

УДК 621.396

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Д.А. КОНДРАШОВ, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.М. КОСТРИКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 17 апреля 2014

Представлена схема построения векторного анализатора цепей (анализируются параметры  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ) гомодинного типа с формированием квадратурных сигналов на основе использования аппаратного многопозиционного фазовращателя СВЧ-сигналов в диапазоне частот 75–110 ГГц, приводится математическая модель обработки квадратурных сигналов и ее реализация в программной модели.

*Ключевые слова:* векторный анализатор цепей, фазовращатель, квадратурный сигнал.

### Введение

Значительное место в радиоэлектронике занимают вопросы создания и применения радиоэлектронных СВЧ-систем и средств миллиметрового диапазона волн. Исследование характеристик и параметров СВЧ-устройств при их создании и проверка соответствия таких устройств спецификационным требованиям при производственном выпуске, а также многие другие задачи и исследования требуют соответствующих средств инструментального анализа СВЧ-устройств и их соединений [1, 2].

Современные методы анализа и расчета СВЧ-устройств и их соединений базируются на «цепном» их представлении, когда СВЧ-устройство представляется эквивалентным многополюсником, описываемым определенной системой параметров. При исследовании таких устройств и соединений важно знать, насколько согласованы устройства, каковы в них потери и т.п. К числу наиболее эффективных измерительных средств, предназначенных для анализа параметров СВЧ-устройств (СВЧ-цепей), относятся векторные анализаторы СВЧ-цепей (ВАЦ). ВАЦ представляют собой современные высокопроизводительные информационно-измерительные системы, позволяющие провести необходимые измерения параметров устройств с гарантированной точностью в широких частотных диапазонах с соответствующей обработкой, представлением и хранением измеренной информации о параметрах и характеристиках испытываемых устройств [3].

Рассматриваемый в данной статье ВАЦ выполнен по гомодинному принципу построения и предназначен для автоматизированного измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения ( $S_{11}$  и  $S_{21}$ ) волноводных устройств с цифровым отсчетом измеряемых величин и воспроизведением их частотных характеристик в декартовой и полярной системе координат на экране встроенного в ВАЦ компьютера. Объектами измерения могут быть устройства оконечного типа – двухполюсники и проходного типа – четырехполюсники. В гомодинном ВАЦ используется модуляция опорного и измерительного сигналов фазовой манипуляцией по алгоритму 0– $\pi$ .

Схемы с одновременной модуляцией как опорного, так и измерительного сигнала позволяют объединить достоинства, свойственные методам модуляции только измерительного и только опорного сигналов. Такое решение позволяет получить относительно простыми средствами результирующий сигнал, характерный для гетеродинных ВАЦ. Данный метод

универсален относительно используемых видов модуляции при условии, что модуляция раздельная, а частоты модулирующих напряжений разные.

### Схема построения панорамного измерителя

Принцип действия ВАЦ основан на раздельном выделении падающей на объект измерения, отраженной и прошедшей волн СВЧ-сигнала. Напряжения, пропорциональные амплитудам падающей, отраженной и прошедшей волн после усиления и вычисления по специальным алгоритмам преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль  $|S_{11}|$  и фазу  $\arg S_{11}$  коэффициента отражения, КСВН, модуль  $|S_{21}|$  и фазу  $\arg S_{21}$  коэффициента передачи. Измеряемая информация отображается в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат с отсчетом при помощи маркера значений измеряемых параметров в любой частотной точке диапазона рабочих частот ВАЦ. Структурная схема ВАЦ представлена на рис. 1. ВАЦ состоит из генератора качающейся частоты (ГКЧ), измерительного СВЧ-тракта, блока обработки сигналов измерительной информации (БОС), ЭВМ, ЖКИ и блока питания.

Работа ВАЦ осуществляется следующим образом. Сигнал с выхода ГКЧ поступает на вход измерительного СВЧ тракта, к которому подключается объект измерений. СВЧ-сигнал, несущий информацию об измеряемых  $S$ -параметрах, с выхода объекта измерений поступает на БОС, который осуществляет ее преобразование, и подачу на ЭВМ в форме сигналов, удобных для представления информации об измеренных параметрах на ЖКИ.

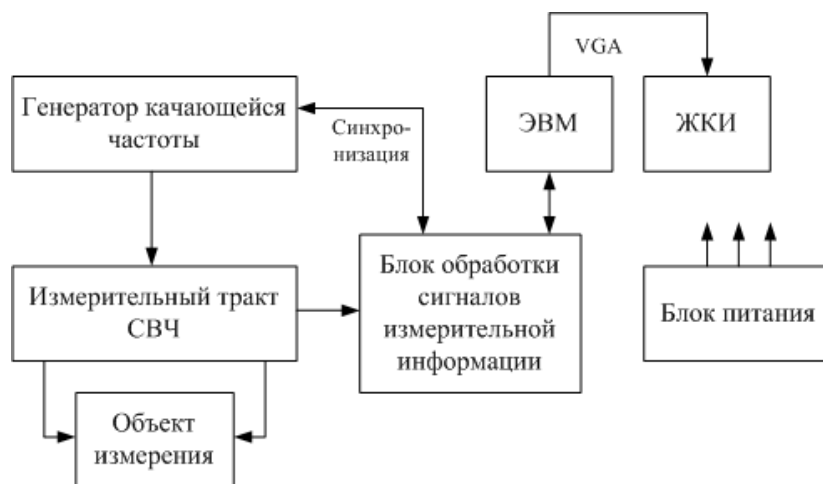


Рис. 1. Структурная схема ВАЦ

### Математическая модель

ВАЦ с модуляцией опорного и измерительного сигналов позволяет измерять как модуль так и фазовую характеристику параметров испытуемого устройства. Поэтому возникает необходимость снятия квадратурных сигналов, несущих информацию о косинусной и синусной составляющей сигнала.

Обычно в измерительной схеме информация об измеряемом параметре содержится в сигнале, который выражается в виде [4, 5]:  $U_1 = k_1 \cdot |S_x| \cdot \cos(\varphi_x + \varphi_0)$ , где  $S_x$  и  $\varphi_x$  – модуль и фаза измеряемой характеристики,  $k_1$  и  $\varphi_0$  – некие параметры схемы.

Для извлечения фазы  $\varphi_x$  нужно иметь синусную составляющую:  $U_2 = k_2 \cdot |S_x| \cdot \sin(\varphi_x + \varphi_0)$ , где  $k_2$  – параметр схемы.

Тогда фаза может быть найдена как взятая с соответствующим знаком величина:

$$\varphi_x = \arctg\left(\frac{U_2 \cdot k_1}{U_1 \cdot k_2}\right) - \varphi_0.$$

Используемый в рассматриваемом ВАЦ способ формирования квадратурных сигналов основан на введении в опорный канал анализатора цепей электрически управляемого

бинарного фазовращателя, осуществляющего фазовую коммутацию опорного сигнала по алгоритму  $0-\pi/2$ . Структурная схема волноводного СВЧ-тракта приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема СВЧ тракта, используемого для получения квадратурных сигналов в ВАЦ 75–110 ГГц

Математическую модель обработки сигнала в ВАЦ можно разделить на два этапа: калибровку и измерение. При калибровке прибора снимаются массивы данных  $U_{1c}$ ,  $U_{2c}$ , соответствующие разным положениям фазовращателя, и производятся следующие вычисления над ними:

$$K_c = \frac{U_{1c}}{2}, \quad (1)$$

$$K_s = \frac{U_{2c}}{2}. \quad (2)$$

При измерениях производятся следующие вычисления над сохраненными калибровочными массивами и постоянно снимаемыми массивами  $U_{1m}$  и  $U_{2m}$ :

$$H_c = \frac{K_c \cdot U_{1m} + K_s \cdot U_{2m}}{2 \cdot (K_c \cdot K_c + K_s \cdot K_s)}, \quad H_s = \frac{K_c \cdot U_{2m} - K_s \cdot U_{1m}}{2 \cdot (K_c \cdot K_c + K_s \cdot K_s)}, \quad |H| = \sqrt{H_c^2 + H_s^2},$$

где  $|H|$  – модуль

параметра  $S_{21}$  исследуемого устройства.

$$\varphi = \arctg\left(\frac{H_s}{H_c}\right),$$

где  $\varphi$  – фаза параметра  $S_{21}$  исследуемого устройства.

Характеристики параметра  $S_{11}$  вычисляются аналогично, за исключением формул (1) и (2), они заменяются формулами (3) и (4):

$$K_c = -\frac{U_{1c}}{2}, \quad (3)$$

$$K_s = -\frac{U_{2c}}{2}. \quad (4)$$

### Программное обеспечение

Программное обеспечение в одной из своих подпрограмм реализует приведенную математическую модель. При выборе пользователем режима калибровки и нажатия кнопки «Выполнить калибровку» начинается съем данных с АЦП для параметра  $S_{21}$ :

1. Фазовращатель переключается в положение 1 (фазового сдвига нет), данные об амплитудно-частотной характеристике сохраняются в двухмерный массив «амплитуда, частота»  $U_{1c}$  из 256 точек.

2. Фазовращатель переключается в положение 2 (фазовый сдвиг на первую, вторую и третью ячейки фазовращателя), данные сохраняются в двухмерный массив «амплитуда, частота»  $U_{2c}$  из 256 точек.

3. Два массива сохраняются в конфигурационный файл, что позволяет немедленно начинать измерения при следующем включении прибора.

4. Все шаги с фазовращателем повторяются для параметра  $S_{11}$ .

При выборе пользователем режима измерений происходит непрерывный съем данных с АЦП и расчет отображаемых характеристик.

1. Фазовращатель переключается в положение 1 (фазового сдвига нет), данные об амплитудно-частотной характеристике сохраняются в двухмерный массив «амплитуда, частота»  $U_{1m}$  из 256 точек.

2. Фазовращатель переключается в положение 2 (фазовый сдвиг на первую, вторую и третью ячейки фазовращателя), данные сохраняются в двухмерный массив «амплитуда, частота»  $U_{2m}$  из 256 точек.

3. Происходит перерасчет отображаемых характеристик модуля и фазы измеряемого  $S$ -параметра согласно формулам математической модели.

4. К отображаемым результатам применяются специальные алгоритмы цифровой обработки, что позволяет компенсировать нелинейные искажения сигнала в волноводном тракте во время калибровки и измерений.

Управление работой ВАЦ, выбор режимов измерения и калибровки, а также выбор формы индикации и регистрации результатов измерения осуществляется в диалоговом режиме органами управления, расположенными на передней панели ВАЦ. Программное обеспечение и алгоритмы отдельных подпрограмм разработаны таким образом, чтобы исключить неверные действия оператора. На рис. 3 представлено окно программы с результатами калибровки.

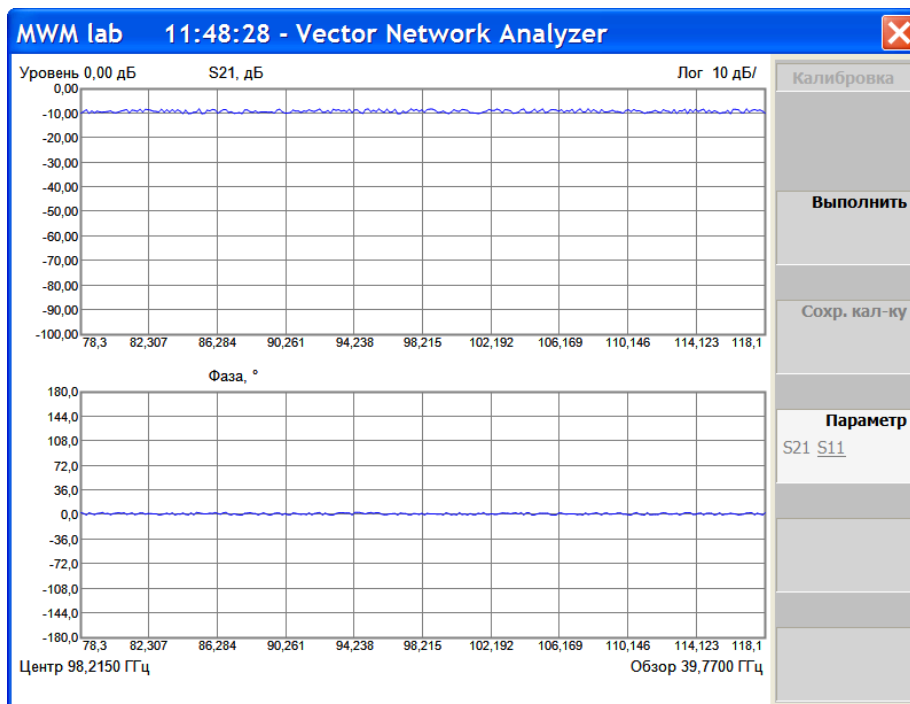


Рис. 3. Главное окно программы управления ВАЦ после выполнения калибровки

### Заключение

Разработана математическая модель обработки квадратурных сигналов для векторного анализатора цепей в диапазоне частот 75–110 ГГц. Предложенная модель позволяет строить более дешевые ВАЦ гомодинного типа и получать результаты близкие к величинам, полученным в гетеродинных системах. Также применение универсального программного обеспечения позволило реализовать все достоинства математической модели.

# SOFTWARE OF VECTOR NETWORK ANALYZER IN MILLIMETER WAVE RANGE

D.A. KONDRASHOV, A.V. GUSINSKI, A.M. KOSTRIKIN

## Abstract

A scheme for constructing Vector Network Analyzer of transmission and reflection coefficients (parameters  $S_{21}$  and  $S_{11}$ ) of the homodyne type with the formation quadrature signals based on the use of multi-point hardware shifter microwave signals in the frequency range 75–110 GHz is presented, provides a mathematical model for the processing of the quadrature signals and its implementation in the programming model.

## Список литературы

1. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1988.
2. *Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.П.* Цифровая обработка сигналов. М., 1985.
3. *Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М.* Векторные анализаторы цепей миллиметровых длин волн. Ч. 1. Минск, 2004.
4. *Рабинер Л., Голд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М., 1978.
5. *Куланчев А.П.* Компьютерный контроль процессов и анализ сигналов. Т. 3. М., 1999.