

Сравнительный анализ методов определения комплексных коэффициентов передачи сверхвысокочастотных смесителей

К. С. КОРОТКОВ, Д. В. НЕРЕУЦКИЙ, А. А. БАБЕНКО, Д. Р. ФРОЛОВ

*Кубанский государственный университет,
Краснодар, Россия, e-mail: akbabenko@mail.ru*

Проведён сравнительный анализ двух методов определения комплексных коэффициентов передачи нелинейных элементов при гетеродинном преобразовании частоты. На основе анализа существующих методов рассмотрены особенности построения приборов для измерения параметров устройств с преобразованием частоты. Описаны источники основных погрешностей: взаимности опорного смесителя и амплитудно-фазовая.

Ключевые слова: нелинейный элемент, СВЧ-смеситель, векторный анализатор цепей, метод суммы и разности, метод трёх сумм.

We conducted a comparative analysis of two methods for determining the frequency response of nonlinear elements in the heterodyne frequency conversion. Based on the analysis of existing methods, the features of the instrumentation design for the characterization of the devices with frequency conversion are discussed. We determined the sources of measurement errors such as the error based on reciprocity of the additional mixer and the amplitude-phase error.

Key words: nonlinear element, microwave mixer, vector network analyzer, sum and difference method, three sums method.

Основным элементом любого устройства, содержащего

преобразователь частоты или сверхвысокочастотный (СВЧ) смеситель, является нелинейное сопротивление с нелинейной вольтамперной характеристикой. В качестве такого элемента в СВЧ-диапазоне используется либо полупроводниковый диод, либо транзистор [1, 2]. В состав каждого полупроводникового прибора с нелинейным сопротивлением входят реактивные элементы в виде ёмкости p - n -перехода или индуктивности объёма полупроводника, по которому протекает переменный ток. Любой реактивный элемент (реактивное сопротивление) вносит в протекающий через него ток время задержки, что оказывается причиной сдвига фаз между сигналами на входе и выходе нелинейного сопротивления. Таким образом, сдвиг фаз СВЧ-смесителя зависит от частоты и амплитуды тока, протекающего через нелинейное сопротивление, носит нелинейный характер и является причиной искажений в преобразуемом сигнале.

В случае гетеродинного преобразования частоты сигналы на входе и выходе нелинейного сопротивления имеют разные частоты. Поэтому для определения возникающих сдвигов фаз между сигналом промежуточной частоты и СВЧ-сигналом нельзя применять непосредственное измерение с помощью векторного анализатора цепей. В этих случаях чаще всего используют методы определения (измерения с последующим вычислением) сдвига фаз, который обусловлен нелинейным сопротивлением смесителя при гетеродинном преобразовании в сигнал промежуточной частоты, – метод суммы и разности и метод трёх сумм [3–5].

Если при гетеродинном преобразовании частота выходного сигнала является суммой частот входного сигнала и сигнала гетеродина, то происходит преобразование частоты вверх, а если

разностью, то преобразование частоты вниз [6]. Метод суммы и разности основан на последовательных измерениях суммы и разности сдвигов фаз двух СВЧ-смесителей, один из которых – испытуемый, а другой – дополнительный. Метод трёх сумм предполагает измерения с помощью векторного анализатора цепей суммы сдвигов фаз трёх пар СВЧ-смесителей, последовательно соединённых портами промежуточной частоты. Один из смесителей выступает в роли испытуемого, а два других – в роли дополнительных. Структурная схема измерения комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей с помощью первого метода приведена на рис. 1. Преобразования частоты соответственно вниз и вверх в этой схеме происходят согласно формулам:

$$|\omega_1 - \omega_2| = \omega_3;$$

$$\omega_2 + \omega_3 = \omega_1,$$

где ω_1 – частота зондирующего СВЧ-сигнала векторного анализатора цепей 1; ω_2 – частота СВЧ-гетеродина 2; ω_3 – промежуточная частота.

Схема работает следующим образом. Сначала измеряют комплексный коэффициент передачи дополнительного СВЧ-смесителя 4 относительно опорного генератора промежуточной частоты 8 на частоте ω_3 с помощью векторного вольтметра 9. При этом первый 5 и второй 6 переключатели находятся во втором положении подвижных контактов, а третий переключатель 7 – в первом положении. Затем во втором положении подвижного контакта третьего переключателя измеряют комплексный коэффициент передачи испытуемого СВЧ-смесителя 3 относительно опорного генератора промежуточной частоты на частоте ω_3 с помощью векторного вольтметра. Наконец, измеряют суммарный комплексный коэффициент передачи

последовательно соединённых испытуемого и дополнительного СВЧ-смесителей на частоте ω_1 с помощью векторного анализатора цепей 1, переводя первый и второй переключатели в первое положение их подвижных контактов.

Обозначим $K_{\text{и}}$, $K_{\text{о}}$, $\varphi_{\text{и}}$, $\varphi_{\text{о}}$ – коэффициенты передачи и сдвиги фаз испытуемого и дополнительного СВЧ-смесителей, соответственно, а $K_{\text{с}}$, $\varphi_{\text{с}}$ – относительную амплитуду и фазу сигнала опорного генератора промежуточной частоты, соответственно. В результате нахождения разности коэффициентов передачи ΔK в логарифмическом масштабе и разности сдвигов фаз $\Delta\varphi$ (см. рис. 1) получим выражения

$$\Delta K = (K_{\text{и}} - K_{\text{с}}) - (K_{\text{о}} - K_{\text{с}});$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_{\text{и}} - \varphi_{\text{с}}) - (\varphi_{\text{о}} - \varphi_{\text{с}}).$$

Измерив сумму коэффициентов передачи ΣK и сумму сдвигов фаз $\Sigma\varphi$ можно записать следующие формулы:

$$\Sigma K = K_{\text{и}} + K_{\text{о}};$$

$$\Sigma\varphi = \varphi_{\text{и}} + \varphi_{\text{о}}.$$

Затем, решив системы уравнений для коэффициентов передачи и сдвигов фаз, найдём значения коэффициента передачи и сдвиг фаз испытуемого смесителя:

$$K_{\text{и}} = (\Sigma K + \Delta K)/2; \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{и}} = (\Sigma\varphi + \Delta\varphi)/2. \quad (2)$$

Следует отметить, что вычисленные таким образом коэффициент передачи $K_{\text{и}}$ и сдвиг фаз $\varphi_{\text{и}}$ будут иметь истинные значения, а не измеренные относительно опорного СВЧ-смесителя или опорного источника сигналов, как это ранее предполагалось в [6, 7].

. Структурная схема измерений комплексного коэффициента

передачи СВЧ-смесителей методом трёх сумм приведена на рис. 2. Обозначим $K_{\text{и}}$, K_1 , K_2 – коэффициенты передачи испытуемого, первого и второго дополнительных смесителей, соответственно, а $\varphi_{\text{и}}$, φ_1 , φ_2 – сдвиги фаз испытуемого, первого и второго дополнительных смесителей, соответственно. Запишем совместно следующие уравнения трёх сумм коэффициентов передачи и сдвигов фаз:

$$\sum_1 K = K_{\text{и}} + K_1; \quad \sum_2 K = K_{\text{и}} + K_2; \quad \sum_3 K = K_1 + K_2;$$

$$\sum_1 \varphi = \varphi_{\text{и}} + \varphi_1; \quad \sum_2 \varphi = \varphi_{\text{и}} + \varphi_2; \quad \sum_3 \varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Теперь можно вычислить значения модуля и сдвига фаз комплексного коэффициента передачи для испытуемого СВЧ-смесителя:

$$K_{\text{и}} = (\sum_1 K + \sum_2 K - \sum_3 K) / 2; \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{и}} = (\sum_1 \varphi + \sum_2 \varphi - \sum_3 \varphi) / 2 \quad (4)$$

Из структурной схемы (см. рис. 2) следует, что в каждой из трёх пар СВЧ-смесители соединены последовательно портами промежуточной частоты, причём как и на рис. 1, $\omega_3 = |\omega_1 - \omega_2|$ при преобразовании частоты вниз и $\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$ – при её преобразовании вверх. Принцип работы схемы заключается в следующем. Сначала измеряют комплексный коэффициент передачи последовательно соединённых испытуемого смесителя 3 и первого дополнительного СВЧ-смесителя 4. Затем вместо первого дополнительного СВЧ-смесителя присоединяют второй дополнительный СВЧ-смеситель 5 и также измеряют комплексный коэффициент передачи. Наконец, такие же измерения проводят для первого и второго дополнительных СВЧ-

смесителей.

При определении с помощью рассмотренных методов сдвига фаз СВЧ-смесителя, вносимого им в преобразуемый сигнал, дополнительные СВЧ-смесители работают как в режиме преобразования частоты вверх, так и в режиме её преобразования вниз. Необходимо доказать, что при преобразовании частоты вверх и вниз сдвиг фаз, вносимый СВЧ-смесителем, не меняется, так как соблюдается принцип взаимности [8]. Следовательно, возникает вопрос о возможности создания способа определения комплексного коэффициента передачи без соблюдения условия взаимности для дополнительного СВЧ-смесителя.

Рассмотрим общий случай для такого метода. Обозначим сдвиги фаз комплексных коэффициентов передачи при преобразовании вверх φ_j ($j = 1, 2, 3...$), а при преобразовании вниз – ψ_k ($k = 1, 2, 3...$). Тогда в процессе испытаний преобразователей можно измерять разности фаз комплексных коэффициентов преобразователей частоты из первой и второй групп отдельно, поскольку не имеет смысла сравнивать преобразователи, выходные сигналы которых лежат в разных диапазонах частот. Можно также сравнивать суммы сдвигов фаз из разных групп. Вся серия таких измерений описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i - \varphi_j &= \Delta\varphi_{ij}, \quad i \neq j; \\ \varphi_i + \psi_k &= \Sigma\varphi_{ik}; \\ \psi_k - \psi_j &= \Delta\psi_{ik}, \quad k \neq i. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если к каждому сдвигу фаз φ прибавить произвольное значение σ , а из каждого сдвига фаз ψ вычесть некоторое постоянное значение σ , то получим те же значения в столбце свободных коэффициентов

системы (5), но в виде другой системы, которая будет иметь бесконечное множество решений:

$$\begin{cases} (\varphi_i + \sigma) - (\varphi_j + \sigma) = \Delta\varphi_{ij}, i \neq j; \\ (\varphi_i + \sigma) + [\psi_k + (-\sigma)] = \Sigma\varphi_{ik}; \\ [\psi_k + (-\sigma)] - [\psi_j + (-\sigma)] = \Delta\psi_{kj}, k \neq j. \end{cases}$$

Аналогичное правило действует и для модулей коэффициентов передачи. Это доказывает, что при любой серии измерений комплексного коэффициента передачи устройства с преобразованием частоты, находящегося в паре с одним или несколькими аналогичными преобразователями, необходимо, чтобы один из дополнительных смесителей работал в режиме преобразования частоты вверх и вниз.

Из анализа структурных схем, приведённых на рис. 1, 2, следует, что, хотя бы один из дополнительных СВЧ-смесителей при определении его сдвигов фаз способами [3] или [4] работает в разных режимах преобразования частоты. Дополнительный СВЧ-смеситель работает в режиме преобразования частоты вниз, когда испытательный СВЧ-сигнал подаётся на порт 1 этого СВЧ-смесителя непосредственно от СВЧ-генератора при измерении разности сдвигов фаз. При измерении суммы сдвигов фаз испытательный сигнал поступает на вход смесителя с порта 3 промежуточной частоты испытуемого либо дополнительного СВЧ-смесителей, и он работает в режиме преобразования частоты вверх. При этом на порты 2 каждого СВЧ-смесителя при измерениях поступает постоянный по амплитуде сигнал от СВЧ-гетеродина. Однако в обоих случаях испытательный сигнал имеет разные уровни амплитуд. При измерении суммы сдвигов фаз испытательный сигнал будет ослаблен на величину потерь преобразования испытуемого или дополнительного СВЧ-смесителя.

В результате возникает амплитудно-фазовая погрешность измерений сдвигов фаз тем бóльшая, чем существеннее разность уровней этого сигнала. Данная погрешность для некоторых смесителей достигает десятков градусов, а причины её возникновения подробно рассмотрены в [9] на основании эквивалентной электрической схемы одностороннего смесителя.

Для решения проблемы амплитудно-фазовой погрешности перед входом дополнительного СВЧ-смесителя добавляют последовательно соединённые перестраиваемый аттенюатор и СВЧ-усилитель. С помощью этих устройств на входе испытуемого СВЧ-смесителя поддерживается постоянный уровень испытательного сигнала. Представление структурной схемы в виде ориентированных графов позволяет выявить все паразитные связи рассогласования между узлами, влияющие на точность измерений и ограничивающими их динамический диапазон. На основании структурной схемы метода трёх сумм (см. рис. 2) для теоретического анализа погрешностей измерений сдвига фаз испытуемого СВЧ-смесителя составлены соответствующие ориентированные графы в системе S -параметров [10].

Авторы экспериментально определили комплексные коэффициенты передачи СВЧ-смесителей каждым из рассмотренных методов. При этом для метода трёх сумм и метода суммы и разности они применяли измерительные схемы с усилителем промежуточной частоты и аттенюатором для устранения амплитудно-фазовой погрешности [5, 11]. В качестве векторного анализатора цепей использовали анализатор Р4М-18 фирмы Микран (Россия), а в качестве источника сигнала гетеродина – синтезатор частот Г7М-20А

(Россия). Двойные балансные СВЧ-смесители Remes Magnum MC64PG-11 11 (США) выступали в качестве испытуемого и дополнительных. С помощью перестраиваемого аттенюатора при измерениях суммы в обоих методах постоянно контролировался уровень сигнала промежуточной частоты, поступающего на вход дополнительного СВЧ-смесителя. За счёт этого амплитудно-фазовая погрешность была исключена. Измерения проводили при линейной перестройке частоты векторного анализатора цепей в диапазоне 8200–12050 МГц и синхронной перестройке по частоте гетеродина в диапазоне 8220–12070 МГц, обеспечивая таким образом постоянную промежуточную частоту 20 МГц.

На рис. 3 представлены графики амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик испытуемого СВЧ-смесителя. Характеристики получены при вычислениях с помощью формул (1), (2) для метода суммы и разности и (3), (4) – для метода трёх сумм. На правых осях графиков представлены различия результатов измерений, полученные двумя методами и выраженные в децибелах и градусах, – Δ АЧХ, Δ ФЧХ, соответственно. В устройстве для определения суммы и разности комплексного коэффициента передачи испытуемого и дополнительного СВЧ-смесителей переключения между измерительными трактами происходят на промежуточных частотах [11]. В то же время в устройстве для трёх измерений суммарного комплексного коэффициента передачи испытуемого и дополнительного СВЧ-смесителей требуется как минимум четыре дополнительных цикла соединения и разъединения трактов на СВЧ [5].

Заключение. Проведённый анализ показывает, что более эффективными являются измерители комплексных коэффициентов

передачи устройств с преобразованием частоты, реализующие метод суммы и разности. Такие приборы нужно выполнить так, чтобы все переключения режимов работы в процессе измерений суммы и разности сдвигов фаз и коэффициентов передачи испытуемого и дополнительного СВЧ-смесителей были перенесены в диапазон промежуточной частоты, что исключит погрешность, возникающую из-за рассогласования портов СВЧ-устройств при их многократных соединениях друг с другом. Такие соединения необходимы для проведения измерений суммы и разности сдвигов фаз. Указанные устройства позволяют не только повысить точность измерений за счёт исключения соединений на СВЧ, но также автоматизировать и упростить процесс измерений по сравнению с методом трёх сумм.

Литература

- 1 **Харкевич А. А.** Основы радиотехники. М.: Физматиздат, 2007.
- 2 **Maas S. A.** Nonlinear microwave and RF circuits. Massachusetts, United States: Artech House, 2003.
- 3 **А. с. 1596278 СССР, МКИ G01R 27/28.** Способ определения коэффициентов передачи четырёхполюсников с преобразованием частоты / К. С. Коротков // Открытия. Изобретения. 1990. № 36.
- 4 **Пат 2029966 РФ, МПК G01R 27/28.** Способ определения коэффициентов передачи преобразователей частоты / А. С. Елизаров // Бюл. изобрет. 1995. № 1950193/21.
- 5 **Pat. 6,064,694 USA.** Frequency Translating Device Transmission Response System / Ch. J. Clark, A. A. Moulthrop, M. S.

Muha, Ch. P. Silva. 2000.

6 **Хибель М.** Основы векторного анализа цепей. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

7 **Губа В. Г., Савин А. А., Ульянов В. Н.** Калибровка и применение векторного анализатора цепей для определения параметров частотно-преобразующих // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 156–161.

8 **Dunsmore J. P.** Handbook of Microwave Component Measurements with Advanced VNA Techniques. West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2012.

9 **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.

10 **Фролов Д. Р.** Определение параметров матрицы рассеяния в режиме преобразования частоты: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Краснодар, 2015.

11 **Пат. 2649861 РФ**, МПК G01R 27/28. Устройство для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств с преобразованием частоты / К. С. Коротков, Д. Р. Фролов, А. А. Бабенко, А. С. Левченко. 2018, Бюл. № 10.

Дата принятия: 13.03.2018.

Подписуемые подписи:

Рис. 1. Структурная схема измерений методом суммы и разности:

1 – векторный анализатор цепей; 2 – СВЧ-гетеродин; 3 – испытуемый СВЧ-смеситель; 4 – дополнительный СВЧ-смеситель; 5 –

первый переключатель; 6 – второй переключатель; 7 – третий переключатель; 8 – опорный генератор промежуточной частоты; 9 – векторный вольтметр

Рис. 2. Структурная схема измерений методом трёх сумм:

1 – векторный анализатор цепей; 2 – СВЧ-гетеродин; 3 – испытуемый СВЧ-смеситель; 4 – первый дополнительный СВЧ-смеситель; 5 – второй дополнительный СВЧ-смеситель.

Рис. 3. Графики амплитудно-частотной (a) и фазочастотной (b) характеристик:

1 – метод суммы и разности; 2 – метод трёх сумм; 3 – различие методов.