (1.7)$$

Параметры $\Delta U_n^{(1)}$, ΔU_m , $\Delta U_n^{(2)}$, $\Delta\varphi_n^{(1)}$, $\Delta\varphi_n^{(2)}$, $\Delta\varphi_m$ получены в ходе двух измерений. Значения ${}^4X_{2n}^{(F)}$, ${}^4X_{2m}^{(F)}$, $\varphi_n^{(4)}$, $\varphi_m^{(4)}$ являются паспортными параметрами генератора комбинационных частот 3 и предоставляются заводом-изготовителем.

Применяя формулу погрешностей косвенных измерений для выражений (1.6) и

(1.7), можно оценить погрешность определения комплексного коэффициента передачи испытуемого смесителя методом X -параметров. Для этого вычислим частные производные выражения (1.7), в итоге выражение для амплитудной погрешности метода X -параметров примет вид

$$\begin{aligned} \delta^5 X_{22,11}^{(S,T)} = & \left\{ \left[\frac{4X_{2n}^{(F)}}{4X_{2m}^{(F)} \Delta U_m} \right]^2 [\delta \Delta U_n^{(1,2)}]^2 + \right. \\ & + \left. \left[\frac{\Delta U_n^{(1,2)}}{4X_{2m}^{(F)} \Delta U_m} \right]^2 [\delta \Delta^4 X_{2n}^{(F)}]^2 + \dots \right\} \times \\ & \times \left\{ \dots + \left[\frac{4X_{2n}^{(F)} \Delta U_n^{(1,2)}}{4X_{2m}^{(F)} [\Delta U_m]^2} \right]^2 [\delta \Delta U_m]^2 + \right. \\ & + \left. \left[\frac{4X_{2n}^{(F)} \Delta U_n^{(1,2)}}{[4X_{2m}^{(F)}]^2 \Delta U_m} \right]^2 [\delta^4 X_{2m}^{(F)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

А выражение погрешности по фазе записывается

$$\delta \varphi_n^{(S,T)} = \delta \Delta \varphi_n^{(1,2)} + \delta \Delta \varphi_m + \delta \varphi_n^{(4)} + \delta \varphi_m^{(4)}.$$

Проанализируем полученные результаты. Коэффициенты $\delta \Delta U_n^{(1,2)}$, ΔU_m , $\delta \Delta \varphi_n^{(1,2)}$ и $\delta \Delta \varphi_m$ являются аппаратными погрешностями векторного вольтметра и могут быть вычислены в общем виде. Однако погрешности $\delta^4 X_{2n}^{(F)}$, $\delta^4 X_{2m}^{(F)}$, $\delta \varphi_n^{(4)}$, $\delta \varphi_m^{(4)}$ принадлежат генератору комбинационных частот. Их можно определить только экспериментально. Но создатели технологии X -параметров в лице компании Agilent Technologies нигде в своих публикациях не упоминают о том, как измеряются эти погрешности. Более того, сами по себе величины $\varphi_n^{(4)}$ и $\varphi_m^{(4)}$ также неизвестны. В паспорте на генератор комбинационных частот U9391 производства Keysight Technologies [8] приводится лишь неравномерность фазового распределения между гармониками в диапазоне частот от 10 МГц до 67 ГГц.

По этой причине единственный способ определения величин $\varphi_n^{(4)}$, $\varphi_m^{(4)}$ — непосредственные их измерения. В данном случае это означает измерение истинного фазового сдвига, который генератор комбинационных частот вносит в входной сигнал при его преобразовании в одну из гармоник.

Заключение

Динамический диапазон измерений методом X -параметров мало зависит от частоты зондирующих сигналов, потому что в отличие от других известных методов в этом методе отсутствуют частотно-зависимые паразитные каналы приема.

Измерение истинного сдвига фаз генератора комбинационных частот есть не что иное, как измерение истинного фазового сдвига обыкновенного преобразователя частоты. По этой причине измерение комплексного коэффициента передачи испытуемого смесителя методом X -параметров при помощи генератора комбинационных частот, есть не что иное, как измерение этих параметров относительно опорного преобразователя частоты, вместо которого выступает генератор комбинационных частот. Отсюда следует вывод, что при определении матриц рассеяния преобразователей частоты методом X -параметров невозможно определить истинные фазочастотные характеристики этих преобразователей, если неизвестны истинные фазочастотные характеристики опорного генератора комбинационных частот. При этом стоит отметить, что генератор комбинационных частот является гораздо более широкополосным устройством по сравнению с любым смесителем и поэтому он значительно более универсален в использовании.

Литература

1. *Verspecht J.* Calibration of a measurement system for high frequency nonlinear devices. Brussel: Vrije Universiteit Brussel, 1995. 216 p.
2. *Root D. E., Horn J., Betts L., Gillese C., Verspecht J.* X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components // *Microwave Engineering Europe*. 2008. December. P. 16–21.
3. *David Vye* Fundamentally changing nonlinear microwave design // *Microwave journal*. 2010. Vol. 53. No. 3. P. 22–38.
4. *Verspecht J., Root D. E.* Polyharmonic distortion modeling // *IEEE microwave magazine*. 2006. Vol. 7. Iss. 3. June. P. 44–57.
5. *Dunsmore J.* A new method for mixer delay measurements that requires no calibration mixer // *41st European microwave conference (EuMC) IEEE*. Manchester. 2011. P. 480–483.
6. *Scott J., Hoy M.* Group-Delay measurement of frequency-converting devices using a comb generator // *IEEE transactions on*

- instrumentation and measurement. 2010. Vol. 59. Iss. 11. P. 3012–3017.
7. *Dunsmore J. P.* System for characterizing mixer or converter response. Patent Application US 2012/0295548 A1 United States of America, Int. Cl. H 04 B 17/00. assignee Agilent Technologies Inc.–13/110,129; filed May 18, 2011; pub. Date Nov 22, 2012.
 8. U9391C/F/G comb generators. Technical overview 5989–7619EN. Keysight Technologies. 2014. 11 p.
 9. *Read R.* The Essence of communication theory. London: Prentice Hall, 1998. 240 p.
 10. *David D.* New techniques simplify military Frequency-converter characterization // Microwave product digest. May 2012. No. 1. P. 52, 76–78, 80.
 4. Verspecht J., Root D.E. Polyharmonic Distortion Modeling. *IEEE microwave magazine*, 2006, vol. 7, iss. 3, June, pp. 44–57.
 5. Dunsmore J. A new method for mixer delay measurements that requires no calibration mixer. In *41st European microwave conference (EuMC) IEEE*, Manchester, 2011, pp. 480–483.
 6. Scott J., Hoy M. Group-delay measurement of frequency-converting devices using a comb generator. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2010, vol. 59, iss. 11, pp. 3012–3017.
 7. *Dunsmore J. P.* System for characterizing mixer or converter response. Patent Application US 2012/0295548 A1 United States of America, Int. Cl. H 04 B 17/00. assignee Agilent Technologies Inc.–13/110,129; filed May 18, 2011; pub. Date Nov 22, 2012.
 8. U9391C/F/G comb generators. Technical overview 5989–7619EN. Keysight Technologies. 2014. 11 p.
 9. *Read R.* The essence of communication theory. London, Prentice Hall, 1998. 240 p.
 10. *David D.* New techniques simplify military frequency-converter characterization. *Microwave Product Digest*, 2012, no. 1, May, pp. 52, 76–78, 80.

References

1. Verspecht J. *Calibration of a measurement system for high frequency nonlinear devices*. Brussel, Vrije Universiteit Brussel, 1995, 216 p.
2. Root D. E., Horn J., Betts L., Verspecht J., X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components. In *Microwave Engineering Europe*, 2008, December, pp. 16–21.
3. David Vye. Fundamentally changing nonlinear microwave design *Microwave journal*, 2010, vol. 53, no. 3, pp. 22–38.

Статья поступила 21 апреля 2015 г.

© Фролов Д. Р., Левченко А. С., Коротков К. С., Бабенко А. А., 2015