

УДК 681.2.083

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА В ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРАХ ЦЕПЕЙ

А.А. КОПШАЙ, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.В. ВОРОШЕНЬ, Д.А. КОНДРАШОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 21 апреля 2017*

**Аннотация.** Для повышения точности измерения  $S$ -параметров устройств СВЧ при помощи векторных анализаторов цепей предлагается использовать алгоритм цифровой обработки, основанный на квадратурном разложении измерительного сигнала с последующим накоплением в течение всего периода наблюдения. В статье приведены результаты математического моделирования алгоритма, а также результаты работы алгоритма в векторном анализаторе цепей гетеродинного типа P4-мвм-118.

*Ключевые слова:* векторные анализаторы цепей, цифровая обработка сигнала, квадратурное разложение.

**Annotation.** To improve the accuracy of measuring the  $S$ -parameters of microwave devices using vector network analyzers, it is proposed to use a digital processing algorithm based on the quadrature decomposition of the measurement signal followed by accumulation during the entire observation period. The article presents the results of mathematical modeling of the algorithm, as well as the results of the algorithm in a vector network analyzer of heterodyne type P4-mvm-118.

*Keywords:* vector chain analyzers, digital signal processing, quadrature decomposition.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 106, No. 4, pp. 88–91**

**Algorithm of measuring signal processing in vector analyzers of circuits**

**A.A. Kopshaj, A.V. Gusinskij, A.V. Voroshen', D.A. Kondrashov**

### Введение

Задача обработки измерительного сигнала в векторных анализаторах цепей (ВАЦ) заключается в извлечении из измерительного сигнала информации об амплитуде и фазе измеряемого параметра СВЧ устройства. Одним из способов получения данных величин является формирование квадратурных, т. е. сдвинутых по фазе на  $90^\circ$  сигналов, обработка которых позволяет извлечь информацию как об амплитудно-частотных, так и о фазо-частотных зависимостях [1, с. 72]. Одной из особенностей векторных анализаторов цепей является необходимость формирования опорного сигнала, предназначенного для измерения фазо-частотных параметров цепей. Таким образом, для измерения матрицы  $S$ -параметров четырехполюсника при помощи двухпортовой схемы ВАЦ необходимо обрабатывать, как минимум, 3 сигнала: отраженный (канал  $A$ ), прошедший (канал  $B$ ), опорный (канал  $R$ ).

### Математическая модель

В простейшем случае, информационный сигнал, полученный с выхода гетеродинного преобразователя СВЧ [1, с. 75], представляет собой смесь немодулированного синусоидального сигнала и аддитивного белого шума:

$$U(t) = A \cdot \cos(2\pi F_0 t + \varphi) + \xi(t). \quad (1)$$

Данный сигнал подается на аналогово-цифровой преобразователь с частотой дискретизации  $f$ , формирующий отсчеты сигнала в течение периода наблюдения  $T$ :

$S(k) = U(t_0 + k\tau), k = 0, 1 \dots N-1$ , где  $\tau = 1/f$  – период дискретизации,  $N = T/\tau$  – количество отсчетов сигнала за период наблюдения.

Для вычисления квадратурной ( $Q$ ) и синфазной ( $I$ ) составляющих сигнала воспользуемся формулой дискретного преобразования Фурье [2] для одной частотной точки, соответствующей частоте информационного сигнала  $F_0$ . Учитывая, что время наблюдения конечно, при обработке цифрового сигнала воспользуемся оконной функцией с плоской вершиной [1, с. 167–169]. Таким образом, окончательные формулы для  $I$  и  $Q$  составляющих измерительного сигнала примут вид:

$$S_I = \sum_{n=0}^{N-1} S(k)w(k) \cos\left(\frac{2\pi F_0}{f} n\right), \quad (2)$$

$$S_Q = \sum_{n=0}^{N-1} S(k)w(k) \sin\left(\frac{2\pi F_0}{f} n\right), \quad (3)$$

где  $w(k)$  – отсчеты оконной функции с плоской вершиной длиной  $N$ . При условии кратности частот измерительного сигнала и дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) некоторому малому числу  $M$ , реализацию данного алгоритма в устройстве можно существенно упростить, формируя синусную и косинусную функции при помощи регистров циклического сдвига длины  $M$  с заранее рассчитанными значениями функций в соответствующих точках. Функциональная схема устройства, реализующего вычисление по формулам (2) и (3), представлена на рис. 1.

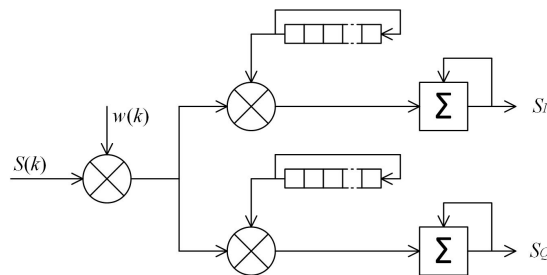


Рис. 1. Схема, реализующая квадратурное разложение и накопление измерительного сигнала

Полученные таким образом составляющие преобразуются из прямоугольных координат  $S_{I,Q}$  в полярные  $S_{\rho,\varphi}$  по известным формулам [3]. Расчет  $S$ -параметров производится в два этапа. На этапе калибровки измеряются векторные значения напряжения в трех измерительных каналах:  $A_{\rho,\varphi}^0, B_{\rho,\varphi}^0, R_{\rho,\varphi}^0$ . На этапе измерения, при включении объекта измерения между портами ВАЦ, получают значения  $A_{\rho,\varphi}^1, B_{\rho,\varphi}^1, R_{\rho,\varphi}^1$ , которые затем пересчитываются в значения  $S$ -параметров по формулам:

$$\begin{cases} |S_{11}| = \frac{A_{\rho}^1 R_{\rho}^0}{A_{\rho}^0 R_{\rho}^1}, \\ \arg(S_{11}) = (A_{\varphi}^1 - R_{\varphi}^1) - (A_{\varphi}^0 - R_{\varphi}^0), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} |S_{21}| = \frac{B_{\rho}^1 R_{\rho}^0}{B_{\rho}^0 R_{\rho}^1}, \\ \arg(S_{21}) = (B_{\varphi}^1 - R_{\varphi}^1) - (B_{\varphi}^0 - R_{\varphi}^0). \end{cases} \quad (5)$$

## Методика эксперимента

Для оценки характеристик точности алгоритма были проведены экспериментальные исследования на базе векторного анализатора цепей P4-мвм-118 разработки Центра 1.9 НИЧ БГУИР. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

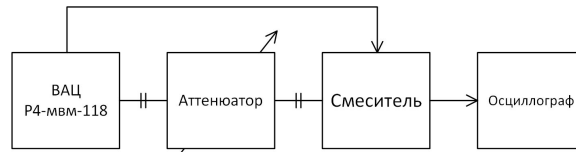


Рис. 2. Схема эксперимента

В качестве объекта измерения использовался аттенюатор поляризационный АП-20, позволяющий устанавливать ослабление сигнала в пределах от 0 до 70 дБ. Объект измерения включается между выходным портом ВАЦ P4-мвм-118 и смесителем, входящим в комплект ВАЦ. Полученный сигнал канала  $B$  промежуточной частоты  $F_0 = 100$  кГц подается на вход  $X$  цифрового осциллографа GW Instek GDS-71152A с периодом дискретизации АЦП 10 нс и сохраняется в виде таблицы для каждого значения ослабления аттенюатора  $A = 0, 5, 10, \dots, 70$  дБ, период наблюдения – 250 мкс. На вход  $Y$  с аналогичными параметрами подается сигнал опорного канала  $R$ . Затем, в пакете Matlab из таблиц формируются отсчеты сигналов с частотой дискретизации  $f = 600$  кГц. В результате обработки обоих сигналов по формулам (2), (3) и (5) были получены значения параметра  $S_{21}^1$  для указанных значений ослабления аттенюатора (рис. 3, а). Для сравнения, для каждой величины ослабления формировался сигнал по формуле (1) с мощностью шумов на уровне  $-70$  дБн, который затем подвергался аналогичной обработке для получения параметра  $S_{21}^0$  (рис. 3, а). Для оценки точности вычислялись значения относительной погрешности измерения [4] (рис. 3, б).

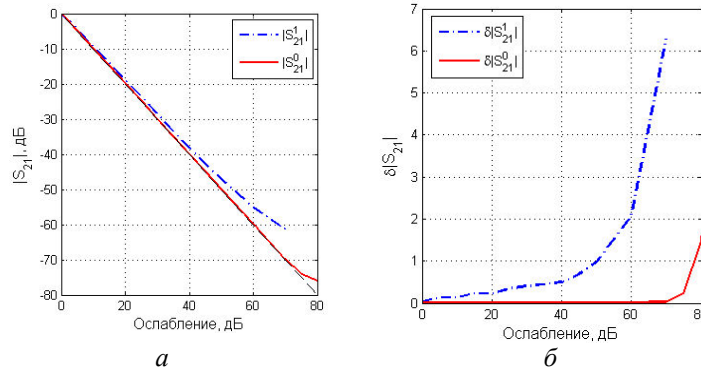


Рис. 3. Результаты эксперимента: а – значения ослабления; б – значения относительной погрешности измерения

## Результаты и их обсуждение

Анализ результатов экспериментального исследования показал, что применение алгоритма в реальных устройствах приводит к значительным погрешностям измерения в области малых значений модуля измеряемых параметров. Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования позволяет утверждать, что данная погрешность не связана с воздействием аддитивных шумов.

## Заключение

В статье представлен алгоритм цифровой обработки измерительного сигнала векторного анализатора цепей. Приведены результаты математического моделирования работы алгоритма с зашумленным измерительным сигналом, а также результаты обработки выходного сигнала преобразователя СВЧ векторного анализатора цепей P4-мвм-118 разработки Центра 1.9 НИЧ БГУИР.

## Список литературы

1. Гусинский А. В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Минск: БГУИР, 2008. Ч. 3 (кн. 1). 214 с.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2006. 751 с.
3. Гельфанд И.М., Глаголева Е.Г., Кириллов А.А. Метод координат // Математика. 1973. Вып. 1. С. 47–50.
4. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. М.: Высш. шк., 2002. 348 с.

## References

1. Gusinskij A. V., Sharov G.A., Kostrikin A.M. Vektornye analizatory cepej millimetrovoh voln. Minsk: BGUIR, 2008. Ch. 3 (kn.1). 214 s. (in Russ.)
2. Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov. SPb: Piter, 2006. 751 s. (in Russ.)
3. Gel'fand I.M., Glagoleva E.G., Kirillov A.A. Metod koordinat // Matematika. 1973. Vyp. 1. S. 47–50. (in Russ.)
4. Nazarov N.G. Metrologija. Osnovnye ponjatija i matematicheskie modeli. M.: Vyssh. shk., 2002. 348 s. (in Russ.)

## Сведения об авторах

Копшай А.А., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, директор Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ворошень А.В., старший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кондрашов Д.А., старший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

## Information about the authors

Kopshai AA, Research Fellow of the Center 1.9 Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gusinsky AV, Ph.D., Associate Professor, Director Center 1.9 of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Voroshen AV, Senior Research Fellow of the Center 1.9 SRI of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kondrashov DA, senior researcher of the Center 1.9 of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел. +375-17-293-88-76;  
e-mail: denis\_kondrashov@yahoo.co.uk  
Кондрашов Денис Александрович

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-88-76;  
e-mail: denis\_kondrashov@yahoo.co.uk  
Kondrashov Denis Aleksandrovich