

УДК 621.317.7

В.Г. Губа, А.А. Савин

Применение метода определения параметров устройств с малыми потерями для тестирования смесителей частот

Рассмотрен простой способ определения основных параметров смесителей частот при помощи однопортового векторного анализатора цепей.

Ключевые слова: коэффициент отражения, калибровка, коррекция, векторный анализатор цепей, нагрузка, смеситель частот.

При выполнении калибровки векторного анализатора цепей (ВАЦ) требуется наличие нескольких калибровочных стандартов. Для тестирования пассивных СВЧ-устройств в качестве стандартов могут быть использованы нагрузки холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ), согласованные нагрузки (СН), воздушные линии, переходы и пр. При калибровке ВАЦ для тестирования усилителей обычно пользуются таким же стандартным набором калибровочных мер. Однако в случае необходимости определения параметров частотно-преобразующих устройств, например смесителей частот, требуется оснастить набор мер специальным калибровочным смесителем. Как и для любой меры, параметры данного смесителя должны быть известны заранее. В работе решена проблема определения параметров (характеристики) калибровочного смесителя с применением метода определения параметров устройств с малыми потерями.

Математические модели ВАЦ. Смеситель частот имеет множество различных параметров [1]. Часть из них связаны с преобразованием частоты, а часть нет. Если требуется измерить параметр, не связанный с преобразованием частоты (например, изоляцию или возвратные потери), то можно пользоваться стандартными средствами ВАЦ. В противном случае, т.е. при решении задачи определения параметров преобразования (например, конверсионных потерь или группового времени запаздывания), частоты входного и выходного сигналов не совпадают. Очевидно, что при этом из трех входных портов смесителя имеет смысл рассматривать только два: порт радиочастоты (RF) и порт промежуточной частоты (IF). Третий порт смесителя, на который подается сигнал опорного генератора (LO), также обладает рядом важных параметров. Будем полагать, что эти параметры находятся в норме, не требуют высокоточного измерения и уровень сигнала LO является достаточным для обеспечения режима преобразования. Таким образом, в общем случае смеситель частот можно представить как нелинейное двухпортовое устройство.

При работе ВАЦ используются простые линейные модели, описывающие работу прибора. Для двухпортовых измерений модель содержит идеальную и искажающую части и имеет 12 параметров [2]. Если требуется только один порт прибора, то можно использовать более простую модель, которая содержит только один искажающий адаптер (ИА) и 3 параметра. Данные математические модели необходимы для выполнения калибровки ВАЦ и последующей коррекции измерений с целью исключения систематической погрешности. Включение коррекции означает математическое исключение влияния ИА на результаты измерений. После коррекции можно считать, что модель ВАЦ содержит только идеальную, неискажающую часть. В дальнейшем полагаем, что ВАЦ откалиброван и включен режим коррекции измерений, обеспечивающий высокую точность.

Метод расчета параметров двухпортовых устройств с малыми потерями. Чтобы определить полную матрицу S -параметров двухпортового устройства требуются оба порта прибора. Однако для получения параметров некоторых двухпортовых устройств можно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 1, т.е. использовать измерения только комплексного коэффициента отражения (КО).

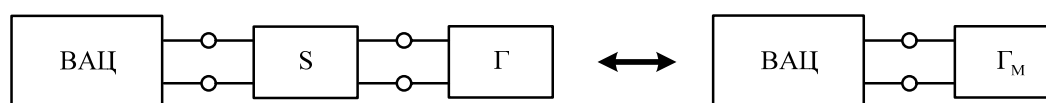


Рис. 1. Подключение к ВАЦ последовательно соединенных двухпортовой цепи и нагрузки

Для нахождения всех элементов матрицы S -параметров двухпортовой цепи \mathbf{S} необходимо использовать несколько нагрузок Γ с разными и известными действительными значениями КО. Такой метод тестирования двухпортовых устройств называют методом расчета параметров устройств с малыми потерями. Малые потери гарантируют высокий уровень измеряемых отраженных сигналов. Применительно к смесителям частот данный метод имеет одно важное преимущество. Частоты сигналов на входе опорного, фиксирующего комплексную амплитуду падающей волны и измерительного, фиксирующего комплексную амплитуду отраженной волны приемников ВАЦ одинаковы. Наличие фильтрующих цепей в составе смесителя или нагрузки позволяет существенно снизить влияние дополнительных составляющих спектра на результаты измерений.

Прежде чем приступить к подробному математическому рассмотрению метода, сделаем несколько замечаний. Для его реализации и достижения приемлемой точности при характеристике исследуемый смеситель должен обладать несколькими свойствами. Во-первых, его конверсионные потери должны быть низкими (не более 10 дБ). И, во-вторых, он должен быть взаимным. Взаимность смесителей обычно рассматривают, сравнивая модули коэффициентов прямого и обратного преобразований, а также групповые времена запаздывания (ГВЗ) сигналов при распространении в противоположных направлениях [3].

Математическое описание метода. Измеренное значение коэффициента отражения соединения, показанного на рис. 1, равно

$$\Gamma_M = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma}{1 - S_{22}\Gamma}, \quad (1)$$

где Γ – действительное значение КО нагрузки, S_{\bullet} – действительные значения S -параметров смесителя, которые можно объединить в матрицу \mathbf{S} . Рассмотрим математический аппарат решения уравнения (1) и способы определения неизвестных S_{11} , S_{22} и $S_{12}S_{21}$.

Для удобства введем 3 новые переменные, объединенные в вектор:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} \\ S_{11} \\ -S_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Искомые параметры смесителя однозначно определяются координатами вектора \mathbf{X} :

$$S_{11} = b, \quad S_{22} = -c, \quad S_{12}S_{21} = a - bc. \quad (3)$$

С учетом использованных обозначений выражение (1) несложно преобразовать к виду

$$\Gamma a + b - \Gamma \Gamma_M c - \Gamma_M = 0, \quad (4)$$

или в векторной форме

$$\mathbf{V}\mathbf{X} - \Gamma_M = 0, \quad (5)$$

где $\mathbf{V} = [\Gamma \quad 1 \quad -\Gamma\Gamma_M]$. В итоге получили линейное уравнение с тремя неизвестными. Очевидно, что для нахождения неизвестных необходимо провести не менее трех измерений, т.е. получить систему из трех или более уравнений. В матричном виде данную систему можно записать как

$$\mathbf{C}\mathbf{X} - \mathbf{m} = 0, \quad \text{или} \quad \mathbf{C}\mathbf{X} = \mathbf{m}, \quad (6)$$

где матрица системы \mathbf{C} и вектор свободных членов \mathbf{m} равны

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 1 & -\Gamma_1\Gamma_{M,1} \\ \Gamma_2 & 1 & -\Gamma_2\Gamma_{M,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Gamma_i & 1 & -\Gamma_i\Gamma_{M,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Gamma_N & 1 & -\Gamma_N\Gamma_{M,N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \Gamma_{M,1} \\ \Gamma_{M,2} \\ \dots \\ \Gamma_{M,i} \\ \dots \\ \Gamma_{M,N} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь N – число измерений (избыточная система содержит $N > 3$ уравнений); Γ_i – действительное значение КО нагрузки с номером i ; $\Gamma_{M,i}$ – измеренное значение КО нагрузки с номером i . Решение (7) относительно \mathbf{X} в общем случае (с учетом возможной избыточности системы) можно найти, используя метод наименьших квадратов (МНК). Учитывая, что все переменные являются комплексными, запишем окончательное выражение в виде

$$\mathbf{X} = (\mathbf{C}^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^H \mathbf{m}, \quad (8)$$

где \mathbf{H} – Эрмитов оператор (комплексное сопряжение элементов матрицы и ее транспонирование).

При $N=3$ решение МНК (8) является точным решением (6). Условием существования такого решения является отличие от нуля определителя матрицы \mathbf{C} , которая имеет в этом случае размерность 3×3 . Данное условие можно обеспечить применением нагрузок с различными действительными значениями КО. Так как элементы матрицы \mathbf{C} зависят и от измеренных значений КО, а измерения содержат погрешности, то необходимо, чтобы действительные значения КО трех использованных нагрузок отличались как можно значительнее.

Возможны следующие способы получения данных для вектора измерений \mathbf{m} :

- 1) с использованием нагрузок КЗ, ХХ и фиксированной СН;
- 2) с использованием нагрузок КЗ, ХХ и рассогласованной нагрузки (РН) с известным КО;
- 3) с использованием нескольких (трех или более) нагрузок КЗ с разной известной длиной;
- 4) с использованием нагрузок КЗ, ХХ и подвижной СН;
- 5) с использованием нагрузки КЗ и двух подвижных нагрузок с разными КО.

Наиболее простым является использование нагрузок КЗ, ХХ и фиксированной СН. Нагрузки КЗ и ХХ являются мерами полного отражения и должны иметь фазы КО, отличающиеся по возможности на угол, близкий к 180 градусам. СН является мерой полного поглощения и должна иметь нулевой (малый) модуль КО. То есть в (7): $\Gamma_1 = \Gamma_{КЗ}$, $\Gamma_2 = \Gamma_{ХХ}$, $\Gamma_3 = \Gamma_{СН} = 0$. Используя эти исходные данные, проводится тестирование нагрузок (их часто называют стандартами), фиксируются результаты измерений КО и выполняются расчеты по (8) и (3). В [3] показано, что если смеситель предназначен для получения сигнала разностной частоты, то в качестве истинных значений КО используемых нагрузок необходимо брать их комплексно-сопряженные значения.

Извлечение параметров смесителей. В результате получены оценки практически всех элементов матрицы параметров рассеяния смесителя:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}.$$

При проведении расчетов по (8) и (3) сразу получены КО обоих портов смесителя. Конечно же, их можно измерить по-другому, например, вместе с измерением изоляции смесителя при стандартном использовании двухпортового ВАЦ и без конверсии частоты. При этом нужно учесть, что S_{11} должен быть измерен на входной частоте, а S_{22} – на выходной. Более того, если предварительно выполнить эти измерения, можно упростить процедуру, описанную выше.

При выполнении условий взаимности смесителя, а именно равенстве конверсионных потерь и ГВЗ для трактов прямого и инверсного распространения, т.е. при $S_{12} = S_{21}$, из произведения $S_{12}S_{21} = |S_{12-21}| \cdot \exp(i \cdot \varphi_{12-21})$ можно легко найти S_{12} и/или S_{21} , а именно $S_{21} = \sqrt{S_{12}S_{21}}$. Фактически это означает, что модуль коэффициента передачи смесителя (конверсионные потери) на частоте f может быть рассчитан по формуле

$$|S_{21}(f)| = \sqrt{|S_{12-12}(f)|}. \quad (9)$$

Фаза коэффициента передачи, определяющая ГВЗ, может быть найдена при помощи выражения

$$\varphi_{21}(f) = \frac{\varphi_{12-21}(f)}{2}. \quad (10)$$

При проведении расчетов в (10) следует учитывать неоднозначность фазовых измерений.

Заключение. Рассмотрен простой способ определения S -параметров смесителей частот. Алгоритм обработки измерений следует из математического аппарата определения элементов искажающего адаптера при однопортовой калибровке ВАЦ. Однако при проведении расчетов следует учитывать специфику исследуемого устройства.

Требования по взаимности и малым потерям, накладываемые в данной работе на тестируемый смеситель, важны не только при характеристике этого смесителя как калибровочного, но и для реализации метода калибровки ВАЦ [4], который применим для тестирования практически любых типов смесителей частот.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 и договором 74/10 от 15.07.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Белов Л.А. Современные ВЧ-компоненты. Преобразователи частоты // Электроника: НТБ. – 2004. – № 2. – С. 44–50.
2. Губа В.Г. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей / В.Г. Губа, А.А. Ладур, А.А. Савин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 149–155.
3. Scattering-Parameter Model and Representation for Microwave Mixers / D.F. William, F. Ndagijimana, K.A. Remley et al. // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – January 2005. – Vol. 53, № 1. – P. 314–321.
4. Губа В.Г. Калибровка и применение векторного анализатора цепей для определения параметров частотно-преобразующих устройств / В.Г. Губа, А.А. Савин, В.Н. Ульянов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 1. – С. 156–161.

Губа Владимир Геннадьевич

Зам. главного метролога ЗАО «НПФ «Микран»

Тел.: (382-2) 90-00-38

Эл. почта: vovg@micran.ru

Савин Александр Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-36-70

Эл. почта: saasavin@mail.ru

Guba V.G., Savin A.A.

Application of the method of determining the parameters of devices with low loss for testing mixers

The article describes a simple method for determining the basic parameters of the frequency mixers with single-port vector network analyzer.

Keywords: reflectance, calibration, correction, vector network analyzer, load, frequency mixer.