

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034867**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.03.31

(51) Int. Cl. **G01R 27/32 (2006.01)**

(21) Номер заявки
201700381

(22) Дата подачи заявки
2015.09.01

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ S-ПАРАМЕТРОВ

(43) **2018.09.28**

(86) **PCT/RU2015/000551**

(87) **WO 2017/039474 2017.03.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ВЕКТОРНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ" (RU)**

(72) Изобретатель:

**Терентьев Андрей Александрович,
Никулин Сергей Михайлович (RU)**

(56) SVCH-tsepei metodom prostranstvenno udalenoj peremenoj nagruzki. Datchiki i Sistemy, N-11, 2014, p. 28-29, 30, 33
US-A1-20130234741

MALYSHEV I. N. Opredelenie parametrov mikroelektronnykh VCH i SVCH komponentov metodom chastotnogo okna. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Nizhnii Novgorod, 2008, p. 8, 10
US-A1-20140306720

NIKULIN S. M. et al. Multidimensional S-parameters: Modeling, Measurement, Identification and Computer-aided Design of Nonlinear microwave Circuits. PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 19-23, 2012
SU-A1-1596278

(57) Изобретение может быть использовано для измерения параметров рассеяния двухпортовых СВЧ-устройств в режиме большого сигнала. Измерения осуществляют преимущественно при помощи векторных анализаторов цепей (ВАЦ) (3). На вход исследуемого объекта (1) подают усиленный сигнал с первого порта ВАЦ (3). Отраженный от исследуемого объекта (1) и прошедший через него сигналы последовательно подают на второй порт ВАЦ (3). При этом измеряют коэффициенты отражения и коэффициенты передачи исследуемого объекта (1) при подключенной к выходу исследуемого объекта (1) пространственно удаленной нагрузке (7) с двумя разными значениями импедансов. По измеренным коэффициентам восстанавливают полную матрицу S-параметров.

B1

034867

**034867
B1**

Область техники

Изобретение относится к способам измерения электрических характеристик, а именно - к способам измерения параметров СВЧ-устройств, и может быть использовано для измерения параметров рассеяния (S-параметров) двухпортовых СВЧ-устройств в режиме большого сигнала.

Предшествующий уровень техники

Широко известны измерительные устройства для измерения S-параметров, наиболее распространенными из которых являются векторные анализаторы цепи (ВАЦ). В конструкции стандартного ВАЦ реализован способ измерения S-параметров, основанный на возбуждении исследуемых объектов СВЧ сигналами (падающими волнами), выделение прошедших через исследуемый объект и отраженных от исследуемого объекта сигналов (прошедших и отраженных волн) с использованием измерительных приёмников и измерение отношений амплитуд выделенных волн для расчёта S-параметров исследуемого объекта [Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis. Application Note/Agilent Technologies, Inc. 2012]. Наиболее современные из ВАЦ обеспечивают измерение полной матрицы S-параметров двухпортовых устройств, обладают высокой чувствительностью и высокой точностью измерения, а также работают в широчайшем диапазоне частот.

Недостатком известного способа измерения S-параметров, реализованного в известных измерительных устройствах, является невозможность его применения в режиме большого сигнала. Максимально достижимый для описанных способов уровень сигнала, подаваемого на исследуемый объект, составляет +20...+23дБм [<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-7603EN.pdf>].

Известен способ измерения параметров рассеяния СВЧ устройств в режиме большого сигнала на основе метода полигармонической дисторсии, описанного, к примеру, в [David E. Root, Jan Verspecht, David Sharrit, John Wood, Alex Cognata. Broad-Band Poly-Harmonic Distortion (PHD) Behavioral Models From Fast Automated Simulations and Large-Signal Vectorial Network Measurements/IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 53, No. 11, November 2005, p. 3656-3664]. Данный способ основан на измерении множества параметров исследуемого объекта, описывающих линейное и нелинейное поведение, построении модели поведения исследуемого объекта и восстановлении из данной модели S-параметров исследуемого объекта. Такой метод позволяет создавать измерительные системы для анализа как линейных, так и нелинейных СВЧ устройств в режиме большого сигнала. Указанный способ лежит в основе многих современных измерительных систем. В частности, указанный способ измерения реализуется при измерении X-параметров [D. E. Root, J. Horn, L. Betts, C. Gillease, J. Verspecht, "X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components," Microwave Engineering Europe, December 2008 pp 16-21.], которые в случае анализа линейных СВЧ-устройств в режиме большого сигнала вырождаются в искомые S-параметры.

Недостатком известного способа, является его сложность, обусловленная чрезвычайной трудоёмкостью и избыточностью метода полигармонической дисторсии для измерения S-параметров в режиме большого сигнала. В частности, для реализации известного метода необходимы ВАЦ с по крайней мере двумя встроенными генераторами и с доступом к приёмникам.

Известна группа способов измерения "горячих" S-параметров, один из которых описан, к примеру, в [Hot S₂₂ and Hot K-factor measurements. Application note/Anritsu, 2002. downloadfile.anritsu.com/Files/en-US/Application-Notes/Application-Note/11410-00295.pdf]. В частности, способ измерения "горячего" S₂₂ параметра заключается в том, что на вход исследуемого объекта подают сигнал большого уровня на частоте f , задающий режим работы исследуемого устройства, а на выход исследуемого объекта подают сигнал малого уровня на отстроенной частоте ($f+\Delta f$), после чего измеряют параметр S₂₂ на отстроенной частоте ($f+\Delta f$).

Недостатками данной группы способов, выбранной в качестве ближайшего аналога, являются некорректность (приблизённость) измерения из-за разницы частоты возбуждения исследуемого объекта и частоты, на которой проводят измерения, а также сложность реализации, связанная с необходимостью использования по крайней мере двух генераторов сигналов для формирования сигналов на частотах f и ($f+\Delta f$).

Раскрытие изобретения

Задачей настоящего изобретения является упрощение способа измерения S-параметров в режиме большого сигнала.

Технический результат заключается в возможности измерения S-параметров измерительными устройствами с одним генератором сигналов за одно подключение исследуемого объекта, а также в возможности использования в качестве измерительных устройств простейших векторных анализаторов цепей без прямого доступа к измерительным приемникам.

Заявленный технический результат достигается за счет того, что в способе измерения S-параметров в режиме большого сигнала, в котором измерения проводят при помощи измерительного устройства с по меньшей мере двумя измерительными портами, включающего по крайней мере один генератор сигнала, причем на вход исследуемого объекта подают усиленный сигнал с первого порта измерительного устройства, в соответствии с изобретением:

отраженный от исследуемого объекта и прошедший через него сигналы последовательно подают на второй порт измерительного устройства,

при этом осуществляют следующую последовательность действий:

измеряют коэффициент отражения Γ_1 и коэффициент передачи K_1 исследуемого объекта при подключенной к выходу исследуемого объекта пространственно удаленной нагрузки с импедансом Z_{load1} ;

измеряют коэффициент отражения Γ_2 и коэффициент передачи K_2 исследуемого объекта при подключенной к выходу исследуемого объекта пространственно удаленной нагрузки с импедансом Z_{load2} ;

восстанавливают полную матрицу S-параметров по измеренным коэффициентам.

В качестве измерительного устройства предпочтительно использовать векторный анализатор цепей (ВАЦ) или измерительную систему на основе многополюсных рефлектометров (описанную, например, в [Кудрявцев, А.М. Интеллектуальный анализатор СВЧ цепей и антенн/А.М Кудрявцев, СМ. Никулин.- Н.Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2005. 121 с. ISBN 5-93272-312-2]), а в качестве пространственно удаленной нагрузки - пространственно удаленную нагрузку (ПУН) с изменяемым импедансом.

Краткое описание чертежей

На прилагаемом чертеже приведена блок-схема примера аппаратной реализации предлагаемого способа.

Осуществление изобретения

Заявленный способ в общем случае реализуют следующим образом. Для измерения S-параметров исследуемого объекта используют двухпортовый векторный анализатор цепи, включающий один генератор сигнала. Вход исследуемого объекта подключают к первому (выходному) порту ВАЦ, а его выход - ко второму (входному) порту ВАЦ, при этом используют дополнительные широко известные в радиотехнике устройства, обеспечивающие выполнение следующих функций:

обеспечение требуемого уровня сигнала на входе исследуемого объекта;

отбор части отражённого от исследуемого объекта сигнала и его подачу на второй порт ВАЦ;

отбор части прошедшего через исследуемый объект сигнала и его подачу на второй порт ВАЦ.

К выходу исследуемого объекта через длинную линию подключают согласованную либо несогласованную ПУН с изменяемым импедансом.

Для получения полной матрицы S-параметров предварительно производят калибровку ВАЦ совместно с дополнительными аппаратными средствами в плоскости подключения измеряемого объекта любым известным способом. После этого проводят предварительные измерения, для чего выполняют следующие действия:

1. В место подключения исследуемого объекта устанавливают перемычку.

2. У ПУН выставляют первое значение импеданса Z_{load1} .

3. Подают сигнал с первого порта ВАЦ на ПУН, отбирают часть отражённого от ПУН сигнала на второй порт ВАЦ и измеряют коэффициент отражения $\Gamma_{1п}$ от ПУН со значением импеданса Z_{load1} .

4. Подают сигнал с первого порта ВАЦ на ПУН, отбирают часть прошедшего через ПУН сигнала на второй порт ВАЦ и измеряют коэффициент передачи $K_{1п}$.

5. У ПУН выставляют второе значение импеданса Z_{load2} , такое что $Z_{load1} \neq Z_{load2}$.

6. Аналогично описанному выше измеряют, соответственно, коэффициенты $\Gamma_{2п}$ и $K_{2п}$ и убирают перемычку.

Приведённые предварительные измерения могут быть выполнены один раз для конкретных ПУН или конкретных значений импеданса ПУН, так как их результат не зависит от характеристик исследуемых объектов. Полученные значения $\Gamma_{1п}$, $K_{1п}$, $\Gamma_{2п}$ и $K_{2п}$ могут быть многократно использованы при вычислениях матрицы болынесигнальных S-параметров исследуемых объектов по описанному ниже способу. В случае замены ПУН или изменения значений импеданса Z_{load1} и Z_{load2} у ПУН с изменяемым импедансом приведённые выше предварительные измерения осуществляют заново и определяют новые показатели $\Gamma_{1п}$ и $K_{1п}$.

Характеристики исследуемого объекта измеряют следующим образом.

У подключенного к выходу исследуемого объекта через длинную линию ПУН выставляют значение импеданса Z_{load1} . При этом длину линии выбирают равной не менее одной, например двух, длин волн сигнала, используемого при измерениях. Усиленный до требуемого исследуемым объектом уровня сигнал с первого порта ВАЦ подают на вход исследуемого объекта. Часть отражённого от исследуемого объекта сигнала отбирают на второй порт ВАЦ с ослаблением, достаточным для нормального функционирования ВАЦ и измеряют коэффициент отражения от исследуемого объекта Γ_1 . Затем при том же сигнале, подаваемом на вход исследуемого объекта, часть прошедшего через исследуемый объект сигнала с выхода исследуемого объекта отбирают на второй порт ВАЦ и измеряют коэффициент передачи исследуемого объекта K_1 . Изменяют значение импеданса ПУН с Z_{load1} на Z_{load2} . По аналогии с измерением коэффициентов Γ_1 и K_1 измеряют, соответственно, коэффициенты Γ_2 и K_2 .

После этого по известным формулам, описанным, к примеру, в [С. Никулин, А. Торгованов. Проектирование усилителей СВЧ-мощности. Эффективность метода удалённой переменной нагрузки/Электроника НТБ, № 3 (00143) 2015], далее - (А), восстанавливают матрицу S-параметров исследуемого объекта по коэффициентам $\Gamma_{1п}$, $K_{1п}$, $\Gamma_{2п}$, $K_{2п}$, Γ_1 , K_1 , Γ_2 , K_2 .

В случае проведения измерений в импульсном режиме сигнал с первого порта измерительного устройства, подаваемый на вход исследуемого объекта, дополнительно модулируют, а дальнейшие измерения производят способом, аналогичным описанному выше.

В приведенном ниже примере представлен один из возможных вариантов осуществления изобретения.

Пример.

В качестве исследуемого объекта (1) для проведения измерений выбрали устройство в коаксиальном тракте.

Для измерения S-параметров исследуемого объекта (1) использовали реализующее заявляемый способ разработанное заявителем аппаратное устройство (2), подключаемое к измерительному устройству. Блок-схема аппаратного устройства (2) приведена на чертеже. Также на чертеже изображены:

- (3) - измерительное устройство - ВАЦ;
- (4) - блок усиления, выполненный на базе маломощного усилителя мощности (МШУ);
- (5), (6) - направленные ответвители; -(7)-ПУН;
- (8) - электронный переключатель;
- (9) - длинная линия (отрезок коаксиального кабеля длиной, равной двум длинам волн сигнала, подаваемого с первого порта ВАЦ);
- (10) - подключаемая перемычка - отрезок коаксиального кабеля длиной 0,1 м;
- (I), (II) - порты присоединения аппаратного устройства к ВАЦ;
- (III), (IV) - порты присоединения аппаратного устройства к исследуемому устройству.

В качестве измерительного устройства использовали ВАЦ Обзор-304/1 с двумя портами, первый из которых использовали как выходной порт ВАЦ (3), второй - как входной. Сигнал с первого порта ВАЦ (3) подавали на вход аппаратного устройства (2), сигнал с выхода аппаратного устройства (2) подавали на второй порт ВАЦ (3).

В качестве ПУН (7) использовали электронно перестраиваемую комплексную нагрузку - тюнер импедансов - производства FocusMicrowaves серии MMT-N [<http://www.focus-microwaves.com/products>].

Подключили аппаратное устройство (2) к ВАЦ (3) и провели калибровку пары ВАЦ - аппаратное устройство. После этого к портам (III) и (IV) аппаратного устройства (2) подключили перемычку (10) и провели предварительные измерения в соответствии с заявленным способом. При этом выбрали два произвольных положения тюнера импедансов, соответствующих значениям импедансов Z_{load1} и Z_{load2} . При проведении измерений части прошедшего и отраженного сигналов, отобранных с ослаблением на второй порт ВАЦ (3) при помощи направленных ответвителей (5) и (6), последовательно коммутировали ко второму порту ВАЦ (3) с помощью электронного переключателя (8). По итогам предварительных измерений измерили $\Gamma_{1п}$, $K_{1п}$, $\Gamma_{2п}$ и $K_{2п}$.

После этого от аппаратного устройства (2) отключили перемычку (10), подключили к нему исследуемый объект (1) и в соответствии с заявленным способом измерили коэффициенты Γ_1 , K_1 , Γ_2 , K_2 .

После этого по указанным в настоящем описании формулам (А) восстановили матрицу S-параметров по измеренным коэффициентам.

Для проведения измерений в импульсном режиме при разработке системы, реализующей предложенный способ, используют измерительное устройство с встроенным импульсным модулятором, либо дополнительно используют импульсный модулятор в тракте подачи сигнала с первого порта измерительного устройства на вход исследуемого объекта. При этом измерительное устройство должно обладать возможностью анализа в импульсном режиме (к примеру, такому условию удовлетворяют ВАЦ производства Keysight Technologies серии PNA [<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/C5989-7603EN.pdf>]).

Промышленная применимость

Практическая реализация заявленного способа, как это было показано в описанном выше примере, является очевидной задачей для среднего специалиста, и не требует построения сложных радиотехнических схем.

При необходимости при разработке системы, реализующей предложенный способ, для лучшего обеспечения заявленной функциональности возможно использование дополнительных блоков, не изменяющих функциональность разрабатываемой системы, к примеру, дополнительных развязывающих устройств - вентилях, циркуляторов и др. Кроме того, для обеспечения согласования с используемым измерительным прибором на высоких уровнях мощности при разработке системы, реализующей предложенный способ, могут быть дополнительно использованы устройства управления уровнем отраженного и прошедшего сигналов, к примеру аттенюаторы.

Таким образом, предложен упрощенный способ измерения S-параметров в режиме большого сигнала, обеспечивающий возможность измерения S-параметров измерительными устройствами с одним генератором сигналов за одно подключение исследуемого объекта, а также возможность использования в качестве измерительных устройств простейших векторных анализаторов цепи без прямого доступа к измерительным приемникам.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ измерения S-параметров в режиме большого сигнала, заключающийся в том, что измерения проводят с использованием измерительного устройства по меньшей мере с двумя измерительными портами, включающего по крайней мере один генератор сигнала, при этом на вход исследуемого объекта подают усиленный сигнал с первого порта измерительного устройства, отличающийся тем, что

отраженный от исследуемого объекта и прошедший через него сигналы последовательно подают на второй порт измерительного устройства,

при этом осуществляют следующую последовательность действий:

измеряют коэффициент отражения Γ_1 и коэффициент передачи K_1 исследуемого объекта при подключенной к выходу исследуемого объекта пространственно удаленной нагрузке с импедансом Z_{load1} ;

измеряют коэффициент отражения Γ_2 и коэффициент передачи K_2 исследуемого объекта при подключенной к выходу исследуемого объекта пространственно удаленной нагрузке с импедансом Z_{load2} ;

восстанавливают полную матрицу S-параметров по измеренным коэффициентам.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве измерительного устройства используют векторный анализатор цепей.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве измерительного устройства используют измерительную систему на основе многополюсных рефлектометров.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве пространственно удаленной нагрузки используют пространственно удаленную нагрузку с изменяемым импедансом.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что сигнал, подаваемый на вход исследуемого объекта с первого порта измерительного устройства, дополнительно модулируют.

