РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2015, том 60, № 8, с. 873-880

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.37.037

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ИСТИННОГО СДВИГА ФАЗ СМЕСИТЕЛЕЙ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

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

Кубанский государственный университет Российская Федерация, 350040 Краснодар, ул. Ставропольская, 149 E-mail: frolov.drf@gmail.com Поступила в редакцию 17.01.2014 г.

Рассмотрен один из важных параметров СВЧ-смесителей — истинный сдвиг фаз, вносимый СВЧсмесителем в сигнал промежуточной частоты, который необходимо измерять с предельной точностью. Впервые проанализированы основные используемые в настоящее время методы определения истинного сдвига фаз СВЧ-устройств с преобразованием частоты, с целью выявления погрешностей, вносимых ими при измерениях, и причин, с которыми они связаны. Даны рекомендации по совершенствованию данных методов.

DOI: 10.7868/S0033849415080100

### ВВЕДЕНИЕ

Радиосигналы СВЧ-диапазона с фазовой модуляцией и детектированием широко применяются для навигации и наведения летательных аппаратов, т.е. при создании фазированных антенных решеток и в системах радиолокации использующих эффект Доплера. В радиосистемах СВЧ, использующих фазовые методы управления и передачи информации, в подавляющем большинстве случаев применяют гетеродинное преобразование частоты. Главным элементом устройств для преобразования частоты является их нелинейный элемент – СВЧ-смеситель, который вносит амплитудно-фазовые искажения в преобразуемые с его помощью радиосигналы, несущие информацию. Такие искажения невозможно оценить и устранить без знания фазовых сдвигов, вносимых СВЧ-смесителем в преобразуемый по частоте входной СВЧ-радиосигнал. Однако этот сигнал и выходной сигнал промежуточной частоты СВЧ-смесителя лежат в разных диапазонах частот, а следовательно, никакими традиционными способами (например, осциллографическим) измерить их фазовый сдвиг невозможно. В то же время в крайне ограниченном списке зарубежных и отечественных литературных источников отмечалась малая изученность этой проблемы [1-3].

Теоретически фазовый сдвиг, вносимый однодиодным СВЧ-смесителем, может быть рассмотрен на основе известной эквивалентной схемы полупроводникового смесительного диода в диапазоне СВЧ [2]. Схема представляет собой параллельное соединение барьерной емкости  $C_b$  данного диода и активного сопротивления p-n-перехода  $r_g$ . Сопротивление растекания  $R_s$  и индуктивность объема полупроводника  $L_s$  — величины постоянные, не зависящие от протекающего через полупроводниковый диод тока. На этом основании комплексное сопротивление p—n-перехода  $Z_n$  полупроводникового смесительного диода описывается формулой

$$Z_n = \frac{r_g}{r_g^2 + \omega^2 C_b + 1} - j \frac{r_g \omega C_b}{r_g^2 + \omega^2 C_b + 1},$$
 (1)

где  $\omega = 2\pi f$  — частота радиосигнала, протекающего через *p*—*n*-переход.

Из формулы (1) можно получить аналитическое выражение для фазового сдвига  $\phi_0$ , вносимого смесительным диодом в следующем виде:

$$tg(\varphi_0) = \frac{-r_g^2 \omega C_b}{r_g} = -2\pi f r_g C_b.$$
(2)

Продифференцировав выражение (2), получим зависимость фазового сдвига от частоты

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial f} = \frac{-2\pi f r_g C_b}{1 + 4\pi^2 f^2 r_a^2 C_b^2}.$$
(3)

Из выражений (2) и (3) видно, что фазовый сдвиг, вносимый полупроводниковым смесительным диодом, в основном определяется его барьерной емкостью  $C_b$ , которую, как показано в работе [3], чрезвычайно сложно рассчитать теоретически из-за одновременных существенных погрешностей таких расчетов, достигающих 200%.

Все это приводит к выводу, что гораздо легче и с несравнимо большей точностью фазовые сдвиги, вносимые СВЧ-смесителем, нужно опреде-



Рис. 1. Структурная схема метода измерения разности (а) и суммы (б) при определении параметров смесителей; 1 – генератор СВЧ, 2, 5, 9 – делители мощности, 3 – гетеродин, 4 – испытуемый смеситель, 6 – вспомогательный смеситель, 7 – векторный вольтметр, 8 – генератор промежуточной частоты.

лять непосредственно инструментальными методами, которые в настоящее время и стали основными при определении параметров смесителей.

Кроме того, знание фазового сдвига СВЧ-смесителя позволяет находить его комплексный коэффициент передачи (модуль и фазу), что приводит к возможности характеризовать такой СВЧ-смеситель системой *S*-параметров и представлять его в виде СВЧ-четырехполюсника, содержащего преобразование частоты.

# 1. ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

*Метод суммы и разности:* хронологически первый инструментальный метод, позволяющий определять фазовый сдвиг CBЧ-смесителя, был предложен в СССР [4]. Структурные схемы этого метода приведены на рис. 1. Суть метода заключается в том, что с помощью одной схемы (рис. 1а) измеряют разность сдвигов фаз испытуемого и вспомогательного смесителей  $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , а затем с помощью другой схемы (рис. 1б) измеряют сумму сдвигов фаз испытуемого и вспомогательного кесителей  $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , а затем с помощью другой схемы (рис. 1б) измеряют сумму сдвигов фаз испытуемого и вспомогательного смесителей  $\Sigma \varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ .

Исходя из измеренных значений разности  $\Delta \phi$  и суммы  $\Sigma \phi$  сдвигов фаз испытуемого и вспомога-



Рис. 2. Структурная схема метода трех смесителей; 1, 7– первый и второй порты, 2– испытуемый смеситель, 3– векторный анализатор цепей, 4– делитель, 5– гетеродин, 6– первый вспомогательный смеситель, 8– второй вспомогательный смеситель.

тельного СВЧ смесителей и решая систему уравнений (4)

$$\begin{aligned}
\Delta \varphi &= \varphi_1 - \varphi_2, \\
\Sigma \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2,
\end{aligned}$$
(4)

определяют истинные сдвиги фаз любого из двух CBЧ-смесителей:

Основным достоинством рассмотренного метода является неизменность уровней сигналов СВЧ-гетеродина как при параллельном, так и при последовательном соединении смесителей, что позволяет испытывать СВЧ-смесители в их реальном рабочем режиме. Основной недостаток использование большого количества переключателей в СВЧ-трактах в ходе процесса измерения.

Метод трех смесителей [5]: стал развитием метода двух смесителей (рис. 2). Метод основан на применении двухпортового векторного анализатора цепей, между первым и вторым портами которого включают последовательно соединенные испытуемый и вспомогательный СВЧ-смесители.

С помощью схемы, представленной на рис. 2, измеряют сумму сдвигов фаз испытуемого и первого вспомогательного смесителей  $\Sigma \phi_1 = \phi_{\mu} + \phi_{\text{вспом1}}$ , испытуемого и второго вспомогательного смесителей  $\Sigma \phi_2 = \phi_{\mu} + \phi_{\text{вспом2}}$ , первого и второго вспомогательного смесителей  $\Sigma \phi_3 = \phi_{\text{вспом1}} + \phi_{\text{вспом2}}$ .

Решая полученную систему уравнений

$$\begin{cases} \Sigma \phi_1 = \phi_{\mu} + \phi_{\text{вспом 1}}, \\ \Sigma \phi_2 = \phi_{\mu} + \phi_{\text{вспом 2}}, \\ \Sigma \phi_3 = \phi_{\text{вспом 1}} + \phi_{\text{вспом 2}} \end{cases}$$
(6)

относительно  $\phi_{u}$ , находят истинный фазовый сдвиг испытуемого смесителя:

$$\varphi_2 = \frac{\Sigma \varphi_1 + \Sigma \varphi_2 - \Sigma \varphi_3}{2}.$$
 (7)

Достоинством рассмотренного метода является использование стандартных и легкодоступных инструментов: для проведения измерений требуется только векторный анализатор цепей и гетеродин (а при использовании четырехпортового анализатора цепей необходимость в отдельном гетеродине и вовсе отпадает). При этом недостатком метода является большое количество переключений в СВЧ-трактах в ходе измерений и необходимость в использовании второго вспомогательного смесителя.

Метод отражений (метод малых потерь): третий по времени появления метод [6] измерения фазового сдвига СВЧ-смесителя также основан на применении анализатора цепей (рис. 3). Векторный анализатор цепей используют в режиме измерения коэффициентов отражения, а испытуемый СВЧ-сигнал подают с его измерительного порта с частотой  $f_1$  на вход RF испытуемого СВЧ-смесителя, гетеродинный вход LO которого находится под воздействием сигнала с частотой  $f_2$ от СВЧ-гетеродина. Полученный на выходе испытуемого СВЧ-смесителя сигнал промежуточной частоты IF  $f_3 = f_1 \pm f_2$  через калиброванную линию задержки (ЛЗ), с известной величиной фазового сдвига флз, подают на рассогласованную нагрузку, фазовый сдвиг которой  $\phi_{\rm H}$  также известен. Сигнал промежуточной частоты  $f_3$ , отразившись от рассогласованной нагрузки, через ЛЗ поступает обратно на разъем IF промежуточной частоты испытуемого смесителя, где он уже в обратную сторону с помощью сигнала на входе LO преобразуется в сигнал с частотой  $f_1$ , который с разъема RF смесителя попадает на измерительный порт векторного анализатора цепей. Таким образом, суммарный сдвиг фаз  $\Sigma \overline{\phi}$  измеряемый векторным анализатором цепей, определяется выражением  $\Sigma \overline{\phi} = 2\phi_{\mu} +$  $+ 2\phi_{II3} + \phi_{H}$ , из которого и определяется истинный сдвиг фаз фи испытуемого СВЧ-смесителя:

$$\varphi_{\mu} = \frac{\Sigma \overline{\varphi} - 2\varphi_{\pi_3} - \varphi_{\mu}}{2}.$$
 (8)

Достоинство рассмотренного метода состоит в том, что позволяет определять истинный сдвиг фаз СВЧ-смесителя, не применяя опорный смеситель и не используя переключатели СВЧ. Одна-



**Рис. 3.** Структурная схема метода отражений; *1* – анализатор цепей, *2* – гетеродин, *3* – испытуемый смеситель, *4* – линия задержки, *5* – рассогласованная нагрузка.

ко в нем не контролируются уровни мощности сигналов, отраженные от рассогласованной нагрузки, что приводит к большой амплитудно-фазовой погрешности за счет разных уровней амплитуд сигналов падающих и отраженных от рассогласованной нагрузки.

### 2. ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ

Анализ погрешностей измерений методом суммы и разности может быть проведен при помощи направленных графов соединений СВЧэлементов. Направленные графы, описывающие соединение структурных схем на рис. 1 в системе S-параметров, представлены на рис. 4 и 5 [7]. Из графов видно, что основными источниками погрешностей являются паразитные связи между испытуемым и вспомогательным СВЧ-смесителями по каналам сигнала гетеродина, которому соответствует пути  $S_{912} \cdot S_{59} \cdot S_{75}$  и  $S_{57} \cdot S_{95} \cdot S_{129}$ , изза прохождения по ним сигналов промежуточной частоты  $f_3$ . Для устранения этого необходима достаточно хорошая развязка, которая определяется путями S<sub>59</sub> и S<sub>95</sub>. Коэффициент передачи от СВЧ-генератора, вырабатывающего испытательный CBЧ-сигнал с частотой  $f_1$  до входного порта  $(a_{13} - b_{13})$  векторного вольтметра описывается выражением

$$S_{113} = \frac{1}{1+N_1} S_{31} \exp(j\varphi_{31}) \times S_{43} \exp(j\varphi_{34}) S_{74} \exp(j\varphi_{47}) S_{D1} \times (9)$$
$$\exp(j\varphi_{D1}) S_{67} \exp(j\varphi_{76}) S_{136} \exp(j\varphi_{613}),$$

где

×

$$N_{1} = S_{11}S_{11}' \times \\ \times \exp(j(\varphi_{11} + \varphi_{11}')) + S_{33}S_{33}' \exp(j(\varphi_{33} + \varphi_{33}')) + \\ + S_{44}S_{44}' \exp(j(\varphi_{44} + \varphi_{44}')) + S_{77}S_{D1} \times \\ \times \exp(j(\varphi_{77} + \varphi_{D1})) + S_{66}S_{13}\exp(j(\varphi_{66} + \varphi_{13})).$$



Рис. 4. Граф измерения разности параметров смесителей, цифры в кружочках соответствуют номерам элементов на рис. 1.

Аналогично коэффициент передачи до другого порта  $(a_{14} - b_{14})$  векторного вольтметра описывает-ся выражением

$$S_{114} = \frac{1}{1 + N_2} S_{21} \exp(j\varphi_{21}) S_{102} \times \\ \times \exp(j\varphi_{102}) S_{1210} \exp(j\varphi_{1210}) S_{D2} \times \\ \times \exp(j\varphi_{D2}) S_{1112} \exp(j\varphi_{1112}) S_{1411} \exp(j\varphi_{1411}),$$
(10)

где

$$N_2 = S_{11}S'_{11}\exp(j(\varphi_{11} + \varphi'_{11})) + S_{22}S'_{22} \times \exp(j(\varphi_{22} + \varphi'_{22})) + S_{10}S'_{10}\exp(j(\varphi_{10} + \varphi'_{10})) +$$

+  $S_{12}S_{D2} \exp(j(\varphi_{12} + \varphi_{D2})) + S_{11}S_{14} \exp(j(\varphi_{11} + \varphi_{14})).$ 

В знаменателе выражений (9) и (10) учтены только замкнутые контура первого порядка, остальные ввиду их малости не учитываются.

Пути графа подачи сигналов от СВЧ-гетеродина к смесительным диодам *D*1 и *D*2 постоянны при измерении суммы и разности сдвигов фаз и поэтому на процессы измерений не влияют.

Сечение графа на рис. 4 по узлам  $a_4 - b_4$ ,  $a_{10} - b_{10}$ ,  $a_6 - b_6, a_{11} - b_{11}$  соответствуют местам переключений СВЧ-тракта для реализации режимов измерения разности и суммы сдвигов фаз. Известно [8], что при таких переключениях в диапазоне СВЧ нестабильность коаксиальных соединений типа "розетка-вилка" составляет порядок "минус 40 дБ", что соответствует коэффициенту отражения Г = 0.01. Электромеханические переключатели, применяемые для реализации режимов измерений суммы и разности сдвигов фаз СВЧ-смесителей, имеют коэффициент стоячей волны (КСВ), лежащий в пределах 1.3...1.5 [8]. Погрешность измерений фазовых сдвигов  $\Delta \phi$  за счет рассогласования (КСВ) переключателей может быть найдена из выражения:

$$\Delta \varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{KCB} - 1}{\operatorname{KCB} + 1} = \operatorname{arctg}(\Gamma_n),$$



Рис. 5. Граф измерения суммы параметров смесителей, цифры в кружочках соответствуют номерам элементов на рис. 1.

1)

где  $\Gamma_n$  — коэффициент отражения неоднородности. Отсюда следует, что один электромеханический переключатель с величиной КСВ = 1.2 дает ошибку 30/, с величиной КСВ = 1.3 — ошибка составляет уже 6°; а если КСВ = 1.5, в реальности можно получить ошибку и в 15°.

Режим измерения суммы сдвигов фаз двух СВЧ-смесителей описывается ориентированным графом (см. рис. 5), который позволяет проследить все пути формирования и прохождения испытательного сигнала, и электрические неоднородности, встречающиеся на этом пути, что в свою очередь позволяет рассчитывать их величину. В этом режиме основным узлом, формирующим испытательный сигнал, служит генератор промежуточной частоты, сигнал которого с частотой  $f_3$  с помощью делителя одновременно подают на разъем IF вспомогательного СВЧ-смесителя и на один из двух портов векторного вольтметра. Коэффициент передачи от генератора промежуточной частоты к первому входному порту векторного вольтметра описывается выражением

$$S_{1613} = \frac{1}{1 + N_3} S_{1516} \exp(j\varphi_{1516}) S_{1115} \times \exp(j\varphi_{1115}) S_{1211} \times \exp(j\varphi_{47}) S_{D2} \exp(j\varphi_{D2}) \times (1 + S_{1012} \exp(j\varphi_{1012}) S_{410} \exp(j\varphi_{410}) S_{74} \exp(j\varphi_{74}) \times (1 + S_{1012} \exp(j\varphi_{1012}) S_{410} \exp(j\varphi_{410}) S_{74} \exp(j\varphi_{74}) \times (1 + S_{1012} \exp(j\varphi_{1012}) S_{410} \exp(j\varphi_{1012}) S_{1012} \exp(j\varphi_{1012}) \times (1 + S_{1012} \exp(j\varphi_{1012}) \otimes (1 + S_{1012} \exp(j\varphi_{1012})$$

$$\times S_{D1} \times \exp(J\varphi_{D1})S_{67} \exp(J\varphi_{67})S_{136} \exp(J\varphi_{136}),$$

>

X

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА том 60 № 8 2015

где

$$N_{3} = S_{1616}S'_{1616}\exp(j(\varphi_{1616} + \varphi'_{1616})) + S_{1515}S'_{1515}\exp(j(\varphi_{1515} + \varphi'_{1515})) + S_{1111}S'_{1111} \times \exp(j(\varphi_{1111} + \varphi'_{1111})) + S_{1212}S_{D2}\exp(j(\varphi_{1212} + \varphi_{D2})) + S_{1010}S_{44}\exp(j(\varphi_{1010} + \varphi_{44})) + S_{77}S_{D1} \times \exp(j(\varphi_{77} + \varphi_{D1})) + S_{66}S_{1313}\exp(j(\varphi_{66} + \varphi_{1313})).$$

Коэффициент передачи от генератора промежуточной частоты ко второму порту, описывается выражением

$$S_{1416} = \frac{S_{1716} \exp(j\varphi_{1716})S_{14} \exp(j\varphi_{1417})}{1 + S_{16}S_{16}^{/} \exp(j(\varphi_{16} + \varphi_{16}^{/}))S_{17}S_{17}^{/} \exp(j(\varphi_{17} + \varphi_{17}^{/}))}.$$
(12)

Наибольший интерес представляет четырехполюсник из ориентированного графа  $b_{10} - a_4, a_{10} - b_4$ . При измерении суммы сдвигов фаз испытательный сигнал, образованный в результате смешивания во вспомогательном CBЧ-смесителе сигнала промежуточной частоты  $f_3$  с сигналом CBЧ-гетеродина  $f_2$  по формуле  $f_2 + f_3$ , образует сигнал CBЧ с частотой  $f_1$ , который при больших потерях преобразования имеет малую амплитуду и поэтому подлежит усилению. Дополнительно к этому на разъеме RF вспомогательного смесителя присутствует широкий спектр паразитных сигналов, подлежащих фильтрации. Поэтому между разъемами RF вспомогательного и испытуемого



Рис. 6. Схема, поясняющая формулу (14).

СВЧ-смесителей необходимо последовательно включать полосовой фильтр и усилитель сигнала  $f_3$ , а для устранения перегрузки этим сигналом испытуемого СВЧ-смесителя, в режиме измерения разности сдвигов фаз надо к ним добавить регулируемый аттенюатор.

Обозначим суммарный сдвиг фаз, вносимый последовательно включенными полосовым фильтром, усилителем и аттенюатором  $\phi_3$ . Тогда при измерении разности сдвигов фаз будем иметь  $\Delta \phi' = \phi_1 - \phi_2 - \phi_3$ . А при измерении суммы:  $\Sigma \phi' = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ . И при вычислении сдвигов фаз СВЧ-смесителей  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , как следует из (5), фазовый сдвиг  $\phi_3$  взаимно компенсируется и на результаты вычислений не влияет.

Метод трех смесителей описывается ориентированным графом, аналогичным по форме приведенному на рис. 5. Отличие состоит в том, что испытуемый и вспомогательный СВЧ-смесители во всех трех вариантах подключения к первому и второму портам анализатора цепей присоединяются к нему своими разъемами RF, а между собой – разъемами IF. В первом и, особенно, во втором методе измерений фазовых сдвигов на основе трех СВЧ-смесителей наблюдается (возникает) ошибка измерений сдвигов фаз, которая обусловлена разными величинами коэффициентов отражений в диапазоне СВЧ измерительного порта анализатора СВЧ-цепей, имеющего типичную величину  $\Gamma_1 = 0.08$  (КСВ = 1.2) [9], и сигнальным входом испытуемого СВЧ-смесителя.

Величина коэффициента отражения сигнального СВЧ-входа испытуемого СВЧ-смесителя может быть определена по формуле для СВЧ-четырехполюсников [10] вида

$$\Gamma_{\rm BXCBY} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{l}}{1 - S_{22}\Gamma_{l}},\tag{13}$$

где  $\Gamma_{l} = S_{Dl}$  — коэффициент отражения смесительного диода,  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  — параметры тракта, соединяющего диод с разъёмом RF смесителя.

Приняв  $S_{D1} = 0.2$  и установив, что  $S_{11} = S_{22} = 0.08$ , а произведение  $S_{12} \cdot S_{21} = 0.81$  (типичные значения см. [11]), получим  $\Gamma_{\text{вх СВЧ}} = 0.25$  (КСВ = 1.7).

Для выяснения величины погрешности, возникающей за счет рассогласования разъема RF испытуемого смесителя со смесительным диодом, представим коэффициент отражения входа RF CBЧ-смесителя  $\Gamma_{\text{вх CBЧ}}$  в виде вектора, на конце которого находится вектор коэффициента отражения смесительного диода  $\Gamma_l$  (рис. 6). Для различных диодов или в зависимости от используемой частоты сигнала  $\Gamma_l$  образует окружность возможной погрешности. Для треугольника ABC по теореме косинусов и синусов (см. [3], с. 171) получаем выражение

$$\Delta \phi_{136} = \frac{\Gamma_l \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}{\sqrt{\Gamma_l^2 + \Gamma_{\text{BxCBY}}^2 - 2\Gamma_l \Gamma_{\text{BxCBY}} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)}},$$
 (14)

где  $\Delta \varphi_{136}$  — сдвиг фаз, возникающий в сечении ориентированного графа на рис. 5 между его узлами  $a_{13} - b_{13}$ ; l — электрическая длина пути от разъема RF смесителя до рабочей области p—n перехода смесительного диода D1;  $\lambda$  — длина волны входного CBЧ-сигнала с частотой  $f_1$ .

Используя формулу (14), можно вычислить погрешность определения сдвига фаз испытуемого смесителя для любого значения коэффициента отражения смесительного диода и любого значения рассогласования разъема RF смесителя со смесительным диодом, на любой частоте. Например, для типичных значений  $\Gamma_l$  и  $\Gamma_{\rm bx CB4}$ , использованных в выражении (13), при самом неблагоприятном случае, когда  $\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) = 1$ , с помощью формулы (14) получим максимальную погрешность  $\Delta \phi_{136} = 38.6^{\circ}$ . Из этого следует, что рассогласование разъема RF СВЧ-смесителя со смесительным диодом (КВС = = 1.7) также дает достаточно существенную ошибку измерения сдвигов фаз смесителя. Вместо формулы (14) для вычисления максимального значения погрешности можно использовать стан-

дартное выражение 
$$\arcsin \frac{\Gamma_l}{\Gamma_{\text{вх СВЧ}}}$$
.

Проанализируем отдельно метод отражений. Выражение для амплитудно-фазовой погрешно-

сти смесительного диода СВЧ, как следует из [14] может быть записано в виде

$$\Delta \varphi_0(\Delta I_{\rm np}) = \frac{2\pi f C_b \frac{1}{\varphi_T}}{\left(I_{\rm np} + I_0\right)^2 + \left(2\pi f C_b \frac{1}{\varphi_T}\right)^2} \Delta I_{\rm np}, \quad (15)$$

где  $I_{np}$  – прямой ток, протекающий через смесительный диод,  $\varphi_T = \frac{e}{kT}$  – термический потенциал (e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T = 300 K – абсолютная температура диода),  $I_0 = \frac{I_{np}}{\exp(U\varphi_T) - 1}$  – темновой ток смесительного диода, U – падение напряжения на диоде.

Барьерная емкость С<sub>b</sub> может быть получена из выражения (2), однако для этого необходимо измерить значение истинного сдвига фаз, вносимого смесительным диодом. Такие измерения были выполнены авторами для типового смесительного диода типа 2A123 на установке, описанной в [15]. Исходя из этих данных, получили, что  $\phi_0 = 100.3^\circ$ ,  $C_b = 0.44 \,\mathrm{n}\Phi, U = 400 \,\mathrm{MB}, f = 8.5 \,\Gamma$ Гц,  $I_{\mathrm{np}} = 1.72 \,\mathrm{MA},$ а измеренное динамическое сопротивление диода, необходимое для выражения (2),  $r_g = 232.5$  Ом. Подставив эти значения в выражение (15), можно построить зависимость амплитудно-фазовой погрешности от тока, протекающего через смесительный диод СВЧ. Эта зависимость линейна, и из нее вытекает, что изменение тока через диод на 1 мА вызывает сдвиг фаз примерно в 10° для диода 2А123.

Так как уровни падающей и отраженной мощности по определению различны, то токи через диод, вызываемые падающим и отраженным сигналом, также будут различаться, создавая в диоде разные сдвиги фаз. Это ведет к погрешности измерений истинного значения сдвига фаз, поскольку данный метод предполагает, что смеситель идеальный и сдвиг фаз у него в обоих направлениях одинаков. Допустим, что потери преобразования в диоде идеальны и составляют 3 дБ. При мощности зондирующего сигнала в P = 10 дБм == 10 мВт, имеем ток через диод  $I_{\rm np} = \sqrt{P/r_g} = 6$  мА. Но пройдя через смеситель, мощность сигнала снизится до 7 дБм. Далее, проходя через линию задержки и всю измерительную систему, мощность сигнала после отражения снизится, как минимум, еще на 3 дБ и составит P = 4 дБм = 2.5 мВт, при этом ток через диод будет равен 3.3 мА. При такой разнице токов согласно выражению (15) разность между фазовыми сдвигами для прямой и отраженной волн составит примерно  $\Delta \phi_0 = 2.7^{\circ}$ . Таким образом, даже при самых идеальных условиях, которые на практике недостижимы, погрешность метода отражений составляет более 2°. При реальных измерениях к потерям смесителя добавляются потери линии задержки, неидеальность рассогласованной нагрузки и, таким образом, как показывают расчеты, погрешность может составлять 4° и более. Это подтверждается и в работе [16], где автор отмечает, что данный метод может использоваться лишь со смесителями, потери которых не превышают 10 дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основными недостатками первых двух методов являются существенные погрешности, возникающие в них из-за паразитных связей между испытуемым и вспомогательным СВЧ-смесителями и большое количество переключений в диапазоне СВЧ для реализации измерений суммы и разности сдвигов фаз. Метод двух смесителей имеет меньшую погрешность измерений, чем метод трех смесителей за счет меньшего количества переключений и постоянной величины погрешности, возникающей за счет разных коэффициентов отражений входного порта анализатора цепей и СВЧ-входа испытуемого СВЧ-смесителя, которую можно учесть. Однако, при этом метод двух смесителей конструктивно сложнее в инженерной реализации, чем метод трех смесителей. Наиболее простым в технической реализации является метод отражений, однако он не подходит для смесителей с большими потерями и также обладает большой погрешностью. Отмечаем, что современные векторные анализаторы цепей имеют среднюю погрешность измерения фазы обычных четырехполюсников (без преобразования частоты) равную 2° [12, 13], в то время как погрешность рассмотренных методов измерения параметров четырехполюсников с преобразованием частоты, как видно из проведенного анализа, составляет как минимум 4°. Для снижения этой погрешности и создания более точного метода измерения параметров смесителей, необходимо: во-первых, не использовать переключатели в СВЧтрактах в ходе процедуры измерений; во-вторых, обеспечивать высокую развязку между испытуемым и вспомогательными СВЧ-смесителями, которая может быть реализована при использовании делителей в волноводном исполнении; в-третьих, проводить измерения при постоянных уровнях входного сигнала и гетеродина.

Также, необходимо отметить, что в данных физических измерениях более правильно говорить об измерении "запаздывания" сигнала промежуточной частоты относительно входного СВЧ-сигнала, за счет реактивных составляющих эквивалентной схемы смесительного диода, а не о сдвиге фаз, так как классическое понятие сдвига фаз относится к сигналам одной и той же частоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Губа В.Г., Савин А.А., Ульянов В.Н. //* Докл. ТУСУР. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 156.
- 2. Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский Е.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М.: Сов. радио, 1974. С. 130.
- 3. *Коротков К.С.* Методы определения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств с преобразованием частоты. Дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2002.
- 4. *Коротков К.С.* Способ определения коэффициентов передачи четырехполюсников с преобразованием частоты. А.с. СССР № 1596278. Опубл. Б.И. № 36, 30.09.1990.
- Елизаров А.С. Способ определения коэффициентов передачи преобразователей частоты. Пат. РФ № 2029966. Опубл. Офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". 27.02.1995.
- 6. *Knox M.E.* Method for Characterizing Delay of Frequency Translation Devices. US Pat. № 6362631 B1. Publ. 26.03.2002.
- 7. Силаев М.А., Брянцев С.В. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. М.: Сов. радио, 1970.
- Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ / Под. ред. А.М. Кузнецова. М.: Радиотехника, 2006. С. 106, 110.
- Контрольно-измерительное оборудование фирмы Agilent Technologies. Каталог 2013. М.: Agilent Technologies Russia, 2013. С. 146, 181.

- Фельдитейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1970. С. 17.
- 11. *Мильченко Д.Н.* Разработка методов построения измерителей коэффициентов передачи и отражения четырехполюсников СВЧ. Дис. ... канд. техн. наук. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2012.
- Контрольно-измерительные приборы СВЧ фирмы "Микран". Каталог 2008. Томск: ЗАО НПФ "Микран", 2008. С. 16.
- High Performance, Broadband Network Analysis Solutions. ME7838A Series Vector Network Analyzers: Technical Data Sheet & Configuration Guide 114110-00593, Rev. B. Anritsu Company, USA, 2011. P. 6. http://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/ anritsu me7838a datasheet.pdf
- 14. Коротков К.С., Перечнев Д.Н., Фролов Д.Р. Способ определения амплитудно-фазовой погрешности смесителя СВЧ в измерителе комплексных коэффициентов передачи и отражения четырехполюсников СВЧ // Пат. РФ № 2499272. Опубл. Офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели". № 32. 20.11.2013.
- Korotkov K.S., Frolov D.R., Levchenko A.S. // Proc. 23nd Int. Crimean Conf. "Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)", Sevastopol, 8– 14 Sep. 2013. N.Y.: IEEE, 2013. P. 938.
- 16. *Dunsmore J.P.* Handbook of Microwave Component Measurements with Advanced VNA Techniques. Chichester: J. Wiley & Sons Ltd., 2012. P. 463.