

УДК 621.396.96

В. А. Карлов, Д. В. Авсейцев

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Розроблено автоматизований аналізатор кіл із застосуванням електродинамічної моделі Е-площинного хрестоподібного дільника потужності. При побудові математичної моделі вимірювача передбачалось, що у вимірювальному перетворювачі знаходиться тільки одна неоднорідність з розрахунковими параметрами: область з'єднання бокових плеч Е-площинного хрестоподібного дільника потужності. Проста та технологічна конструкція дільника дозволяє створити для неї адекватну електродинамічну модель. Математична модель обробки показань індикаторів потужності, яка знаходиться у пам'яті ЕОМ, дозволяє обчислити комплексний коефіцієнт відбиття з розв'язку системи двох квадратних рівнянь відносно додаткового параметра з наступним його відображенням на площину комплексного коефіцієнта відбиття.

Конструкція п'ятиплечевого вимірювального перетворювача складається із трьох спрямованих детекторів від скалярного рефлектометра, які підключені до вихідних плеч Е-площинного дільника потужності. При відомих розрахункових параметрах вимірювального перетворювача калібрування зводиться до градування індикаторів потужності на одне узгоджене навантаження. Для корекції відлікової площини вимірювача застосовано металевий короткозамикач.

За результатами тестування навантажень з модулем коефіцієнта відбиття 0.15 – 0.5 похибка знаходження комплексного коефіцієнта відбиття на частотах 7 – 10 ГГц не перевищує 10 %.

Ключові слова: п'ятиплічник, надвисокі частоти, коефіцієнт відбиття, похибка вимірювань.

Разработан автоматизированный анализатор цепей на основе электродинамической модели Е-плоскостного крестообразного делителя мощности. При построении математической модели измерителя предполагалось, что в измерительном преобразователе прибора имеется одна неоднородность с расчетными параметрами: область сочленения боковых плеч Е-плоскостного крестообразного делителя мощности. Простая и технологичная конструкция делителя позволяет построить для нее адекватную электродинамическую модель. Математическая модель обработки показаний индикаторов мощности, которая находится в памяти ЭВМ, позволяет определить комплексный коэффициент отражения из решения системы двух квадратных уравнений относительно вспомогательного параметра с последующим его отображением на плоскость коэффициента отражения.

Конструкция пятиплечевого измерительного преобразователя состоит из трех направленных детекторов от скалярного рефлектометра, включенных в измерительные каналы Е-плоскостного волноводного крестообразного делителя мощности. При известных расчетных параметрах измерительного преобразователя калибровка прибора сводится к градуировке индикаторов мощности на одну согласованную нагрузку. Для корректировки отсчетной плоскости прибора использовалась короткозамкнутая пластина.

При тестировании нагрузок с модулем коэффициента отражения 0.15 – 0.5 в частотном диапазоне 7 – 10 ГГц погрешность нахождения комплексного коэффициента отражения менее 10 %

Ключевые слова: пятиплечник, сверхвысокие частоты, коэффициент отражения, погрешность измерения.

The five-port automatic network analyzers based on the electromagnetic model of the E-plane cross-shaped power divider are designed. Mathematical model of meter assumes that single measuring transducer has an inhomogeneity of calculated parameters, the junction of the lateral ports of E-plane cross-shaped power divider. Simple and manufacturable construction of divider allows constructing its adequate electromagnetic model. The mathematical model of processing of indications of power indicators, which memorized in a computer, allows us to define complex reflection coefficient from the solution of system of two quadratics equations concerning basic parameter with its subsequent display to plane reflection coefficient.

A five-port measuring circuit includes only three directed detectors from scalar type reflectometers and E-plane cross-shaped waveguide divider. At known calculated parameters of the measuring converter device calibration is reduced to graduation of indicators of power on one matched loading. For updating of a reference plane of the device the short-circuited plate was used.

When testing loads with the module of the reflection coefficient 0.15 – 0.5 in frequency range 7 – 10 GHz, the obtained error of the complex reflection coefficient was less than 10 %.

Key words: five-port, microwave frequencies, reflection coefficient, measurement error.

Введение

Одним из перспективных подходов при многочастотном автоматизированном измерении параметров элементов и конструкций на сверхвысоких частотах является подход с использованием двенадцати полюсных рефлектометров [1]. В отличие от метода калибруемого двенадцати полюсника [2], в статье представлены результаты экспериментальных исследований простого измерителя комплексного коэффициента отражения (КО), собранного на основе образцового Е-плоскостного крестообразного делителя мощности с расчетными параметрами [3].

Аппаратный и программный интерфейсы измерителя

На рис.1 показана структурная схема измерителя. Как видно из него, конструкция измерителя комплексного КО собрана на основе Е-плоскостного волноводного делителя мощности и промышленных приборов. Е-крест с плечами 1,2,3,4 включен в измерительные каналы трех направленных детекторов от скалярного рефлектометра типа Р2-60, которые измеряют два коэффициента ослабления по мощности. После детектирования сигналов P_1, P_2, P_3 , их усиление и аналого-цифрового преобразование происходит в специализированных измерителях отношений В8-7. Измерители В8-7 дополнены платами сопряжения с LPT-портами РС IBM. Каждая плата сопряжения содержит два регистра типа ИР35 и два мультиплексора типа КП11. Тетрады для четырех семисигментных индикаторов по сигналу «готов» прибора В8-7 защелкиваются в регистрах ИР35 и через мультиплексоры передаются в порт состояния LPT.

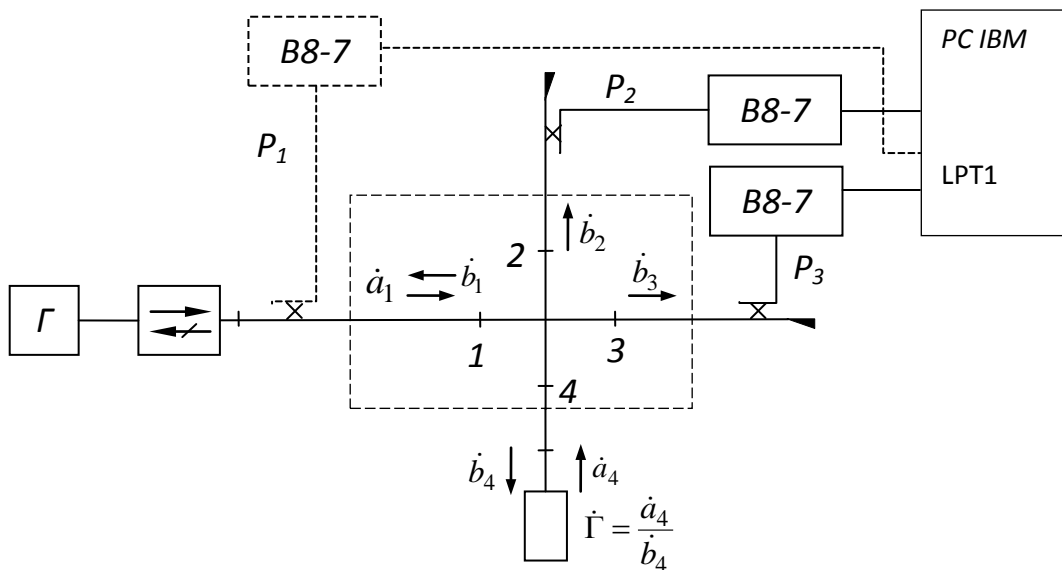


Рис. 1. Структурная схема измерителя комплексного коэффициента отражения:
 1 – 4 – плечи Е-креста; Γ – генератор типа Г4

Эквивалентную схему крестообразного E-плоскостного сочленение прямоугольных волноводов, как и для E-тройника, можно представить в виде последовательного подключения трех выходных плеч к входному плечу 1. При определенном выборе плоскостей отсчета в области неоднородности, плечи 2 и 3 креста можно рассматривать как магнитные зонды, которые расположены в измерительном канале между входным плечом 1 и выходным 4 [4]. Основной вклад на построение такой модель оказывает мода $\dot{H}_{13}^{(x)}$ продольных волн LE_{yz} .

Алгоритм обработки измеренных сигналов P_i/P_1 строился на решении двух квадратных уравнений относительно переменной $A_4 = a_4/a_1$ с последующим отображением найденного результата на плоскость КО $\dot{\Gamma}$ [5]:

$$\left| \dot{A}_4 + \frac{\dot{S}_{i1}^0}{\dot{S}_{i4}^0} \right|^2 = \left| \frac{\dot{S}_{i1}^0}{\dot{S}_{i4}^0} \right|^2 \frac{P_1^0 \cdot P_i}{P_i^0 \cdot P_1}; \quad \dot{\Gamma} = \frac{\dot{A}_4}{\dot{S}_{41}^0 + \dot{S}_{44}^0 \cdot \dot{A}_4}; \quad i=2,3, \quad (1)$$

где \dot{S}_{ij}^0 – расчетные значения КМР относительно плоскости подключения исследуемой нагрузки; P_i^0, P_1^0 – показания ИМ при подключении к измерителю эталонной нагрузки с известным КО $\dot{\Gamma}_0$ (в частности $\dot{\Gamma}_0 = 0$); P_i, P_1 – показания ИМ при подключении к измерителю нагрузки с неизвестным КО $\dot{\Gamma}$.

При $\dot{\Gamma} > \dot{\Gamma}_{\max}$ рассматриваемый пятиплечий вариант измерительного преобразователя прибора имеет область неоднозначности. В таблице 1 приведены максимальные значения однозначного нахождения КО, в зависимости от нормированной длины волны генератора λ_0/a (a – размер широкой стенки волновода).

Таблица 1

Максимальные значения однозначного нахождения КО					
λ_0/a	1.736	1.543	1.302	1.225	1.126
$ \Gamma_{\max} $	0,92	0.88	0.72	0.64	0.47

Полученные результаты и выводы

Для обработки результатов экспериментальных исследований разработан графический интерфейс пользователя с использованием программной среды MS

Visual C++6. В программе использовались ассемблерные функции для считывания показаний вольтметров.

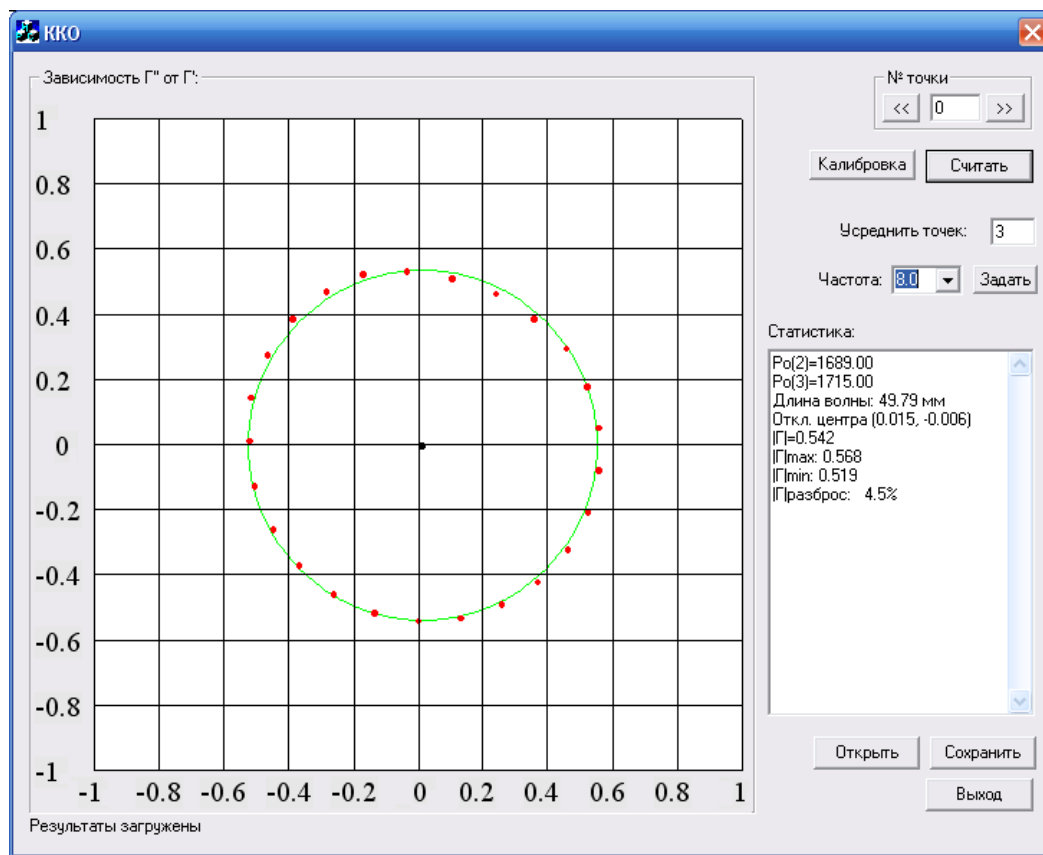


Рис. 2. Осциллограмма скользящей нагрузки с $|\dot{\Gamma}|=0.542$

Методика проведения измерений следующая:

1. На графическом интерфейсе (рис.2) задавались частота генератора – 8.0 ГГц и число точек для усреднения – 3;
2. К измерителю подключалась согласованная нагрузка для градуировки показаний вольтметров и по нажатию кнопки «Калибровка» в памяти программы сохранялись значения P_i^0, P_1^0 ;
3. К измерителю подключалась неизвестная нагрузка и по нажатию кнопки «Считать» в памяти программы сохранялись значения P_i, P_0 ;
4. Результаты измерений вычислялись согласно выражений (1) и отображались либо в поле «Статистика», либо записывались в файл

На рис.2 приведена осциллограмма тестирования скользящей нагрузки с КО $|\dot{\Gamma}|=0.5425$. В результате измерения 25 равноотстоящих положений получено: $|\dot{\Gamma}|=0.5425 \pm 4.5 \%$, сдвиг КО по фазе $\Delta\theta = 14.43^\circ \pm 2.23^\circ$. По результатам аналогич-

ных измерений двух скользящих нагрузок с $|\dot{\Gamma}| \approx 0.5$ и с $|\dot{\Gamma}| \approx 0.2$ в диапазоне частот 7 – 10 ГГц погрешность по модулю КО не превышала 5 %, а погрешность по сдвигу фазы менее 5° .

Исследовались нестандартные волноводные нагрузки №1, №2 и №3. Проведено пять независимых циклов измерений каждой из нагрузок на частотах F. В таблице 2 приведены результаты измеренных средних значений КСВН и фазы (K^x , θ^x) на исследуемом измерителе и на установке высшей точности (УВТ) [6] (K^0 , θ^0).

Таблица 2

Результаты измерений на исследуемой установке и на УВТ

F, ГГц	№	K^x	K^0	$\delta K, \%$	θ^x	θ^0	$\Delta\theta$, град.
7	1	1.245	1.245	0	-106.9	-102.1	4.8
	2	1.743	1.760	1.0	62.7	61.6	1.1
	3	3.354	3.440	2.5	-164.6	-163.2	1.4
8	1	1.237	1.207	2.43	-61.5	-55	6.5
	2	1.445	1.399	3.20	-96.7	-95.5	1.2
	3	3.032	3.134	3.4	91.4	91.5	-0.1
9	1	1.144	1.145	0.1	50.1	50.2	0.1
	2	1.169	1.165	0.4	101.8	101	0.8
	3	2.945	3.015	2.4	-5.1	-3.9	1.2
10	1	1.210	1.209	0.01	-165.3	-164.4	0.9
	2	1.100	1.102	0.73	-112.2	-106.1	6.1
	3	2.677	2.920	9.1	-95.6	-94.8	0.8

Как видно из таблицы 2, при включении крестообразного делителя в измерительные каналы двух скалярных рефлектометров от прибора P2-60 при измерении нагрузок с $1.15 < \text{КСВН} < 3.5$ погрешность равна $\delta \text{КСВН} = 10\%$ ($\delta |\dot{\Gamma}| = 7\%$), $\Delta\theta \leq 10^{\circ}$.

Полученные результаты показали возможность построения широкополосных измерителей комплексного коэффициента отражения на сверхвысоких частотах с использованием многоплечей неоднородности Е-креста в измерительном преобразователе прибора. При измерении комплексного КО с $0.1 \leq |\dot{\Gamma}| \leq 0.5$ пятиплечим измерительным преобразователем погрешность измерения модуля КО менее 10 %, а фазы менее 10° .

Библиографические ссылки

1. **Engen G. F.** The six-port reflectometer: an alternative network analyzer // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1977. V. MTT-25, № 12. P.1075 – 1080.
2. **Латников С. Ю.** Измерение комплексных отношений СВЧ-сигналов методом калибруемого многополюсника / С. Ю. Латников // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. Вып.1(361). – С.55 – 58.

3. **Карлов В. А.** Пристрій для вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття // Деклараційний патент UA на корисну модель № u 2011 00276 від 10.01.2011.
4. **Авсейцев Д. В.** Свойства крестообразного делителя-преобразователя векторного СВЧ рефлектометра / Авсейцев Д.В., Карлов В.А. // 7-ая Молодежная МНТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». Севастополь. – 2011. – С.
5. **Барташевский Е. Л.** Векторный СВЧ-рефлектометр на основе четырехплечего делителя мощности / Е. Л. Барташевский, В. А. Карлов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып.1(415). – С. 38 – 44.
6. **Борисова Л. В.** Установка высшей точности для измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи в волноводных трактах прямоугольного сечения в диапазоне частот 2,59 – 37,5 ГГц / Л.В. Борисова, В. Д. Войлов, О. Ф. Киселев и др. // VII ВНТК «Метрология в радиоэлектронике». М., 1988. – С. 22 – 33.

Надійшла до редколегії 20.06.2011