

УДК 621.372

Г.Г. Гошин, Ф.А. Михеев

## Исследование влияния неидеальности направленного устройства на точность измерения коэффициента отражения

Рассмотрены паразитные параметры направленного устройства, влияющие на точность измерения коэффициента отражения. Проведена оценка их влияния на точность измерения коэффициента отражения испытываемого устройства.

**Ключевые слова:** направленное устройство, коэффициент отражения, анализатор цепей, направленность, ошибка измерения.

Одной из наиболее сложных задач при анализе цепей в диапазоне СВЧ является измерение коэффициента отражения испытываемого устройства (ИУ). В автоматизированных анализаторах параметров цепей эта задача решается с помощью деления направленным устройством падающих и отражённых волн. Структурная схема измерительного блока анализатора цепей показана на рис. 1.

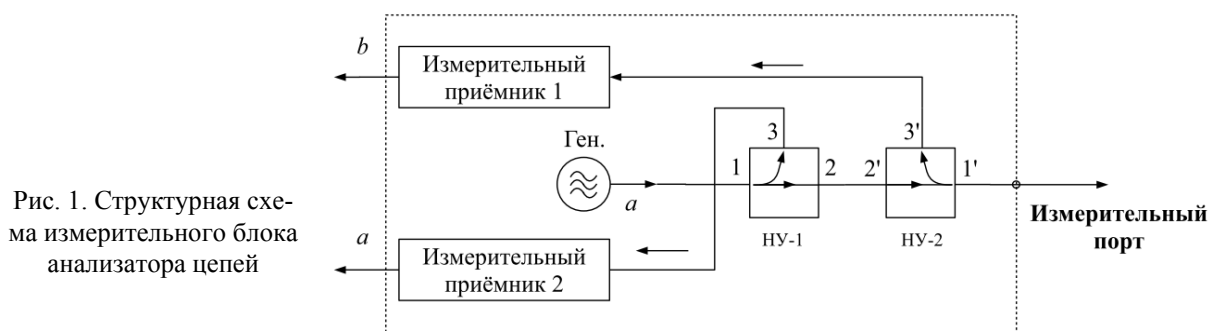


Рис. 1. Структурная схема измерительного блока анализатора цепей

Направленное устройство (НУ) может быть построено на основе или направленного ответвителя, или моста [1–3]. Основными электрическими характеристиками направленных устройств являются: переходное ослабление ( $C$ ), направленность ( $D$ ), потери в основном канале ( $L$ ), КСВН портов. Переходное ослабление определяет величину связи между основным и вторичным каналами и находится как отношение мощностей на входе основного и выходе вторичного каналов

$$C = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_1}{P_3} \right), \text{ дБ.} \quad (1)$$

Направленность характеризует, насколько хорошо НУ разделяет сигналы, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях, и определяется соотношением

$$D = (I - (C + L)), \text{ дБ,} \quad (2)$$

где  $I$  – параметр, называемый развязкой и являющийся отношением мощности на входе направленного устройства к мощности на развязанном порте.

В идеальном НУ переходное ослабление и потери в основном канале равны 0 дБ, направленность равна бесконечности и измерительный порт полностью согласован. Если при справедливости перечисленных выше предположений об идеальности НУ обеспечена стабильность падающей волны генератора  $a$ , то отражённая волна  $b$  будет прямо пропорциональна коэффициенту отражения  $\Gamma_{\text{ИУ}}$  от ИУ. Однако на практике идеальные параметры НУ не достижимы, что приводит к возникновению ошибок при измерении коэффициента отражения [1, 2]. Поэтому при измерении коэффициента отражения мешающие измерению факторы, создаваемые направленным устройством, учитываются и, насколько это возможно, исключаются из результатов измерения.

Рассмотрим случай, когда в структурной схеме измерительного блока анализатора цепей неидеальным элементом является только НУ. В первую очередь в реальном НУ переходное ослабление и потери в основном канале всегда больше 0 дБ. При сложении этих двух величин получается коэффициент, который может быть назван поправкой на отражение [1]:

$$R = (C + L), \text{ дБ.} \quad (3)$$

Связь измеренного коэффициента отражения ИУ и поправки на отражение  $R$  с истинным коэффициентом отражения  $\Gamma_{\text{ИУ}}$  выражается соотношением

$$M = \frac{b}{a} = 10^{\frac{R}{20}} \cdot \Gamma_{\text{ИУ}}. \quad (4)$$

В реальном направленном устройстве также присутствует паразитный путь прохождения сигнала от порта 2(2') к порту 3(3'), искажающий измерения. Эти искажения связаны с величиной развязки  $I$ . В качестве меры отличия между реальным и идеальным поведением направленного устройства удобно использовать специальное отношение, известное как поправка на направленность (2), которая векторно добавляется к величине  $\Gamma_{\text{ИУ}}$ . Поэтому формула (4) может быть переписана следующим образом:

$$M = \frac{b}{a} = 10^{\frac{R}{20}} \cdot \left( \Gamma_{\text{ИУ}} + 10^{\frac{D}{20}} \right). \quad (5)$$

Для оценки ошибки измерений её удобно привести к виду

$$M = \frac{b}{a} = W \cdot (1 + X), \quad (6)$$

где  $X = D/\Gamma_{\text{ИУ}}$  и  $W = R/\Gamma_{\text{ИУ}}$ .

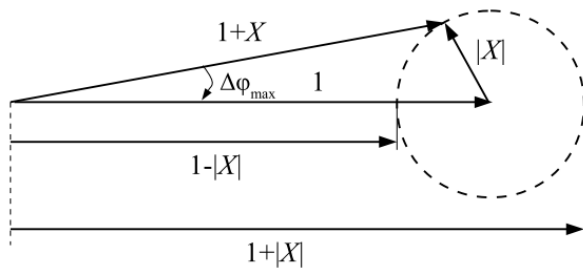


Рис. 2. Векторная суперпозиция составляющих 1 и  $|X|$

Множитель  $(1 + X)$  характеризует относительное отклонение измеренной величины  $M$  от её истинного значения  $W$ . Относительное отклонение  $(1 + X)$  показано на рис. 2.

Например, при идеальном значении поправки на отражение  $R$ , равным 1, если величина поправки на направленность  $D$  составляет минус 40 дБ и значение  $W$  равно  $-30$  дБ, то величины  $20\lg(1 + |X|)$  и  $20\lg(1 - |X|)$  будут равны 2,39 и  $-3,3$  дБ соответственно. Исходя из значения  $W$ , равного  $-30$  дБ, возможные пределы модуля измеряемой величины  $M$ : верхний предел равен  $-27,61$  дБ и нижний предел равен  $-33,3$  дБ. В случае  $X$ , равном 1, т.е. когда величины  $D$  и  $\Gamma_{\text{ИУ}}$  равны между собой, измеряемое значение  $M$  расположено в пределах от минус бесконечности до  $-6,02$  дБ. Таким образом, становится понятным, что невозможно непосредственно измерять коэффициенты отражения меньше, чем поправка на направленность.

Еще одним мешающим фактором при измерении коэффициента отражения ИУ является возможное наличие ненулевого коэффициента отражения от измерительного порта ИУ. Данный мешающий фактор называется рассогласованием измерительного порта  $S$ . Рассогласование измерительного порта приводит к возникновению многократных отражений между измерительным портом и ИУ (рис. 3). После учёта двукратного отражения (этого обычно достаточно) суммарный вклад выглядит следующим образом:

$$a_r = b_r \cdot \Gamma_{\text{ИУ}} \cdot (1 + \Gamma_{\text{ИУ}} \cdot S). \quad (7)$$

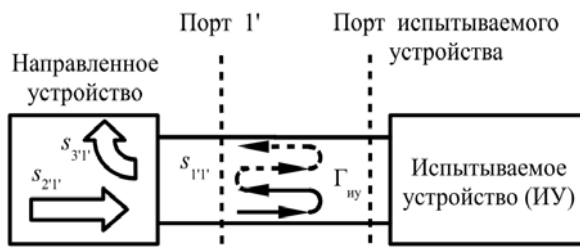


Рис. 3. Многократные отражения от измерительного порта

Таким образом, удаётся оценить ошибку измерений, вносимую рассогласованием измерительного порта, используя вместо  $(1+X)$  выражение  $(1+\Gamma_{\text{ИУ}}S)$ . Из анализа данного выражения можно сделать вывод о том, что рассогласование измерительного порта в основном влияет на измерение больших значений  $\Gamma_{\text{ИУ}}$ . Суммарное влияние неидеальностей ИУ на измеренное отношение  $M$  может быть выражено формулой

$$M = 10^{\frac{R}{20}} \cdot \left( \Gamma_{\text{ИУ}} \cdot (1 + S \cdot \Gamma_{\text{ИУ}}) + 10^{\frac{D}{20}} \right). \quad (8)$$

Поправка на отражение  $R$  приводит к относительной ошибке измерения, которая не зависит от величины  $\Gamma_{иу}$ . Она может быть легко скорректирована введением комплексного поправочного коэффициента. Поправки на направленность  $D$  и на рассогласование измерительного порта приводят к ошибке измерения, которая зависит от коэффициента отражения  $\Gamma_{иу}$ . Для компенсации этой систематической ошибки должна использоваться комплексная коррекция данных неидеальностей.

В случае если анализатор цепей может измерять только модуль  $\Gamma_{иу}$  (т.е. является скалярным), то обе величины  $D$  и  $S$  невозможно исключить из результатов измерения, и они будут давать вклад в общую ошибку. При этом поправка на направленность ограничивает точность измерения для малых значений модуля коэффициента отражения, а рассогласование измерительного порта определяет предел измерения больших значений модуля коэффициента отражения (рис. 4).

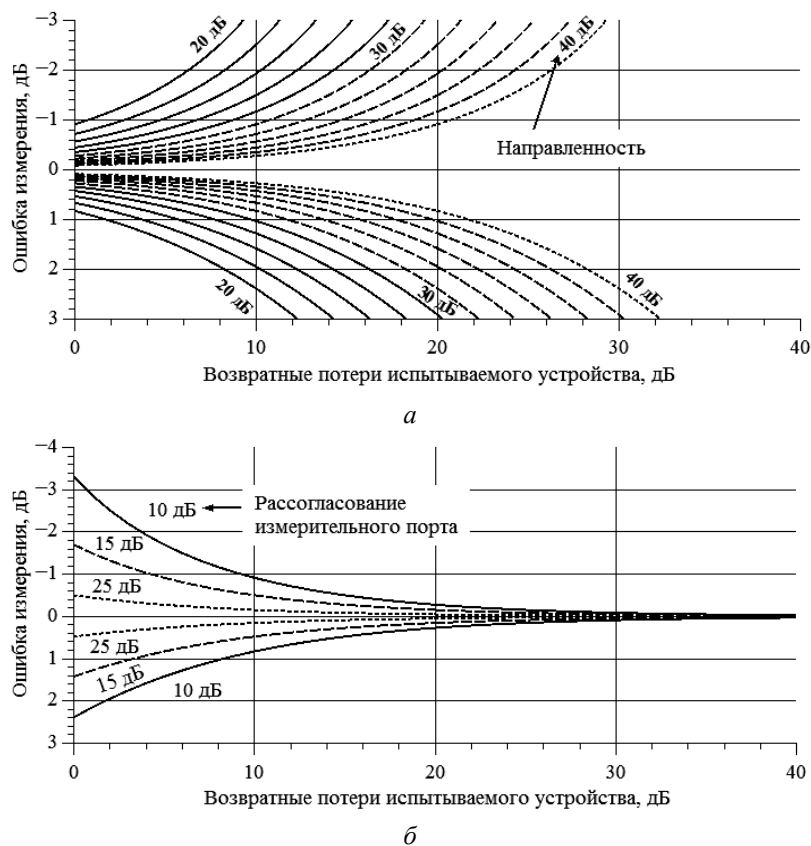


Рис. 4. Неопределённость измерения как функция поправки на направленность (а), поправки на рассогласование измерительного порта (б) и значения возвратных потерь

Неопределённость измерения заключается в отсутствии информации о фазе  $X$ , что создаёт область неоднозначных значений, ограниченных пунктирной окружностью (см. рис. 2). Из представленной на рис. 4 неопределённости становится ясно, что для обеспечения точного измерения значений возвратных потерь более 30 дБ требуется НУ с направленностью выше 38 дБ. Поскольку в скалярных анализаторах цепей в качестве НУ применяются мосты, то данное значение направленности вполне достижимо [4].

В то же время в векторном анализаторе цепей влияние направленного устройства на ошибку измерения коэффициента отражения может быть сведено к минимуму из-за наличия возможности исключения поправки на направленность и рассогласования измерительного порта после выполнения калибровки [1, 2]. Однако, это не означает, что обе величины  $D$  и  $S$  раздельно или в совокупности никакого влияния на измерения не оказывают. Влияние любой из этих величин будет проявляться в ухудшении стабильности измерения коэффициента отражения векторным анализатором цепей при изменении температур окружающей среды или внутри корпуса прибора. Математически описать это влияние очень сложно, так как невозможно учесть поведение всех компонентов системы при изменении температуры. Поэтому данное предположение было проверено экспериментально.

Экспериментальное исследование проведено с использованием векторного анализатора цепей P4M-18. В процессе эксперимента на одном из измерительных портов анализатора цепей заменялось направленное устройство НУ-2 (см. рис. 1), выделяющее отраженную волну. В качестве направленного устройства были применены направленные ответвители с направленностью 10 и 20 дБ, а также разделитель мощности. При этом замена НУ проводилась для одного и того же измерительного порта. После его замены проводилась проверка стабильности измерения коэффициента отражения при нагревании анализатора цепей в термокамере на 10 градусов Цельсия относительно комнатной температуры. Также стоит отметить, что испытываемое устройство (в данном случае согласованная нагрузка) подключалось непосредственно к измерительному порту без использования кабелей. Полученные частотные зависимости модуля коэффициента отражения испытываемого устройства приведены на рис. 5.

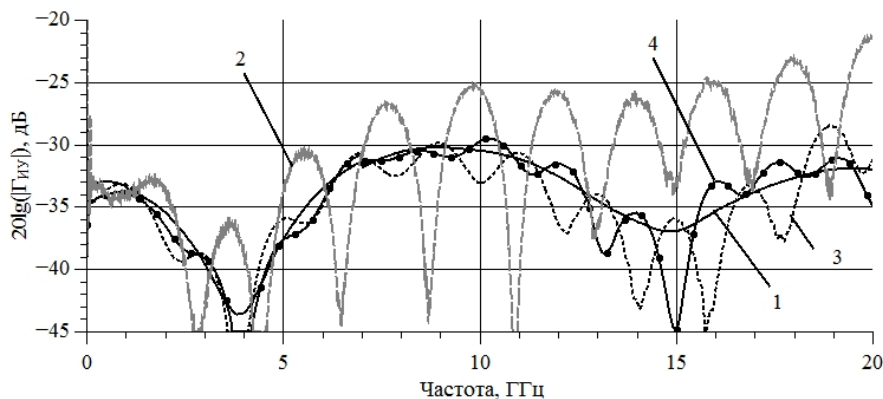


Рис. 5. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения испытываемого устройства

Частотные зависимости, приведённые на рис. 5, получены при следующих условиях. Первая частотная зависимость получена сразу после выполнения калибровки. Вторая и последующие частотные зависимости получены при нагреве векторного анализатора цепей на 10 градусов Цельсия. При этом во втором случае в качестве НУ-2 использован разделитель мощности. В третьем случае в качестве НУ-2 использован направленный ответвитель с направленностью 10 дБ. В четвёртом случае в качестве НУ-2 использован направленный ответвитель с направленностью 20 дБ. Из анализа полученных частотных зависимостей следует, что при ухудшении направленности нестабильность измерения возрастает.

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. На ошибку измерения коэффициента отражения влияют такие параметры направленного устройства, как поправка на отражение, поправка на направленность, рассогласование измерительного порта. При этом поправка на отражение может быть легко учтена и исключена из результатов измерения независимо от типа анализатора цепей (скалярный или векторный).

2. В случае скалярных измерений поправки на направленность и рассогласование измерительного порта учтены и полностью исключены из результата измерения быть не могут. Поэтому к направленному устройству предъявляются достаточно жесткие требования.

3. В случае векторных измерений все паразитные параметры направленного устройства могут быть учтены и исключены из результата измерения. Однако чем хуже параметры направленного устройства, тем хуже стабильность векторного анализатора цепей во времени и по температуре.

Авторы благодарят инженера А.В. Банщикова и с.н.с ЗАО «НПФ «Микран» В.Н. Ульянова за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по контракту № 02.G25.31.0091.

#### Литература

1. Михаэль Хибель. Основы векторного анализа цепей / пер. с англ. С.М. Смольского; под ред. У. Филипп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 500 с.

2. Collier R.J. Microwave Measurements / R.J. Collier, A.D. Skinner. – 3th ed. The institution of engineering and technology 2007. – 506 p.

3. Сверхширокополосный направленный мост для векторного анализатора цепей диапазона СВЧ / Ф.А. Михеев, Г.Г. Гошин, А.В. Фатеев, М.С. Ройтман // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 1. – С. 219–222.

4. Anritsu Precision RF & Microwave Components: Product Catalog. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anritsu.com/en-US/Products-Solutions/Instructional/Precision-RF-Microwave-Components-Catalog.aspx>, свободный (дата обращения: 04.09.2014).

---

**Гошин Геннадий Георгиевич**

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧ и КР) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 70-15-18

Эл. почта: [goshingg@svch.tusur.ru](mailto:goshingg@svch.tusur.ru)

**Михеев Филипп Александрович**

Аспирант каф. СВЧ и КР ТУСУРа

Тел.: (382-2) 90-00-41

Эл. почта: [LINFOX@mail2000.ru](mailto:LINFOX@mail2000.ru)

Goshin G.G., Miheev Ph.A.

**Analysis of the effect of non-ideal directional device on accuracy of the measurement reflection coefficient**

We considered parasitic parameters of a directional device, which impact on measurement accuracy of the reflection coefficient. We estimated their impact on the measurement accuracy of the reflection coefficient device under test.

**Keywords:** directional device, reflection coefficient, network analyzer, directivity, measurement error.

---