

## Особенности определения комплексных коэффициентов передачи преобразователей частоты методами совокупных измерений

Д. Р. ФРОЛОВ, А. А. БАБЕНКО, А. Э. БИРЮК, В. В. КОЖЕВНИКОВ, А. А. СВИДЛОВ

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, e-mail: frolov.drf@gmail.com

Рассмотрены причины, ограничивающие точность измерений комплексных коэффициентов передачи преобразователей частоты методами на основе различных комбинаций параллельного и последовательного соединений указанных преобразователей. Такие измерения нельзя выполнять без использования взаимных преобразователей частоты. Установлено, что предельная точность данных методов измерений определяется степенью взаимности как минимум одного преобразователя частоты.

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотный смеситель, преобразователь частоты, нелинейный векторный анализ цепей, комплексный коэффициент передачи.

The reasons that limit accuracy of frequency converters frequency response measurements that are based on different combinations of parallel and serial connection of frequency converters have been considered. It is demonstrated that the carrying out of such measurements without using reciprocal frequency converters is not possible. It was discovered that the ultimate accuracy of such measurements was determined by the reciprocity degree of at least one of the frequency converters involved in the measurement process.

**Key words:** RF mixer, frequency converter, vector network analyzer, frequency response.

Для описания электрических характеристик сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств были разработаны системы  $T$ -параметров в виде матрицы передачи и  $S$ -параметров в виде матрицы рассеяния. Такие системы получили чрезвычайно широкое распространение [1]. Особенность системы  $S$ -параметров в том, что она содержит элементы, характеризующие коэффициенты отражения входа и выхода и коэффициенты передачи описываемого четырёхполюсника, это особенно важно в СВЧ-диапазоне. Системы  $T$ - и  $S$ -параметров служат для описания линейных СВЧ-устройств, сами являются линейными системами, и для их определения требуются режимы холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки. При этом элементы  $T$ - и  $S$ -матриц — комплексные величины, для их описания необходимо знать модуль и фазу каждого элемента, которые для СВЧ-четырёхполюсников легко найти традиционными способами. Полнота описания характеристик линейных СВЧ-устройств с помощью системы  $S$ -параметров и соответствие её элементов реальным физическим процессам с некоторыми допущениями позволяют применять эту систему для описания характеристик и нелинейных СВЧ-устройств, т. е. преобразователей частоты. Однако возникает следующая проблема. Для получения полной системы  $S$ -параметров, характеризующих преобразователь частоты, необходимо кроме модулей знать и

фазы элементов матрицы рассеяния. В [2] сообщалось, что определить фазу комплексного коэффициента передачи (ККП) преобразователя частоты традиционными методами невозможно, поскольку на его входе и выходе присутствуют сигналы различных частот и сравнение их по фазе теряет смысл.

Таким образом, существует измерительная задача, связанная с нахождением комплексных коэффициентов отражения и передачи нелинейных СВЧ-устройств и, в частности, ККП преобразователей частоты. Любой современный импортный векторный анализатор цепей содержит опции измерения параметров устройств с преобразованием частоты, и эти опции постоянно совершенствуются. В РФ в настоящее время отсутствует метрологическое обеспечение измерителей ККП преобразователей частоты, не ведётся разработка и не налажен выпуск таких приборов. За рубежом — это динамично развивающаяся отрасль науки и техники, однако в работах зарубежных авторов описаны лишь методики измерений, но практически не уделяется внимание некоторым важным вопросам метрологии, например определению минимальной погрешности измерений фазы ККП преобразователя частоты. Предлагаемый в настоящей статье анализ позволяет дать ответ на этот вопрос.

**Взаимность преобразователя частоты.** Вначале рассмотрим свойство взаимности  $n$ -полюсника применительно к преобразователю частоты. В общем случае СВЧ-устройство является взаимным, если его матрица рассеяния симметрична:  $S_{ij} = S_{ji}$  [3]. Заметим, что преобразователь частоты можно описывать различными способами. Наиболее полным с точки зрения учёта всех процессов в преобразователе будет его представление в виде восьмиполюсника. Одно плечо преобразователя является СВЧ-входом, второе — выходом промежуточной частоты (ПЧ), третье — входом сигнала гетеродина, в четвёртое плечо устанавливают нелиней-

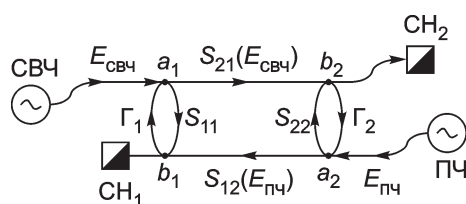


Рис. 1. Направленный граф четырёхполюсника с преобразованием частоты

ный элемент (в простейшем случае — диод) [2]. Для упрощения преобразователь частоты будем рассматривать как четырёхполюсник, который содержит нелинейный элемент (СВЧ-преобразователь) и гетеродин. Также он имеет две пары полюсов, работающих в СВЧ- и ПЧ-диапазонах, называемых СВЧ- и ПЧ-портами, порты могут функционировать в режимах и входа, и выхода. Это означает, что сигнал поступает в СВЧ-порт, преобразуется внутри четырёхполюсника и появляется в ПЧ-порте, но уже с другими частотой, амплитудой и фазой. Аналогичный процесс происходит при входе сигнала в ПЧ-порт: из СВЧ-порта выходит преобразованный по частоте сигнал. Направленный граф такого четырёхполюсника изображён на рис. 1, где СВЧ-вход преобразователя частоты обозначен сечением  $a_1 - b_1$  и имеет коэффициент отражения  $S_{11}$ ; ПЧ-выход — сечением  $a_2 - b_2$  и имеет коэффициент отражения  $S_{22}$ . Коэффициенты передачи по модулю и фазе при преобразовании входного сигнала из СВЧ в ПЧ и наоборот обозначены  $S_{21}(E_{\text{СВЧ}})$  и  $S_{12}(E_{\text{ПЧ}})$ , соответственно. При прямом режиме работы СВЧ—ПЧ сигнал  $E_{\text{СВЧ}}$  поступает от СВЧ-генератора, преобразовывается в ПЧ-сигнал на пути от полюса  $a_1$  к полюсу  $b_2$  с коэффициентом передачи  $S_{21}(E_{\text{СВЧ}})$  и поглощается в согласованной нагрузке  $CH2$ . При обратном режиме работы ПЧ—СВЧ сигнал  $E_{\text{ПЧ}}$  поступает от ПЧ-генератора, преобразовывается в СВЧ-сигнал на пути от полюса  $a_2$  к полюсу  $b_1$  с коэффициентом передачи  $S_{12}(E_{\text{ПЧ}})$  и поглощается в согласованной нагрузке  $CH1$ . Полностью взаимным преобразователем частоты будем считать преобразователь, у которого соблюдается равенство как по модулю, так и по фазе коэффициентов отражения  $S_{21}(E_{\text{СВЧ}}) = S_{12}(E_{\text{ПЧ}})$  [4]. Также будем полагать степени взаимности преобразователя частоты: по модулю — это отличие от единицы модуля отношения  $S_{21}(E_{\text{СВЧ}})/S_{12}(E_{\text{ПЧ}})$ ; по фазе — это отличие от нуля разности фаз  $S_{21}(E_{\text{СВЧ}}) - S_{12}(E_{\text{ПЧ}})$ .

Описание и анализ основных методов измерения ККП преобразователей частоты приведены в [2]. Для краткости будем далее рассматривать только измерение фазы ККП. В большинстве случаев ККП определяют совокупными методами: измеряют параметры нескольких пар преобразователей частоты. Некоторые пары содержат испытываемый преобразователь, а остальные преобразователи являются вспомогательными. При этом существует всего два способа соединения: последовательное либо параллельное, соответствующих измерениям суммы либо разности ККП пары преобразователей частоты (в единицах логарифмической шкалы). Известные методы измерений [5—7], за исключением метода [8], базируются на различных комбинациях таких схем соединения преобразователей частоты. Важной составляющей погрешности определения фазы ККП преобразователя частоты является нестабильность фазовых сдвигов в СВЧ-соединителях, приводящая к накоплению погрешностей измерений сдвига фаз при соединениях и переключениях трактов. Источником погрешности измерения ККП также является паразитная связь между каналами векторного вольтметра, которая сужает динамический диапазон измерений. Эти погрешности можно минимизировать, если все переключения, реализующие режимы метода совокупных измерений, осуществлять в низкочастотном диапазоне, где отражения в соединителях трактов не так велики, как в СВЧ-диапазоне [9]. Ещё один способ уменьшения этих погрешностей — применение делителей сигналов с высокой развязкой между плечами.

В процессе исследований выяснилось, что существует принципиальное ограничение точности любых методов со-

вокупных измерений ККП преобразователей частоты при их параллельном и последовательном соединениях. Это ограничение невозможно устранить путём совершенствования используемых радиоизмерительных приборов. Согласно методу трёх сумм [6, 7] для определения ККП испытываемого преобразователя частоты требуются два опорных преобразователя. Каждый из них последовательно соединяют с испытываемым преобразователем для измерения суммарного ККП  $K_{\Sigma}$ . При использовании метода суммы и разности [5] необходим один опорный преобразователь, который соединяют с испытываемым сначала последовательно для измерения суммарного ККП  $K_{\Sigma}$ , а потом параллельно для измерения разностного ККП  $K_{\Delta}$ . Таким образом, для метода трёх сумм и метода суммы и разности имеем, соответственно:

$$\left. \begin{aligned} K_x K_1 &= K_{\Sigma 1}; \\ K_x K_2 &= K_{\Sigma 2}; \\ K_1 K_2 &= K_{\Sigma 3}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} K_x K_1 &= K_{\Sigma}; \\ K_x / K_1 &= K_{\Delta}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $K_x$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  — соответственно модули ККП испытываемого, первого и второго опорных преобразователей частоты.

Аналогично можно записать выражения для фазы ККП:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x + \varphi_1 &= \varphi_{\Sigma 1}; \\ \varphi_x + \varphi_2 &= \varphi_{\Sigma 2}; \\ \varphi_1 + \varphi_2 &= \varphi_{\Sigma 3}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x + \varphi_1 &= \varphi_{\Sigma}; \\ \varphi_x - \varphi_1 &= \varphi_{\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Схематически соединение преобразователей частоты в виде четырёхполюсников с преобразованием частоты для обоих методов изображено на рис. 2. Из систем (1)—(4) и рис. 2 можно сделать вывод, что при использовании этих методов всегда необходим опорный преобразователь частоты, у которого в процессе одного измерения ПЧ-порт работает как вход, СВЧ-порт — как выход, а в процессе любого другого измерения наоборот: СВЧ-порт служит входом, ПЧ-порт — выходом. Данное обстоятельство накладывает серьезные ограничения на опорный преобразователь, потому что он должен обладать свойством взаимности. Таким образом, актуален вопрос, можно ли создать метод измерения ККП испытываемого преобразователя частоты, основанный на различных комбинациях последовательных и параллельных соединений преобразователей, при условии, что ко всем опорным и испытываемому преобразователям можно не предъявлять требование взаимности. Такому условию удовлетворяет, например, метод трёх разностей, для которого справедливы равенства

$$\left. \begin{aligned} K_x / K_1 &= K_{\Delta 1}; \\ K_x / K_2 &= K_{\Delta 2}; \\ K_1 / K_2 &= K_{\Delta 3}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x - \varphi_1 &= \varphi_{\Delta 1}; \\ \varphi_x - \varphi_2 &= \varphi_{\Delta 2}; \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= \varphi_{\Delta 3}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

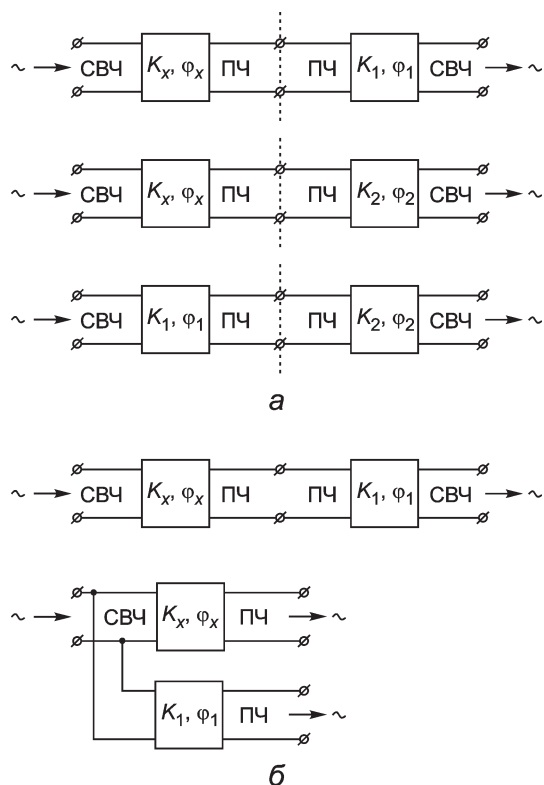


Рис. 2. Соединение преобразователей частоты в виде четырёхплюсников с преобразованием частоты для измерений методом трёх сумм (а) и методом суммы и разности (б)

Действительно, при таком способе соединения каждый преобразователь частоты всё время работает в каком-нибудь одном режиме преобразования (из СВЧ- в ПЧ-диапазон либо наоборот), и ни к одному преобразователю не требуется предъявлять условие взаимности. Однако при указанном способе соединения системы (5), (6) имеют бесконечное множество решений. Рассмотрим общий случай. Допустим, что имеется метод измерения модуля и фазы ККП преобразователя частоты, который позволяет избежать для каждого из преобразователей одновременного преобразования «вверх» и «вниз» во всей серии измерений. Тогда все преобразователи, включая испытываемый, можно разделить на две группы: выполняющих преобразование частоты из ПЧ в СВЧ либо наоборот. Обозначим фазы ККП каждого преобразователя из первой и второй групп соответственно  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ );  $\psi_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Тогда в рамках эксперимента можно измерять разность фаз ККП преобразователей частоты, принадлежащих одной группе (поскольку не имеет смысла сравнивать преобразователи, выходные сигналы которых лежат в разных диапазонах частот), или сумму фаз ККП преобразователей из разных групп. Вся серия таких измерений описывается системой

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i - \varphi_j &= \Delta\varphi_{ij} (i \neq j); \\ \varphi_i + \psi_k &= \Sigma\varphi_{ik}; \\ \psi_k - \psi_j &= \Delta\psi_{kj} (k \neq j). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Если прибавить к каждому  $\varphi$  и вычесть из каждого  $\psi$  некоторое значение  $\delta$ , то можно получить те же значения в столбце свободных коэффициентов системы (7):

$$\left. \begin{aligned} (\varphi_i + \delta) - (\varphi_j + \delta) &= \Delta\varphi_{ij} (i \neq j); \\ (\varphi_i + \delta) + (\psi_k + (-\delta)) &= \Sigma\varphi_{ik}; \\ (\psi_k + (-\delta)) - (\psi_j + (-\delta)) &= \Delta\psi_{kj} (k \neq j). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, система (8) имеет бесконечное множество решений. Аналогичная ситуация складывается для модулей ККП. На практике это означает, что при любой серии измерений как минимум один преобразователь частоты (лучше опорный) должен обладать свойством взаимности, т. е. иметь одинаковый ККП в случае преобразования сигнала из СВЧ- в ПЧ-диапазон и наоборот.

**Выводы.** Системы (7), (8) можно обобщить на любое количество преобразователей частоты в любых сочетаниях соединений, но они всегда будут иметь бесконечное множество решений. Отсюда следует, что требование взаимности хотя бы одного преобразователя будет принципиальным ограничением точности определения ККП преобразователей частоты с применением методов на основе измерений суммарных и разностных ККП различным образом каскадно соединенных преобразователей. При использовании одного опорного взаимного преобразователя частоты погрешности определения фазы и модуля ККП испытываемого преобразователя прямо зависят от степени взаимности по фазе и модулю опорного преобразователя. Однако модуль ККП можно найти и другими методами, например с помощью анализатора спектра. Поэтому обеспечение взаимности опорного преобразователя частоты особенно важно именно при определении фазы ККП.

В РФ необходимо разрабатывать метрологическую базу для обеспечения единства измерений параметров нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты, как это сделано, например, в США [4]. Требуется налаживать выпуск отечественных векторных анализаторов нелинейных цепей, для чего провести комплекс исследований. Цели исследований — выяснение возможности физической реализации взаимного преобразователя частоты (поскольку для преобразователей частоты, рассмотренных в [10], условие взаимности по модулю и фазе выполнялось не полностью) и установление источников уменьшения взаимности по модулю и фазе преобразователя. Теоретические работы в этом направлении в настоящее время ведутся на кафедре оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

В заключение отметим, что в США обеспечение единства измерений параметров нелинейных СВЧ-устройств с преобразованием частоты потребовало создания принципиально нового типа эталона — генератора комбинационных частот с известным фазовым распределением между гармониками [11], в РФ такой эталон пока отсутствует.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-47-230348 p\_a.

#### Литература

1. **Dunsmore J. P.** Handbook of Microwave Component Measurements With Advanced VNA Techniques. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

2. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 8. С. 873—880.

3. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. N. Y.: IEEE Press, 1988.

4. 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. No. 12. P. 16—21.

5. А. с. 1596278 СССР. Способ определения коэффициентов передачи четырёхполюсников с преобразованием частоты / К. С. Коротков // Открытия. Изобретения. 1990. № 9.

6. Пат. 2029966 РФ. Способ определения коэффициентов передачи преобразователей частоты / А. С. Елизаров (Белоруссия) // Изобретения. 1995. № 2.

7. Pat. 6,064,694 USA. Frequency Translating Device Transmission Response System / C. J. Clark, A. A. Moulthrop, M. S. Muha, C. P. Silva, 2000.

8. Novel Method for Vector Mixer Characterization and Mixer Test System Vector Error Correction [Электрон. версия] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-7826EN.pdf> (дата обращения: 20.02.2017).

9. Коротков К. С., Фролов Д. Р. Новый метод измерений комплексных параметров сверхвысокочастотных смесителей // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 54—57.

10. Van Moer W., Rolain Y. Determining the Reciprocity of Mixers Through Three-Port Signal Network Analyzer Measurements // IEEE Trans. on Instrum. and Measur. 2007. V. 56. No. 5. P. 2051—2056.

11. Pat. 2012/0295548 A1 USA. System For Characterizing Mixer or Converter Response / J. P. Dunsmore, 2012.

Дата принятия: 21.07.2016.

621.391.832.4:621.317

## Новая методика измерения нелинейных искажений аналоговых перемножителей сигналов

А. В. ЗЕНЬКОВИЧ, В. Л. БАЛЛО, В. Б. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Нижегородский государственный технический университет,  
Нижний Новгород, Россия, e-mail: avzen@nntu.ru

Экспериментально подтверждены преимущества новой методики измерения нелинейных искажений аналоговых перемножителей сигналов по чувствительности, разрешающей способности, диапазону частот и простоте реализации.

**Ключевые слова:** нелинейные искажения, аналоговые перемножители.

The new nonlinear distortion measurement technique for analog multipliers is proposed and studied. Improved sensitivity, resolution, frequency band and simplicity of realization are experimentally verified.

**Key words:** nonlinear distortion, analog multipliers.

Аналоговые перемножители сигналов (АПС) занимают второе место после операционных усилителей по распространённости и разнообразию областей применения. Эти перемножители используют в качестве смесителей, фазовых и синхронных амплитудных детекторов, амплитудных модуляторов различных видов, элементов частотных детекторов и т. д. [1]. Частотный диапазон, в котором применяют АПС, начинается со звуковых частот и включает сверхвысокие частоты. Большое число интегральных микросхем АПС выпускают зарубежные фирмы, в первую очередь Analog Device (США). Характеристики таких микросхем непрерывно улучшаются. Одним из важных параметров АПС является уровень вносимых ими нелинейных искажений. Общепринятым критерием нелинейности на низких и радиочастотах служит коэффициент гармоник  $K_f$  или THD (Total Harmonic Distortion). На высоких и сверхвысоких частотах зарубежные изготовители интегральных микросхем широко используют в качестве критерия нелинейности точки пересечения интермоду-

ляции второго и третьего порядков (Second Order and Third Order Intercept). Эти параметры эквивалентны коэффициентам комбинационных искажений, измеряемым с помощью суммы двух входных напряжений с различными частотами и равными амплитудами.

Известная методика измерений нелинейных искажений АПС рассмотрена в [2]. Она основана на работе трёх высокочастотных генераторов и выходного измерительного тракта, состоящего из измерителя коэффициента амплитудной модуляции и низкочастотного анализатора спектра. Основные недостатки данной методики обусловлены использованием измерителя коэффициента амплитудной модуляции. Область применения таких приборов ограничена, поэтому номенклатура и объём их выпуска небольшие. Отечественный измеритель СКЗ-45 имеет минимальный измеряемый уровень входного напряжения 50 мВ. Амплитудные шумы измерителей коэффициента амплитудной модуляции во много раз больше шумов высокочастотных генераторов и анализа-