

4. Y. Carmel e.a. Relativistic plasma microwave electronics: Studies of high-power plasma-filled backward wave oscillators // Ph. Vs. Fluids B. 1992. V. 4. P. 2286—2292.

5. Ткач Ю. В. и др. Электромагнитные волны в плазме, находящейся в магнитном поле // Укр. Физ. Журн. 1978. Т. 23. С. 1902.

6. Файнберг Я. Б. и др. Некоторые физико-технические аспекты построения плазменных ЛБВ // Докл. АН УССР, Физ.-мат. и тех. науки. 1990. № 11. С. 55.

7. Завьялов М. А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках // IV Симпозиум по сильноточной электронике: Тез. докл. 1992. С. 132.

8. M. A. Zavjalov e. a. Powerfull wideband amplifier base on hybrid plasma — caving slow-wave structure / IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22. № 5. P. 600.

Дата принятия 09.04.2014 г.

621.37.037

Новый метод измерений комплексных параметров сверхвысокочастотных смесителей

К. С. КОРОТКОВ, Д. Р. ФРОЛОВ

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, e-mail: korsar@phys.kubsu.ru

Разработан метод измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения частотно-преобразующих устройств, основанный на применении векторного анализатора цепей. Проведен подробный теоретический анализ метода.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный смеситель, модуль, фаза, комплексные коэффициенты передачи и отражения.

A method of measurement of amplitude and phase frequency response of RF mixers has been developed. Method is based on vector network analyzer application. A complete theoretical analysis of the new method has been carried out.

Key words: RF mixer, magnitude, phase, S-parameters.

В последнее время широкое распространение получили способы и реализующие их приборы для измерений комплексных (модуля и фазы) коэффициентов передачи сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств с гетеродинным преобразованием частоты. Особенность таких измерений состоит в том, что входной сигнал СВЧ-смесителя и выходной сигнал промежуточной частоты лежат в разных диапазонах; это не позволяет измерять традиционными способами сдвиг фаз, возникающий в таком смесителе. В то же время из-за нелинейности вольтамперной характеристики смесительного элемента (полупроводникового диода) в нем возникают нелинейные сдвиги фаз, существенно искажающие преобразованный сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Широкое применение для измерений и вычислений фазовых сдвигов СВЧ-смесителей получили способы, основанные на измерении суммы и разности сдвигов фаз двух смесителей и суммы сдвигов фаз трех смесителей, один из которых испытываемый, с последующим вычислением истинного сдвига фаз этого смесителя [1, 2]. Однако в обоих способах для реализации рабочих режимов измерений требуется делать до восьми переключений в диапазоне сверхвысоких частот. При этом каждое такое переключение вносит погрешность в измерения от 6 до 12°, что приводит к существенным ошибкам.

Описание метода и его анализ. Поиски путей повышения точности измерений комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей привели к разработке нового способа, основанного на использовании анализатора СВЧ-цепей [3]. Структурная схема устройства, реализующего этот способ, приведена на рис. 1. Она состоит из анализатора

СВЧ-цепей *I* и двухканального супергетеродинного приемника *II*. В состав анализатора *I* входят: генератор испытательных СВЧ-сигналов ГИС с частотой f_1 ; первый переключатель ПП1 и связанная с ним согласованная нагрузка СН; гетеродин Г1 с частотой сигналов f_2 ; две пары НО2, НО3 и НО1, НО4 встречновключенных направленных ответвителей (НО), образующих два рефлектометра, связанных своими вторичными каналами 3 с входами 1, 2, 3, 4 векторного вольтметра ВВ; два выходных порта П1, П2. Вольтметр работает на низкой промежуточной частоте, образуемой в нем путем преобразования частоты с помощью гетеродина Г1, который присоединен к его пятому входу.

Принцип работы анализатора СВЧ-цепей известен и заключается в попарном сравнении в векторном вольтметре амплитуд и фаз сигналов, поступающих с выходов 3 вторичных каналов НО [4]. Такое построение анализатора позволяет измерять коэффициенты передачи и отражения любого испытываемого СВЧ-четырёхполюсника ИЧП, включаемого между его входными портами П1, П2 в двух направлениях с помощью коммутации переключателем ПП1 направления подачи испытательного сигнала от генератора ГИС. Указанное устройство анализатора цепей дает возможность измерять полный комплект S-параметров ИЧП.

Двухканальный супергетеродинный приемник *II* обеспечивает измерение суммы и разности сдвигов фаз испытываемого ИС и опорного ОС СВЧ-смесителей. Очередность измерений может быть любой. При измерении суммы сдвигов фаз испытательный СВЧ-сигнал с частотой f_1 от генератора ГИС через переключатель ПП1 в первом положении его

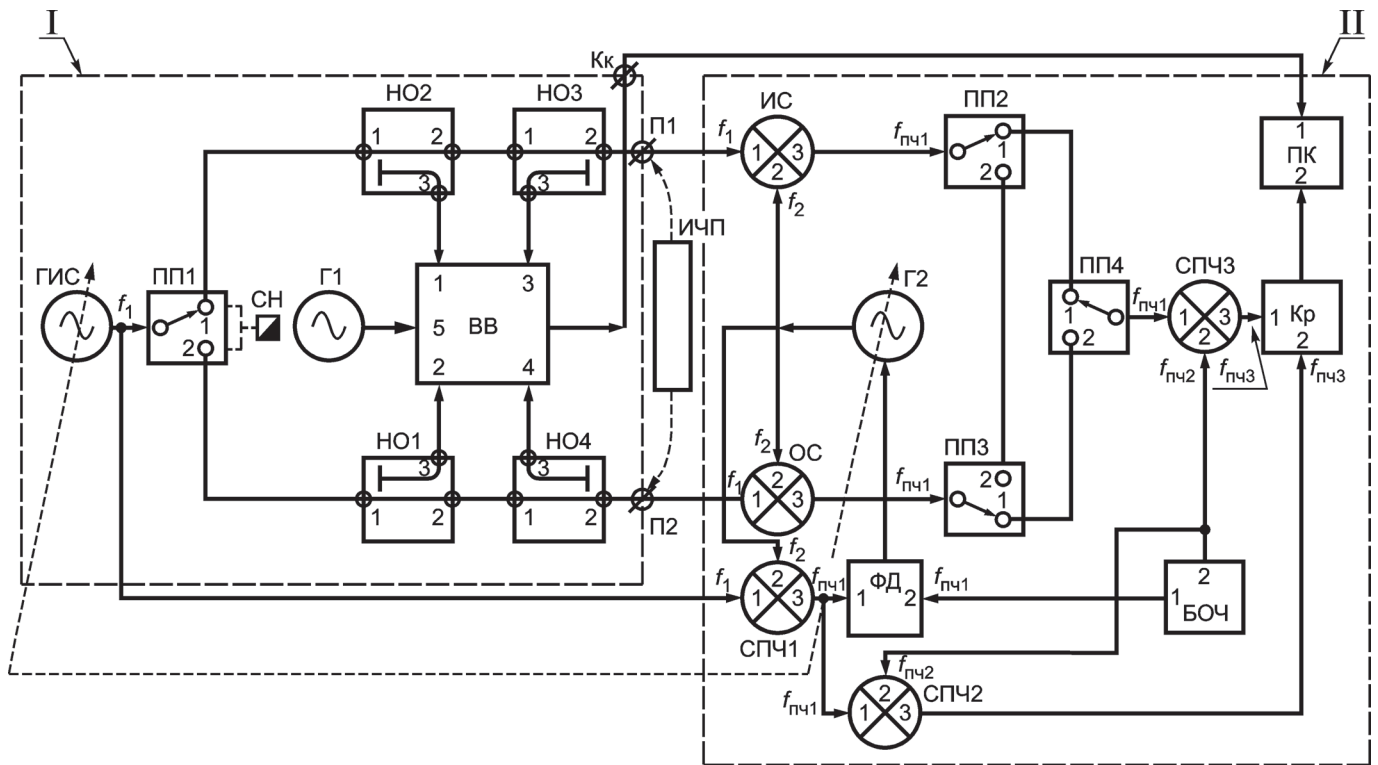


Рис. 1. Схема нового метода для измерения параметров смесителей:

I — векторный анализатор СВЧ-цепей; *II* — двухканальный супергетеродинный приемник; ГИС — генератор испытательных сигналов; ПП1—ПП4 — переключатели; СН — согласованная нагрузка; Г1 — гетеродин анализатора цепей; Г2 — СВЧ-гетеродин; НО1—НО4 — направленные ответвители; ВВ — векторный вольтметр; Кк — контакт; П1, П2 — измерительные порты; ИЧП — испытуемый четырехполюсник; ИС, ОС — испытуемый и опорный смесители; СПЧ1-СПЧ3 — смесители промежуточной частоты; БОЧ — блок опорных частот; ПК — компьютер; Кр — компаратор

подвижного контакта, первичные каналы НО2, НО3 и входной порт П1 подают на вход 1 испытуемого смесителя ИС. Одновременно на вход 2 этого смесителя поступают сигналы с частотой f_2 от СВЧ-гетеродина Г2. Образовавшийся в ИС сигнал первой промежуточной частоты $f_{пч1} = (f_1 - f_2)$ с выхода 3 через переключатели ПП2, ПП3 (во втором положении) подают на выходной разъем 3 опорного СВЧ-смесителя ОС. Здесь его преобразуют с помощью сигнала с частотой f_2 от СВЧ-гетеродина Г2 в сигнал с $f_1 = f_{пч1} + f_2 = (f_1 - f_2) + f_2$, который поступает через входной порт П2 в первичные каналы 1—2 НО1, НО4. Далее сигнал идет на входы 2, 4 векторного вольтметра, на входы 1 и 3 которого через вторичные каналы 3 НО2, НО3 поступает часть испытательного СВЧ-сигнала с частотой f_1 . Векторный вольтметр измеряет отношения амплитуд и разности фаз сигналов на входах 1, 4. Так как смесители ИС, ОС включены последовательно, их фазовые сдвиги $\varphi_{ОС}$ и $\varphi_{ИС}$ складываются, образуя сумму $\Sigma\varphi = \varphi_{ИС} + \varphi_{ОС}$, которую фиксируют между портами П1, П2 анализатора *I*. Аналогично перемножают коэффициенты передачи $K_{ИС}$ испытуемого и $K_{ОС}$ опорного СВЧ-смесителей, получая общий коэффициент передачи $\Sigma K = K_{ИС}K_{ОС}$. Результаты измерений ΣK и $\Sigma\varphi$ с выхода векторного вольтметра через контакт Кк подают в первый вход компьютера ПК, где их фиксируют.

Значение первой переменной промежуточной частоты $f_{пч1}$ можно выбрать любым в пределах рабочего диапазона частот, устанавливаемого условиями эксплуатации, и в процессе измерений $f_{пч1}$ поддерживается постоянной с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). На

первый вход фазового детектора ФД этой системы сигнал поступает из третьего выхода смесителя СПЧ1, где он образовался как разность сигналов от СВЧ-гетеродина Г2 с частотой f_2 , пришедшего на его второй вход, и сигнала с частотой f_1 , поданного на первый вход от генератора ГИС. Опорный сигнал фазового детектора с частотой $f_{пч1}$ поступает из выхода 1 блока опорных частот БОЧ, в котором одновременно вырабатывается сигнал второй ПЧ $f_{пч2}$, сдвинутой относительно сигнала $f_{пч1}$ на величину третьей ПЧ, когерентной с сигналами первой и второй и равной $f_{пч3} = f_{пч1} - f_{пч2}$, которую стабилизирует кварцевый резонатор. Сигнал ошибки с выхода фазового детектора подают на вход генератора Г2, в результате его частота f_2 изменяется вслед за изменениями f_1 так, что разность между f_1 и f_2 с точностью до фазы равняется выбранной $f_{пч1}$.

Разность сдвигов фаз и отношение коэффициентов передачи испытуемого и опорного смесителей определяют в первом положении подвижных контактов переключателей ПП2, ПП3. Измерения проводят сравнением амплитуды и фазы испытательного сигнала с выхода 3 смесителя СПЧ3. Этот сигнал образуется благодаря двойному преобразованию частоты испытательного СВЧ-сигнала сначала от испытуемого, а затем опорного смесителя. Он сравнивается с опорным сигналом $f_{пч3}$ в компараторе Кр, с последующим вычислением отношений коэффициентов передачи и разности фазовых сдвигов ИС и ОС в компьютере ПК.

Опорный сигнал $f_{пч3}$ получают из испытательного СВЧ-сигнала, путем преобразования его частоты сначала в $f_{пч1}$ в сме-

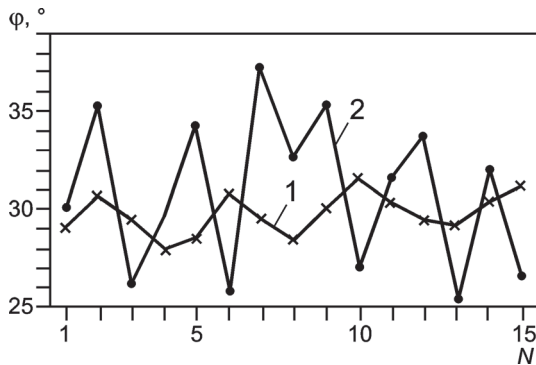


Рис. 2. Результаты пятнадцати одинаковых N измерений истинного сдвига фаз φ для смесительного диода типа 3А123 новым методом 1 и методом трех смесителей 2

сителе $СПЧ1$, а затем в $f_{пч3}$; в смесителе $СПЧ2$ с помощью сигнала с частотой $(f_{пч1} + f_{пч3})$, поступающего со второго выхода блока опорных частот. Сигнал, образованный по формуле $f_{пч3} = f_{пч1} - (f_{пч1} + f_{пч3})$, подают на второй вход компаратора.

Испытательный сигнал $f_{пч1}$ с третьего выхода смесителя $ИС$, через переключатели $ПП2$, $ПП4$ в первом положении, поступает в первый вход смесителя $СПЧ3$, где с помощью сигнала со второго выхода блока опорных частот его преобразуют в сигнал третьей ПЧ по формуле $f_{пч3} = f_{пч1} - (f_{пч1} + f_{пч3})$. Этот сигнал подают в компаратор и сравнивают по амплитуде и фазе с опорным сигналом $f_{пч3}$, поступающим из смесителя $СПЧ2$. Результаты сравнения поступают в компьютер.

Аналогично сравнивают сигнал с третьего выхода опорного смесителя с частотой $f_{пч1}$, преобразованного в смесителе $СПЧ2$ при втором положении переключателя $ПП4$ в сигнал с частотой $f_{пч3}$, подаваемый в первый вход компаратора. Результаты сравнений сигналов с частотой $f_{пч3}$ из $ОС$ и $ИС$ поочередно подают в компьютер, где их обрабатывают следующим образом.

На входе портов $П1$ и $П2$ после калибровки напряжения $U_{П1} = U_{П2}$ (перед измерением компаратор калибруют по амплитуде и фазе, уравнивая уровни напряжений на его входах и электрические длины измерительного и опорного каналов). От порта $П1$ компаратору приходит сигнал $U_{П1}(K_{ИС}K_{СПЧ3})$ и сдвиг фаз $\varphi_{ИС} + \varphi_{СПЧ3}$, где $K_{СПЧ3}$, $\varphi_{СПЧ3}$ — коэффициент передачи и сдвиг фаз смесителя $СПЧ3$. Аналогично от порта $П2$ к компаратору приходит сигнал $U_{П2}(K_{ОС}K_{СПЧ3})$ и сдвиг фаз $\varphi_{ОС} + \varphi_{СПЧ3}$. После сравнения в компараторе получают отношение напряжений $U_{П1}K_{ИС}K_{СПЧ3} / U_{П2}K_{ОС}K_{СПЧ3}$ и сдвиги фаз $(\varphi_{ИС} + \varphi_{СПЧ3}) - (\varphi_{ОС} + \varphi_{СПЧ3}) = \varphi_{ИС} - \varphi_{ОС}$, где $\varphi_{СПЧ3}$ — сдвиг фаз смесителя $СПЧ2$.

В компьютере, учитывая $U_{П1} = U_{П2}$, вычисляют $(U_{П1}K_{ИС}K_{СПЧ3} / U_{П2}K_{ОС}K_{СПЧ3}) / (U_{П1}K_{ИС}K_{СПЧ3} / U_{П2}K_{ОС}K_{СПЧ3})$, получают отношение коэффициентов передачи $K_{ИС} / K_{ОС} = \Delta K$ и разность фаз

$$\Delta\varphi = [(\varphi_{ИС} + \varphi_{СПЧ3}) - \varphi_{пч3}^{\text{доп}}] - [(\varphi_{ОС} + \varphi_{СПЧ3}) - \varphi_{пч3}^{\text{доп}}] = \varphi_{ИС} - \varphi_{ОС}.$$

С помощью компьютера решают уравнения для коэффициентов передачи в двух видах измерений:

$$\begin{cases} K_{ИС}K_{ОС} = \Sigma K; \\ K_{ИС} / K_{ОС} = \Delta K \end{cases}$$

и для сдвигов фаз:

$$\begin{cases} \varphi_{ИС} + \varphi_{ОС} = \Sigma\varphi; \\ \varphi_{ИС} - \varphi_{ОС} = \Delta\varphi. \end{cases}$$

Находим, что $K_{ИС} = \sqrt{\Delta K \Sigma K}$, $K_{ОС} = \sqrt{\Sigma K / \Delta K}$, $\varphi_{ИС} = (\Sigma\varphi + \Delta\varphi)/2$, $\varphi_{ОС} = (\Sigma\varphi - \Delta\varphi)/2$. Таким образом определяют собственные коэффициенты передачи и истинные сдвиги фаз испытуемого и опорного СВЧ-смесителей.

Однако переключения на СВЧ являются наиболее существенными, но не единственными источниками погрешностей. При измерениях, особенно сдвига фаз испытуемого смесителя, погрешности вносятся паразитными каналами приема — путями, по которым зондирующий СВЧ-сигнал может пройти через испытуемый и опорный СВЧ-смесители в обход преобразования частоты. Очевидно, что данные погрешности увеличиваются, когда оба смесителя ($ОС$ и $ИС$) имеют низкую развязку между входом и выходом. Как показали экспериментальные исследования, паразитные каналы приема оказывают большое влияние на результаты испытаний при параллельном (раздельном) измерении указанных смесителей. В этом случае один из них с помощью переключателя $ПП2$ или $ПП3$ отсоединен от остальной схемы. За счет паразитных каналов от смесителя $СПЧ1$ системы ФАПЧ на первом входе испытуемого смесителя появляются дополнительные сигналы первой промежуточной частоты $f_{пч1}$, образованной в нем при смешивании сигнала с частотой f_1 от генератора $ГИС$ и гетеродина $Г2$ с частотой f_2 . Это приводит к погрешности измерений коэффициентов передачи $\Delta K_{ИС}$ и сдвигов фаз $\Delta\varphi_{ИС}$ у испытуемого смесителя. Наиболее мощные паразитные сигналы принадлежат первой переменной ПЧ $f_{пч1}$ и образуются в смесителе $СПЧ1$. Через развязки разветвителя между гетеродином $Г2$ и смесителями $ИС$, $ОС$, $СПЧ1$ паразитные сигналы проникают в испытуемый либо опорный смеситель. Однако если сигналы $f_{пч1}$ лежат ниже частоты испытательных СВЧ-сигналов, то весьма эффективной развязкой является выполнение делителя в волноводном варианте, который для сигналов отсечки, лежащих ниже его частоты, представляет фильтр верхних частот [5]. Также хорошие результаты можно получить, применив развязки типа усилитель-аттенюатор. На основании этого погрешности, вызванные паразитными каналами приема, могут быть сведены к минимуму.

Преимущества нового метода. Для измерений параметров устройств с преобразованием частоты (в основном комплексных коэффициентов передачи) широкое распространение получил метод трех смесителей [2]. Важнейшей характеристикой комплексного коэффициента передачи яв-

ляется его мнимая часть — сдвиг фаз (аргумент), погрешность измерения которого на СВЧ современными анализаторами цепей при ослаблении до 20 дБ обычно составляет 2° [6, 7]. В то же время при измерении сдвига фаз СВЧ-смесителя методом трех смесителей, при помощи векторного анализатора цепей, погрешность значительно превышает величину 2° и лежит в диапазоне $(7\text{—}12)^\circ$. Это связано с тем, что метод трех смесителей основан на последовательных измерениях параметров трех пар смесителей, в ходе которых необходимо как минимум четыре раза проводить соединения и разъединения СВЧ-трактов (разъемов). Однако на СВЧ невозможно обеспечить идентичное сочленение двух разъемов, даже используя динамометрические ключи, и поэтому девиация сдвига фаз между вилкой и розеткой разъемов составляет единицы градусов и увеличивается с ростом частоты. Для уменьшения этих погрешностей в [5] предложено применять электромеханические переключатели вместо СВЧ-разъемов. В соответствии с [8], у выпускаемых в России переключателей коэффициент стоячей волны составляет 1,3—1,5 в диапазоне до 18 ГГц; такие значения эквивалентны погрешности по фазе $7\text{—}12^\circ$. Следовательно, при каждом переключении в методе трех смесителей вносится погрешность от 7° .

В предложенном авторами статьи методе *отсутствуют* переключения на СВЧ: все они перенесены в диапазон промежуточных частот (десятки мегагерц), где за счет того, что длина волны значительно больше длины тракта, сдвиг фаз, вносимый переключателем, достаточно мал. Поэтому погрешность нового метода полностью определяется погрешностью используемого анализатора цепей, которая для рассмотренного анализатора цепей типа P4M-18 составила 2° . На рис. 2 изображены результаты $N = 15$ одинаковых измерений двумя методами истинного сдвига фаз смесительно-го диода типа 3A123. Частоты входного СВЧ-сигнала и гетеродина равны 9 и 9,05 ГГц соответственно, промежуточная частота 50 МГц, мощность входного сигнала – 10 дБ/мВт, мощность сигнала гетеродина 6 дБ/мВт. На рис. 2 видно, что разброс значений при измерении сдвига фаз новым методом 1 существенно меньше, чем при методе трех смесителей 2, и составляет около 2° , что равно погрешности анализатора цепей. Это означает, что среднее квадратическое отклонение результатов измерений новым методом примерно в 3,5 раза меньше по сравнению с методом трех смесителей.

Выводы. Рассмотренный метод измерений комплексных коэффициентов передачи СВЧ-смесителей и схема для его осуществления имеют существенно меньшие погрешности и более высокую точность за счет исключения СВЧ переключений и пересоединений в процессе измерений. На динамический диапазон и погрешности измерений модуля и фазы комплексных коэффициентов передачи испытуемых СВЧ-смесителей с помощью рассмотренного радиоизмерительного прибора основное влияние оказывают дополнительные сигналы его первой промежуточной частоты, приходящие в смеситель по паразитным каналам приема. Однако их устраняют, применяя дополнительные развязывающие устройства. Метод позволяет снизить среднее квадратическое отклонение результатов измерений в 3,5 раза по сравнению с существующими аналогами.

Л и т е р а т у р а

1. **Vyzulin S. A., Korotkov K. S.** To the new phase shifts in mixer measurement method // NATO Advanced Research Workshop Microwave Physics and Technique, Bulgaria, 1996.
2. **Пат. 2029966 РФ.** Способ определения коэффициентов передачи преобразователей частоты / Елизаров А. С. Изобретения. Полезные модели. 1995. № 45.
3. **Korotkov K. S., Frolov D. R., Levchenko A. S.** The Method for accurate measurements of absolute phase and group delay of frequency converters // IEEE Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd Intern. Conf., Sevastopol, 2013. P. 938—939.
4. **Коротков К. С., Мильченко Д. Н.** Особенности измерителей, использующих рефлектометры для определения S-параметров четырехполюсников СВЧ // Телекоммуникации. 2011. № 9. С. 10—31.
5. **Пат. 5937006 США.** Frequency Translating Device Transmission Response Method / C. J. Clark e. a. 1999. № 08/865.276 [электрон. ресурс] <http://google.ru/patents> (дата обращения 13.11.2013 г.).
6. **Контрольно-измерительные приборы СВЧ** фирмы «Микран». Каталог 2008 г. С. 16.
7. **Anritsu Company** [Официальный сайт]. Vector Star Broadband VNA ME7838A (дата обращения 17.11.2013 г.).
8. **Павловский О. П. и др.** Перспективы совершенствования радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона. М.: Радиотехника. 2012.

Дата принятия 01.04.2014 г.