

А. Б. ЕГОРОВ, канд. техн. наук, И. А. МОЩЕНКО

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ДВУХПОЛЮСНИКОВ НА СВЧ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА РАЗДВИГАНИЯ ОТРАЖЕНИЙ

Все более актуальным в настоящее время становится вопрос повышения точности измерения малых коэффициентов отражений двухполосников на СВЧ, так как он тесно связан с точностью воспроизведения, хранения и передачи единицы мощности СВЧ. Для измерения параметров цепей СВЧ применяются следующие методы: измерительной линии, направленного ответвителя (НО), поляризационный, мостовой, двенадцатиполосника, импульсный и другие [1].

Стремление исключить из результата измерений погрешности, вызванные несовершенством первичного измерительного преобразователя (конечной направленностью и рассогласованием измерительного выхода), привело к появлению метода раздвигания отражений (МРО) [2]. Этот метод является дальнейшим развитием метода НО и применяется для точного измерения малых коэффициентов отражения двух- и четырехполосников на высоких частотах.

Структурная схема, иллюстрирующая МРО, представлена на рис. 1.

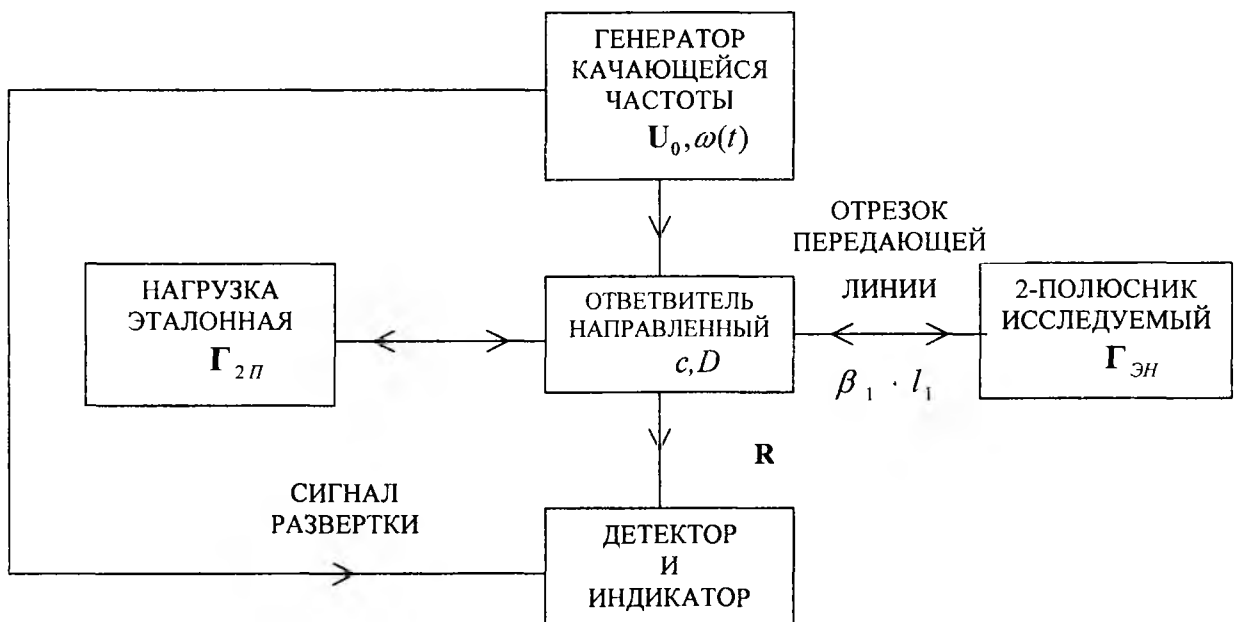


Рис. 1

Сущность МРО состоит в получении сигнала, который образуется в результате интерференции двух сигналов, один из которых отражен от исследуемого двухполосника с неизвестным малым коэффициентом отражения $\Gamma_{2П}$, а второй создается дополнительно вводимым источником отражения (эталонная нагрузка с известным коэффициентом отражения $\Gamma_{ЭН}$ ($\Gamma_{ЭН} > \Gamma_{2П}$)). Для формирования суммы и разности амплитуд интерферирующих сигналов используется быстрое изменение с частотой фазы сигнала, отраженного от исследуемого двухполосника, которое вызывается включением между двухполосником и НО отрезка передающей линии, имеющего электрическую длину $\beta_1 l_1$.

Частотно-модулированный сигнал с амплитудой U_0 и мгновенной частотой $\omega(t)$, выдаваемый генератором качающейся частоты, проходит через отрезок передающей линии, отражается от исследуемого двухполюсника, вновь проходит через отрезок передающей линии, ослабляется в НО, имеющем переходное ослабление c и направленность D , и проходит в рабочее плечо НО

$$X = \frac{U_0 \cdot \Gamma_{2n} \cdot (c-1)}{c^2} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2 + 2\beta_1 \cdot l_1)), \quad (1)$$

где U_0 – комплексная амплитуда падающей волны; Γ_{2n} – комплексный коэффициент отражения исследуемого двухполюсника; c – переходное ослабление НО; $\omega(t)$ – мгновенная частота; β – фазовая постоянная передающей линии; l_2 – длина передающей линии, соединяющей генератор и измерительное устройство; β_1 – фазовая постоянная длинного отрезка передающей линии; l_1 – длина длинного отрезка передающей линии.

Сигнал, ответвленный НО в нерабочее плечо вторичной линии, в котором находится эталонная нагрузка, ослабляется в НО, отражается от эталонной нагрузки и поступает на выход НО:

$$A = \frac{U_0 \cdot \Gamma_{ЭН}}{c} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2 + 2\beta \cdot l_a)), \quad (2)$$

где $\Gamma_{ЭН}$ – комплексный коэффициент отражения эталонной нагрузки; l_a – длина передающей линии между НО и эталонной нагрузкой.

В методе НО эталонная нагрузка в нерабочем плече вторичной линии ответвителя является согласованной, и отличие от нуля отраженного от нее сигнала вызывает погрешность рассогласования. В МРО сигнал A используется для компенсации погрешностей, вызываемых конечной направленностью НО и рассогласованием измерительного выхода.

Кроме этих сигналов на выход НО попадает еще одна составляющая, проникающая в рабочее плечо вторичного волновода из первичного тракта и обусловленная конечной направленностью НО. При наличии идеального ответвителя с $D=\infty$ на детектор поступали бы волны, отраженные от двухполюсника и эталонной нагрузки. Так как реальная направленность НО конечна, то на детектор проходит еще один небольшой по амплитуде сигнал непосредственно от генератора качающейся частоты:

$$B = \frac{U_0}{c \cdot D} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2)), \quad (3)$$

где D – величина направленности НО.

Результирующий сигнал представляет собой сумму этих трех составляющих, интерферирующих на выходе НО:

$$R = X + A + B = \frac{U_0 \cdot \Gamma_{2n} \cdot (c-1)}{c^2} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2 + 2\beta_1 \cdot l_1)) + \frac{U_0 \cdot \Gamma_{ЭН}}{c} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2 + 2\beta \cdot l_a)) + \frac{U_0}{c \cdot D} \text{EXP}(j(\omega(t) \cdot t - \beta \cdot l_2)). \quad (4)$$

Этот суммарный сигнал содержит информацию о коэффициентах отражения как исследуемого двухполюсника, так и эталонной нагрузки. Применяв моделирование на компьютере, несложно определить оба параметра. Возможность выделения сигнала, определяющего коэффициент отражения эталонной нагрузки, используется при калибровке измерительного преобразователя.

График, характеризующий суммарный сигнал, поступающий в аппарат детектирования представлен на рис. 2.

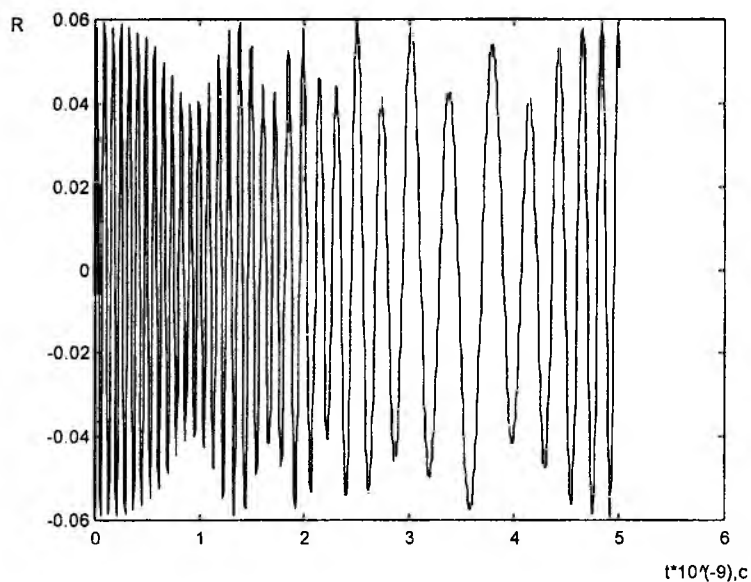


Рис. 2

Дальнейшая обработка сигнала осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье. Для выделения сигнала, характеризующего модуль коэффициента отражения исследуемого двухполосника, осуществляется выделение осцилляций с помощью полосно-пропускающего фильтра. Участок осциллирующей характеристики свертывается с весовой функцией Кайзера-Бесселя, у которой преобразование Фурье – характеристика полосно-пропускающего фильтра, а свертка эквивалентна выделению осцилляций. Огибающая сигнала выделяется с помощью преобразования Гильберта. Дальнейшее выделение амплитуды осцилляций эквивалентно пиковому детектированию.

Отфильтрованный сигнал представлен на рис. 3.

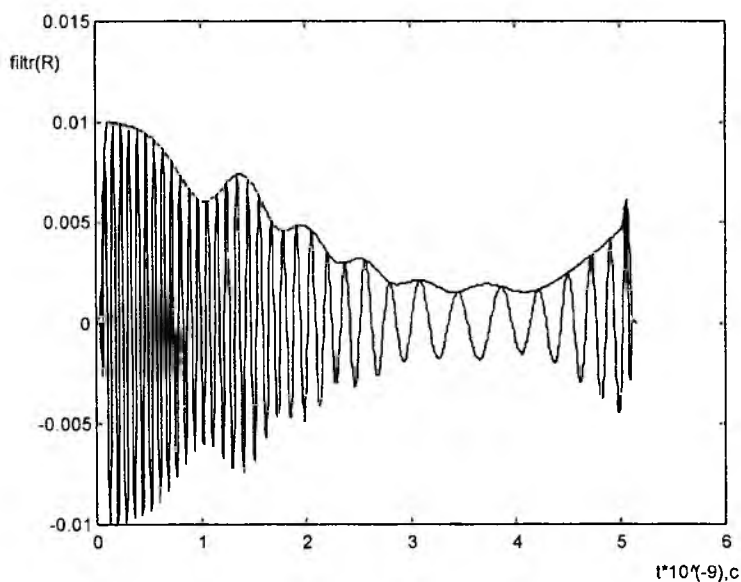


Рис. 3

Огибающая этого сигнала характеризует неизвестный коэффициент отражения двухполосника. Максимальное значение огибающей определяет модуль искомого коэффициента отражения $|\Gamma_{2л}|$.

Процесс фильтрации результирующего сигнала, выделения его огибающей и определения пиковых значений реализовано с помощью системы математических и инженерных вычислений MATLAB [3]. При составлении программы, позволяющей автоматизировать обработку сигнала, была использована версия 5.2 пакета MATLAB, а также пакеты расширения Symbolic Math Toolbox и Signal Processing Toolbox.

Получены графики, визуально представляющие эти сигналы при фиксированных параметрах. Применение компьютерного моделирования позволило проследить влияние, оказываемое на процесс измерения изменением электрической длины вводимого отрезка передающей линии; частотных параметров сигнала, выдаваемого генератором качающейся частоты – несущей частоты, модулирующей частоты, частоты девиации; параметров НО – переходного ослабления и направленности. Наблюдение и анализ графиков сигналов при фиксации одних параметров и изменении других позволяют определить оптимальные характеристики устройств, входящих в состав измерительной установки.

Применение компьютерной обработки данных в МРО позволяет устранить часть дорогостоящего СВЧ-оборудования, необходимого для аналоговой фильтрации сигнала, при одновременном повышении точности измерений.

Источниками погрешностей, возникающих при использовании МРО, являются: погрешности, вносимые генератором качающейся частоты (погрешность вследствие нестабильности уровня выходной мощности в широком диапазоне частот, погрешность измерения частоты с помощью встроенного частотомера); погрешность, вносимая использованием НО (неточность определения переходного ослабления ответвителя); погрешность, обусловленная неточностью измерения электрической длины вводимого отрезка передающей линии, а также отличие его волнового сопротивления от номинального значения; погрешность, обусловленная неточностью определения коэффициента отражения эталонной нагрузки; погрешность, вносимая применением дискретного преобразования Фурье; погрешность, вносимая при детектировании сигнала. Влияние погрешностей, которые являлись доминирующими в методе НО, – погрешности из-за конечной направленности ответвителя и погрешности из-за отличия волнового сопротивления измерительного выхода от номинального значения – в рассматриваемом методе значительно уменьшено за счет оптимизации структурной схемы и компьютерной обработки.

При анализе погрешностей, возникающих при использовании МРО, установлена достаточно высокая точность измерений по сравнению с другими методами. При использовании измерительных устройств примерно равных классов точности (разъемы, НО, зонды) уменьшение погрешности достигается применением в МРО структурно-алгоритмического метода коррекции погрешности в совокупности с компьютерной обработкой данных. Так при применении метода НО, на котором базируется МРО, погрешность измерения коэффициентов отражения двухполосников составляет $\pm 4 \div 5$ %. Использование МРО позволяет уменьшить погрешность измерения до $\pm 1 \div 2$ %.

Список литературы: 1. Альтман Дж. Л. Устройства сверхвысоких частот. М.: Мир, 1968. 487 с.
2. Рейзенкинд Я. А., Следков В. А. Состояние и перспективы развития методов измерения параметров двухполосников и четырехполосников на СВЧ // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 4. С. 30-60.
3. Мартынов Н. Н., Иванов А. П. MATLAB 5.x. Вычисления, визуализация, программирование. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. 336 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 06.11.2001