

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **22074**

(13) **С1**

(46) **2018.08.30**

(51) МПК

G 01R 27/02 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, НЕСУЩИХ
ИНФОРМАЦИЮ О КВАДРАТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
S-ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВА**

(21) Номер заявки: а 20150675

(22) 2015.12.29

(43) 2017.08.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Гусинский Александр Владимирович; Кострикин Анатолий Михайлович; Кондрашов Денис Александрович; Сайков Алексей Викторович; Липатников Владимир Петрович; Певнева Наталья Алексеевна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) ГУСИНСКИЙ А.В. и др. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: монография. - В 3 ч. - Ч. 3. - Кн. 1. Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей. - Минск: БГУИР, 2008. - С. 72-77, 80-83, 104-107.

ВУ 6193 С1, 2004.

ВУ 16923 С1, 2013.

RU 2010248 С1, 1994.

SU 1167537 А, 1985.

SU 1517077 А1, 1989.

SU 1690031 А1, 1991.

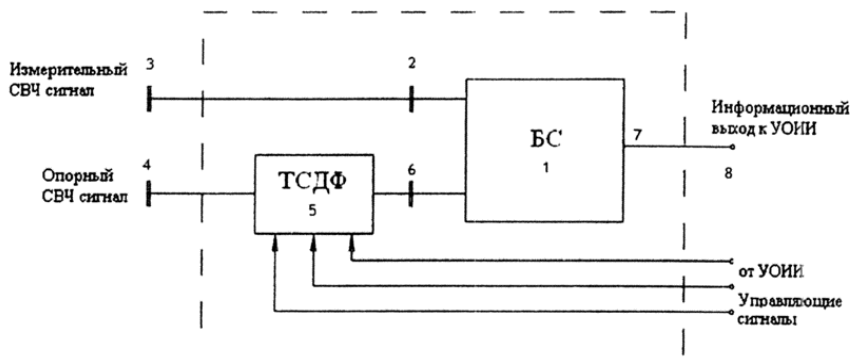
DE 4006869 А1, 1991.

US 4777429, 1988.

КОНДРАШОВ Д.А. и др. Доклады БГУИР. - 2014. - № 6. - С. 17-20.

(57)

Способ формирования напряжений, несущих информацию о действительной Re и мнимой Im квадратурных составляющих S -параметров СВЧ-устройства при измерениях посредством гомодинного векторного анализатора цепей (ВАЦ) миллиметрового диапазона длин волн, при котором измерительный СВЧ-сигнал, несущий информацию об измеряемом параметре \dot{S}_x , подают на первый вход балансного смесителя (БС) формирователя упомянутых напряжений, а опорный СВЧ-сигнал, являющийся частью выходного СВЧ-сигнала генератора гомодинного ВАЦ, подают на второй вход БС через электрически



ВУ 22074 С1 2018.08.30

управляемый трехсекционный дискретный фазовращатель (ТСДФ), выполненный с возможностью воспроизведения восьми состояний фазового сдвига, причем каждая секция ТСДФ выполнена в виде отрезка волноводно-щелевой линии с последовательно включенными p-n-p-диодами, расположенными на расстоянии $\frac{\lambda_{cp}}{4}$ друг от друга, где λ_{cp} - длина

волны на средней частоте рабочего диапазона частот, причем создают фазовый сдвиг в каждой из секций приблизительно на -30° путем изменения собственной реактивности p-n-p-диода при переключении его из закрытого состояния в открытое; формируют выходные напряжения U_i БС, подаваемые на вход блока управления и обработки измерительной информации (БУОИИ) гомодинного ВАЦ, в соответствии с выражением:

$$U_i = \text{Re}(\dot{t}_0 \cdot \dot{t}_{1i} \cdot \dot{t}_{2i} \cdot \dot{t}_{3i} \cdot \dot{S}_x) = \frac{1}{2} \{ [\text{Re}(\dot{t}_0) + \text{Im}(\dot{t}_0)] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{1i}) + \text{Im}(\dot{t}_{1i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{2i}) + \text{Im}(\dot{t}_{2i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{3i}) + \text{Im}(\dot{t}_{3i})] \cdot [\text{Re}(\dot{S}_x) + \text{Im}(\dot{S}_x)] + [\text{Re}(\dot{t}_0) - \text{Im}(\dot{t}_0)] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{1i}) - \text{Im}(\dot{t}_{1i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{2i}) - \text{Im}(\dot{t}_{2i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{3i}) - \text{Im}(\dot{t}_{3i})] \cdot [\text{Re}(\dot{S}_x) - \text{Im}(\dot{S}_x)] \},$$

где $i = 1, \dots, 8$;

\dot{t}_0 - комплексная величина, характеризующая упомянутый формирователь при исходном закрытом состоянии p-n-p-диодов ТСДФ;

$\dot{t}_{1i}, \dot{t}_{2i}, \dot{t}_{3i}$ - комплексные величины, характеризующие состояния ТСДФ,

причем в первом состоянии при $i = 1$ все три p-n-p-диода закрыты, фазовый сдвиг исходный, где $[\text{Re}(\dot{t}_{11}) = \text{Re}(\dot{t}_{21}) = \text{Re}(\dot{t}_{31}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{11}) = \text{Im}(\dot{t}_{21}) = \text{Im}(\dot{t}_{31}) = 0]$;

во втором состоянии при $i = 2$ первый p-n-p-диод открыт, второй и третий p-n-p-диоды закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{12}) = r_{c1}; \text{Im}(\dot{t}_{12}) = r_{s1}; \text{Re}(\dot{t}_{22}) = \text{Re}(\dot{t}_{32}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{22}) = \text{Im}(\dot{t}_{32}) = 0]$;

в третьем состоянии при $i = 3$ второй p-n-p-диод открыт, первый и третий p-n-p-диоды закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{13}) = r_{c2}; \text{Im}(\dot{t}_{13}) = r_{s2}; \text{Re}(\dot{t}_{23}) = \text{Re}(\dot{t}_{33}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{23}) = \text{Im}(\dot{t}_{33}) = 0]$;

в четвертом состоянии при $i = 4$ третий p-n-p-диод открыт, первый и второй p-n-p-диоды закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{14}) = r_{c3}; \text{Im}(\dot{t}_{14}) = r_{s3}; \text{Re}(\dot{t}_{24}) = \text{Re}(\dot{t}_{34}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{24}) = \text{Im}(\dot{t}_{34}) = 0]$;

в пятом состоянии при $i = 5$ первый и второй p-n-p-диоды открыты, третий p-n-p-диод закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{15}) = r_{c1}; \text{Im}(\dot{t}_{15}) = r_{s1}; \text{Re}(\dot{t}_{25}) = r_{c2}; \text{Im}(\dot{t}_{25}) = r_{s2}; \text{Re}(\dot{t}_{35}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{35}) = 0]$;

в шестом состоянии при $i = 6$ первый и третий p-n-p-диоды открыты, второй p-n-p-диод закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{16}) = r_{c1}; \text{Im}(\dot{t}_{16}) = r_{s1}; \text{Re}(\dot{t}_{26}) = r_{c3}; \text{Im}(\dot{t}_{26}) = r_{s3}; \text{Re}(\dot{t}_{36}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{36}) = 0]$;

в седьмом состоянии при $i = 7$ второй и третий p-n-p-диоды открыты, первый p-n-p-диод закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° , где $[\text{Re}(\dot{t}_{17}) = r_{c2}; \text{Im}(\dot{t}_{17}) = r_{s2}; \text{Re}(\dot{t}_{27}) = r_{c3}; \text{Im}(\dot{t}_{27}) = r_{s3}; \text{Re}(\dot{t}_{37}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{37}) = 0]$;

в восьмом состоянии при $i = 8$ все три p-n-p-диода открыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90° ,

где $[\text{Re}(\dot{t}_{18}) = r_{c1}; \text{Im}(\dot{t}_{18}) = r_{s1}; \text{Re}(\dot{t}_{28}) = r_{c2}; \text{Im}(\dot{t}_{28}) = r_{s2}; \text{Re}(\dot{t}_{38}) = r_{c3}; \text{Im}(\dot{t}_{38}) = r_{s3}]$, где r_{c1} и r_{s1} ; r_{c2} и r_{s2} ; r_{c3} и r_{s3} характеризуют соответственно потери и фазовый сдвиг при переключении трех p-n-p-диодов из закрытого состояния в открытое;

осуществляют калибровку гомодинного ВАЦ в режиме измерения комплексного коэффициента передачи $\dot{S}_{xПК}$ путем замыкания накоротко фланцев для подключения исследуемого

дуемого СВЧ-устройства, где $[\dot{S}_{xПК} = 1; \text{Re}(\dot{S}_{xПК}) = 1; \text{Im}(\dot{S}_{xПК}) = 0]$, и при подаче управляющих сигналов от БУОИИ на ТСДФ получают на выходе БС восемь значений напряжений $U_{iПК}$; осуществляют калибровку гомодинного ВАЦ в режиме измерения комплексного коэффициента отражения $\dot{S}_{xОК}$ путем подключения короткозамыкателя к входному фланцу для подключения исследуемого СВЧ-устройства, где $[\dot{S}_{xОК} = -1; \text{Re}(\dot{S}_{xОК}) = -1; \text{Im}(\dot{S}_{xОК}) = 0]$, и при подаче управляющих сигналов от БУОИИ на ТСДФ получают на выходе БС два значения напряжений $U_{1ОК}, U_{2ОК}$, причем в первом состоянии ТСДФ все три р-п-р-диода закрыты, фазовый сдвиг исходный, а во втором состоянии ТСДФ все три р-п-р-диода открыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90° ; после чего определяют параметры r_{c1}, r_{c2}, r_{c3} , а также r_{s1}, r_{s2}, r_{s3} соответственно из выражений:

$$r_{c1} = \frac{U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{4ПК} \cdot U_{5ПК}}{2(U_{1ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{4ПК})};$$

$$r_{c2} = \frac{U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{3ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{4ПК} \cdot U_{5ПК}}{2(U_{1ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{4ПК})};$$

$$r_{c3} = \frac{U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{4ПК} \cdot U_{5ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{6ПК}}{2(U_{1ПК} \cdot U_{5ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{3ПК})};$$

$$r_{s1} = -\sqrt{\frac{4(U_{2ПК} \cdot U_{8ПК} - U_{5ПК} \cdot U_{6ПК}) \cdot (U_{1ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{4ПК}) - (U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{1ПК} \cdot U_{8ПК})}{2(U_{1ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{4ПК})}};$$

$$r_{s2} = -\sqrt{\frac{4(U_{4ПК} \cdot U_{8ПК} - U_{5ПК} \cdot U_{7ПК}) \cdot (U_{1ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{4ПК}) - (U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{3ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{4ПК} \cdot U_{5ПК})}{2(U_{1ПК} \cdot U_{6ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{4ПК})}};$$

$$r_{s3} = -\sqrt{\frac{4(U_{4ПК} \cdot U_{8ПК} - U_{6ПК} \cdot U_{7ПК}) \cdot (U_{1ПК} \cdot U_{5ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{3ПК}) - (U_{1ПК} \cdot U_{8ПК} + U_{4ПК} \cdot U_{5ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{7ПК} - U_{3ПК} \cdot U_{6ПК})}{2(U_{1ПК} \cdot U_{5ПК} - U_{2ПК} \cdot U_{3ПК})}};$$

затем определяют r_{c123} и r_{s123} соответственно из выражений:

$$r_{c123} = r_{c1} \cdot r_{c2} \cdot r_{c3} - r_{c1} \cdot r_{s2} \cdot r_{s3} - r_{s1} \cdot r_{c2} \cdot r_{s3} - r_{s1} \cdot r_{s2} \cdot r_{c3},$$

$$r_{s123} = r_{c1} \cdot r_{c2} \cdot r_{s3} + r_{c1} \cdot r_{s2} \cdot r_{c3} + r_{s1} \cdot r_{c2} \cdot r_{c3} - r_{s1} \cdot r_{s2} \cdot r_{s3},$$

определяют $\text{Re}(\dot{t}_{0П}), \text{Im}(\dot{t}_{0П}), \text{Re}(\dot{t}_{0О}), \text{Im}(\dot{t}_{0О})$ соответственно из выражений:

$$\text{Re}(\dot{t}_{0П}) = U_{1ПК};$$

$$\text{Im}(\dot{t}_{0П}) = \frac{r_{c123} \cdot U_{1ПК} - U_{8ПК}}{r_{s123}};$$

$$\text{Re}(\dot{t}_{0О}) = -U_{1ОК};$$

$$\text{Im}(\dot{t}_{0О}) = \frac{U_{2ОК} - r_{c123} \cdot U_{1ОК}}{r_{s123}};$$

причем значения $r_{c123}, r_{s123}, \text{Re}(\dot{t}_{0П}), \text{Im}(\dot{t}_{0П}), \text{Re}(\dot{t}_{0О}), \text{Im}(\dot{t}_{0О})$ запоминают; после чего в режимах измерения комплексного коэффициента передачи $\dot{S}_{xП}$ и отражения $\dot{S}_{xО}$ подключают к соответствующим фланцам гомодинного ВАЦ исследуемое СВЧ-устройство, получают на выходе БС по два значения напряжений $U_{1ПИ}, U_{2ПИ}$ и $U_{1ОИ}, U_{2ОИ}$ соответственно в режимах измерения $\dot{S}_{xП}$ и $\dot{S}_{xО}$, причем в первом состоянии ТСДФ все три р-п-р-диода закрыты, фазовый сдвиг исходный, во втором состоянии все три р-п-р-диода открыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90° , и определяют $\text{Re}(\dot{S}_{xП}), \text{Im}(\dot{S}_{xП}), \text{Re}(\dot{S}_{xО}), \text{Im}(\dot{S}_{xО})$ соответственно из выражений:

$$\text{Re}(\dot{S}_{xП}) = \frac{\text{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot U_{2ПИ} - [\text{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123} + \text{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123}] \cdot U_{1ПИ}}{[\text{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123} - \text{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123}] \cdot \text{Im}(\dot{t}_{0П}) - [\text{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123} + \text{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123}] \cdot \text{Re}(\dot{t}_{0П})};$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{хП}}) &= \frac{\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot U_{2\text{ПИ}} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot U_{1\text{ПИ}}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{П}}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{П}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{П}})}; \\ \operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{хО}}) &= \frac{\operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot U_{2\text{ОИ}} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot U_{1\text{ОИ}}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}})}; \\ \operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{хО}}) &= \frac{\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot U_{2\text{ОИ}} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot U_{1\text{ОИ}}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0\text{О}}) \cdot r_{\text{с123}}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{0\text{О}})}. \end{aligned}$$

Изобретение относится к технике измерений в миллиметровом диапазоне длин волн и может быть использовано при формировании напряжений, несущих информацию о действительной Re и мнимой Im (квадратурных) составляющих при определении S -параметров СВЧ-устройств различных видов (двухполюсников, четырехполюсников, многополюсников) с помощью гомодинных векторных анализаторов цепей (ВАЦ).

Известен способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих параметров СВЧ-устройств, основанный на одновременном аппаратурном формировании в каждой частотной точке таких напряжений. Реализация указанного способа может осуществляться на основе четырех двойных волноводных тройников, двух фазосдвигающих секций и четырех СВЧ-диодов: трех двойных волноводных тройников, трехдецибелного направленного ответвителя и четырех СВЧ-диодов, кольцевого гибридного соединения, образующего квадратурный мост с измененной длиной одного из H -плоскостных изгибов, и двух СВЧ-диодов [1, с. 95-105]. Основными недостатками способа являются, во-первых, необходимость в большом количестве СВЧ-элементов, которые должны быть хорошо согласованы, иметь достаточную развязку, во-вторых, требуется применение большого количества СВЧ-диодов, а неидентичность их характеристик снижает точность сформированных напряжений, в-третьих, элементы, обеспечивающие необходимый фазовый сдвиг (фазосдвигающие секции, трехдецибелный направленный ответвитель, H -плоскостной изгиб с измененной длиной), делают это в ограниченном частотном диапазоне и возникает необходимость калибровки формирователей с использованием эталонов - мер фазового сдвига, что усложняет процесс калибровки. В миллиметровом диапазоне длин волн меры изготавливаются с микронной точностью, что обуславливает их высокую стоимость.

Известен способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих параметров СВЧ-устройств, основанный на аппаратурном формировании в каждой частотной точке напряжений, несущих информацию о действительной составляющей, и получении значений напряжений, несущих информацию о мнимой составляющей, программным путем на основе, например, преобразования Гильберта. Для получения напряжений, несущих информацию о действительной составляющей в миллиметровом диапазоне длин волн, наиболее целесообразно использовать балансный смеситель (БС) [1, с. 106-111], в котором смешивают СВЧ-сигнал, несущий информацию об измеряемом параметре, и опорный СВЧ-сигнал, который является частью сигнала СВЧ-генератора.

Однако недостатком указанного способа является необходимость учета временных и частотных "окон" и связанных с этим ограничений по быстродействию и точности. Особенно ограничение по точности касается краев частотного диапазона, где погрешности могут достигать сотни процентов. Для достижений допустимого уровня погрешностей необходимо сужать частотный диапазон приблизительно на 20 % путем отбрасывания точек в начале и конце диапазона.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S -параметров, основан-

ный на раздельном во времени аппаратурном формировании напряжений в каждой частотной точке при подаче на первый вход БС измерительного СВЧ-сигнала, несущего информацию об измеряемом S-параметре, а на второй вход БС опорного СВЧ-сигнала, являющегося частью выходного сигнала генератора через бинарный фазовращатель и имеющего отличающиеся приблизительно на 90° раздельные во времени фазовые сдвиги [1, с. 105-106].

Однако данный способ, несмотря на обеспечение конструктивной простоты (необходимость только одного балансного смесителя), минимальных потерь в СВЧ-тракте, имеет ряд недостатков: во-первых, в миллиметровом диапазоне длин волн бинарный фазовращатель обеспечивает фазовую коммутацию сигнала по алгоритму $0 -$ приблизительно 90° приемлемой точностью в ограниченном диапазоне частот (на краях диапазона фазовый сдвиг может отличаться от номинального на $\pm 15^\circ$), и, во-вторых, из-за вышеприведенного необходима калибровка фазовращателя с использованием дорогостоящих эталонов - мер фазового сдвига, тем самым усложняя калибровку.

Задача изобретения - обеспечение в миллиметровом диапазоне длин волн формирования изображений, пропорциональных квадратурным составляющим S-параметров, без применения при калибровке эталонов - мер фазового сдвига.

Задача достигается тем, что в известном способе формирования напряжений, пропорциональных квадратурным составляющим S-параметров, основанном на раздельном во времени аппаратурном формировании напряжений в каждой частотной точке вместо бинарного фазовращателя, осуществляющего фазовую коммутацию СВЧ-сигнала по алгоритму $0 -$ приблизительно 90° , используется дискретный фазовращатель типа периодически нагруженной линии передачи [2]. Принцип работы дискретного фазовращателя основан на скачкообразном изменении фазового сдвига проходящего СВЧ-сигнала за счет изменения электрической длины фазовращателя. В конструкции фазовращателя используются три ячейки фазового сдвига, соединенные последовательно. Каждая ячейка представляет собой отрезок волноводно-щелевой линии с последовательно включенными р-п-р-диодами, расположенными на расстоянии $\lambda_{cp}/4$ друг от друга, где λ_{cp} - длина волны на средней частоте рабочего диапазона частот. Для создания фазового сдвига используется изменение собственной реактивности р-п-р-диода при переключении его из закрытого состояния в открытое. Конструктивные элементы выбраны таким образом, чтобы на средней частоте рабочего диапазона сдвиг фаз составлял приблизительно -30° при переключении р-п-р-диодов из закрытого состояния в открытое и обратно. Ячейки коммутируются независимо друг от друга, и, таким образом, фазовращатель обеспечивает восемь возможных значений фазового сдвига.

Значения выходных напряжений БС описываются выражением:

$$U_i = \text{Re}(\dot{t}_0 \cdot \dot{t}_{1i} \cdot \dot{t}_{2i} \cdot \dot{t}_{3i} \cdot \dot{S}_x) = \frac{1}{2} \{ [\text{Re}(\dot{t}_0) + \text{Im}(\dot{t}_0)] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{1i}) + \text{Im}(\dot{t}_{1i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{2i}) + \text{Im}(\dot{t}_{2i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{3i}) + \text{Im}(\dot{t}_{3i})] \cdot [\text{Re}(\dot{S}_x) + \text{Im}(\dot{S}_x)] + [\text{Re}(\dot{t}_0) - \text{Im}(\dot{t}_0)] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{1i}) - \text{Im}(\dot{t}_{1i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{2i}) - \text{Im}(\dot{t}_{2i})] \cdot [\text{Re}(\dot{t}_{3i}) + \text{Im}(\dot{t}_{3i})] \cdot [\text{Re}(\dot{S}_x) - \text{Im}(\dot{S}_x)] \},$$

где \dot{t}_0 - комплексная величина, характеризующая формирователь при исходном закрытом состоянии р-п-р-диодов; $\dot{t}_{1i}, \dot{t}_{2i}, \dot{t}_{3i}$, $i = 1, \dots, 8$ - комплексные величины, характеризующие состояния фазовращателя, при этом первое состояние ($i = 1$) - все три р-п-р-диоды закрыты, фазовый сдвиг исходный $[\text{Re}(\dot{t}_{11}) = \text{Re}(\dot{t}_{21}) = \text{Re}(\dot{t}_{31}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{11}) = \text{Im}(\dot{t}_{21}) = \text{Im}(\dot{t}_{31}) = 0]$; второе состояние ($i = 2$) - первый р-п-р-диод открыт, второй и третий закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° $[\text{Re}(\dot{t}_{12}) = r_{c1}; \text{Im}(\dot{t}_{12}) = r_{s1}; \text{Re}(\dot{t}_{22}) = \text{Re}(\dot{t}_{32}) = 1; \text{Im}(\dot{t}_{22}) = \text{Im}(\dot{t}_{32}) = 0]$; третье состояние ($i = 3$) - второй р-п-р-диод от-

крыт, первый и третий закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° [$\text{Re}(\dot{t}_{23}) = r_{c2}$; $\text{Im}(\dot{t}_{23}) = r_{s2}$; $\text{Re}(\dot{t}_{13}) = \text{Re}(\dot{t}_{33}) = 1$; $\text{Im}(\dot{t}_{13}) = \text{Im}(\dot{t}_{33}) = 0$]; четвертое состояние ($i = 4$) - третий диод открыт, первый и второй закрыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -30° [$\text{Re}(\dot{t}_{34}) = r_{c3}$; $\text{Im}(\dot{t}_{34}) = r_{s3}$; $\text{Re}(\dot{t}_{14}) = \text{Re}(\dot{t}_{24}) = 1$; $\text{Im}(\dot{t}_{14}) = \text{Im}(\dot{t}_{24}) = 0$]; пятое состояние ($i = 5$) - первый и второй р-п-диоды открыты, третий закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° [$\text{Re}(\dot{t}_{15}) = r_{c1}$; $\text{Im}(\dot{t}_{15}) = r_{s1}$; $\text{Re}(\dot{t}_{25}) = r_{c2}$; $\text{Im}(\dot{t}_{25}) = r_{s2}$; $\text{Re}(\dot{t}_{35}) = 1$; $\text{Im}(\dot{t}_{35}) = 0$]; шестое состояние ($i = 6$) - первый и третий р-п-диоды открыты, второй закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° [$\text{Re}(\dot{t}_{16}) = r_{c1}$; $\text{Im}(\dot{t}_{16}) = r_{s1}$; $\text{Re}(\dot{t}_{36}) = r_{c3}$; $\text{Im}(\dot{t}_{36}) = r_{s3}$; $\text{Re}(\dot{t}_{26}) = 1$; $\text{Im}(\dot{t}_{26}) = 0$]; седьмое состояние ($i = 7$) - второй и третий р-п-диоды открыты, первый закрыт, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -60° [$\text{Re}(\dot{t}_{27}) = r_{c2}$; $\text{Im}(\dot{t}_{27}) = r_{s2}$; $\text{Re}(\dot{t}_{37}) = r_{c3}$; $\text{Im}(\dot{t}_{37}) = r_{s3}$; $\text{Re}(\dot{t}_{17}) = 1$; $\text{Im}(\dot{t}_{17}) = 0$]; восьмое состояние ($i = 8$) - все три р-п-диоды открыты, фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90° [$\text{Re}(\dot{t}_{18}) = r_{c1}$; $\text{Im}(\dot{t}_{18}) = r_{s1}$; $\text{Re}(\dot{t}_{2836}) = r_{c2}$; $\text{Im}(\dot{t}_{28}) = r_{s2}$; $\text{Re}(\dot{t}_{38}) = r_{c3}$; $\text{Im}(\dot{t}_{38}) = r_{s3}$]; r_{c1} , r_{s1} , r_{c2} , r_{s2} , r_{c3} , r_{s3} характеризуют потери и фазовый сдвиг при переключении р-п-диодов из закрытого состояния в открытое; при калибровке в режиме измерения комплексного коэффициента передачи $\dot{S}_{\text{хпк}}$ замыкают накоротко фланцы для подключения исследуемого СВЧ-устройства [$\dot{S}_{\text{хпк}} = 1$; $\text{Re}(\dot{S}_{\text{хпк}}) = 1$; $\text{Im}(\dot{S}_{\text{хпк}}) = 0$] и при подаче управляющих сигналов от БУОИИ определяют восемь значений напряжений $U_{\text{ипк}}$; при калибровке в режиме измерения комплексного коэффициента отражения $\dot{S}_{\text{хок}}$ к входному фланцу для подключения исследуемого СВЧ-устройства подключают короткозамыкатель [$\dot{S}_{\text{хок}} = -1$; т.е. $\text{Re}(\dot{S}_{\text{хок}}) = -1$; $\text{Im}(\dot{S}_{\text{хок}}) = 0$] и при подаче управляющих сигналов от БУОИИ определяют два значения напряжений $U_{1\text{по}}$, $U_{2\text{по}}$, причем при первом состоянии фазовращателя (индекс 1) все три р-п-диода закрыты (исходный фазовый сдвиг), при втором состоянии (индекс 2) все три р-п-диода открыты (фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90°); обрабатывают значения $U_{1\text{пк}}, \dots, U_{8\text{пк}}, U_{1\text{по}}, U_{2\text{по}}$ по следующему оригинальному алгоритму:

$$r_{c1} = \frac{U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{4\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}}}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}})}$$

$$r_{c2} = \frac{U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{4\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}}}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}})}$$

$$r_{c3} = \frac{U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{4\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}}}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{3\text{пк}})}$$

$$r_{s1} = -\sqrt{\frac{4(U_{2\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} - U_{5\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}})(U_{1\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}}) - (U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}})}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}})}}$$

$$r_{s2} = -\sqrt{\frac{4(U_{4\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} - U_{5\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}})(U_{1\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}}) - (U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{4\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}})}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{4\text{пк}})}}$$

$$r_{s3} = -\sqrt{\frac{4(U_{4\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} - U_{6\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}})(U_{1\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{3\text{пк}}) - (U_{1\text{пк}} \cdot U_{8\text{пк}} + U_{4\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{7\text{пк}} - U_{3\text{пк}} \cdot U_{6\text{пк}})}{2(U_{1\text{пк}} \cdot U_{5\text{пк}} - U_{2\text{пк}} \cdot U_{3\text{пк}})}}$$

$$\Gamma_{c123} = \Gamma_{c1} \cdot \Gamma_{c2} \cdot \Gamma_{c3} - \Gamma_{c1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{s3} - \Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{c2} \cdot \Gamma_{s3} - \Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{c3};$$

$$\Gamma_{s123} = \Gamma_{c1} \cdot \Gamma_{c2} \cdot \Gamma_{s3} + \Gamma_{c1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{c3} + \Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{c2} \cdot \Gamma_{c3} - \Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{s3};$$

$$\text{Re}(\dot{t}_{\text{оп}}) = U_{1\text{пк}}; \quad \text{Im}(\dot{t}_{\text{оп}}) = \frac{\Gamma_{c123} \cdot U_{1\text{пк}} - U_{8\text{пк}}}{\Gamma_{s123}};$$

$$\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) = -U_{10K}; \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) = \frac{U_{20K} - r_{c123} \cdot U_{10K}}{r_{s123}}$$

причем значения r_{c123} , r_{s123} , $\operatorname{Re}_e(\dot{t}_{0П})$, $\operatorname{Im}(\dot{t}_{0П})$, $\operatorname{Re}(\dot{t}_{00})$, $\operatorname{Im}(\dot{t}_{00})$ запоминают; в режимах измерения комплексных коэффициентов передачи $\dot{S}_{xП}$ и отражения \dot{S}_{xO} подключают исследуемое СВЧ-устройство, определяют по два значения напряжений $U_{1Пн}$, $U_{2Пн}$ и $U_{10и}$, $U_{20и}$ в каждом из режимов, причем при первом состоянии фазовращателя (индекс 1) все три р-п-р-диода закрыты (исходный фазовый сдвиг), при втором состоянии (индекс 2) все три р-п-р-диода открыты (фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на -90°), обрабатывают значения по следующему оригинальному алгоритму

$$\operatorname{Re}(\dot{S}_{xП}) = \frac{I_m(\dot{t}_{0П}) \cdot U_{2Пн} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123} + I_m(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123}] \cdot U_{1Пн}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{0П})};$$

$$\operatorname{Im}(\dot{S}_{xП}) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot U_{2Пн} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123}] \cdot U_{1Пн}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{s123} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{0П}) \cdot r_{c123}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{0П})};$$

$$\operatorname{Re}(\dot{S}_{xO}) = \frac{I_m(\dot{t}_{00}) \cdot U_{20и} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123} + I_m(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123}] \cdot U_{10и}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{00})};$$

$$\operatorname{Im}(\dot{S}_{xO}) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot U_{20и} - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123}] \cdot U_{10и}}{[\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123} - \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123}] \cdot \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) - [\operatorname{Re}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{s123} + \operatorname{Im}(\dot{t}_{00}) \cdot r_{c123}] \cdot \operatorname{Re}(\dot{t}_{00})}.$$

Сравнительный анализ с прототипом показывает, что заявляемый способ отличается фазовой манипуляцией опорного СВЧ-сигнала, позволяющей получить восемь комбинаций фазового сдвига в пределах $0 - -90^\circ$, и измеренные значения напряжений на выходе БС при использовании специального алгоритма обработки измерительной информации служат для определения при калибровке комплексных величин, характерных при реализации фазовой манипуляции СВЧ-сигнала с помощью бинарного фазовращателя. За счет комбинационной манипуляции и специального алгоритма обработки измерительной информации удастся обеспечить калибровку фазовращателя в миллиметровом диапазоне длин волн, для которого свойственен широкий диапазон рабочих частот без применения дорогостоящих эталонов - мер фазового сдвига.

Предлагаемый способ иллюстрируется фигурой.

На фигуре представлена структурная схема формирователя 1, с помощью которого может быть реализован предлагаемый способ.

Формирователь 1, с помощью которого может быть реализован предлагаемый способ, содержит балансный смеситель (БС) 3, первый вход которого 1 соединен со входом 1 формирователя, на который подается измерительный СВЧ-сигнал, а второй вход 2 через трехсекционный дискретный фазовращатель (ТСДФ) 2 соединен со входом 2 формирователя, на который подается опорный СВЧ-сигнал, выход БС 3 соединен с информационным выходом 3 формирователя, с которого передаются напряжения в устройство обработки измерительной информации (УОИИ), управляемые входы ТСДФ 2 соединены с управляемыми входами формирователя, при этом на эти управляемые входы поступают управляющие сигналы из УОИИ.

Гомодинный ВАЦ, работающий в диапазоне частот 78,33-118,1 ГГц, в котором реализован предложенный способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ-устройств, изготовлен в научно-образовательном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

ВУ 22074 С1 2018.08.30

Источники информации:

1. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Монография В34.4.3. Кн. 1. Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей. - Минск: БГУИР, 2008. - 240 с.
2. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1981. - 295 с.