

УДК 621.396

## ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ КВАДРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ

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

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 мая 2017*

**Аннотация.** Представлен алгоритм применения цифровой фильтрации к синусной и косинусной составляющим квадратурного сигнала векторного анализатора цепей. Фильтрация применяется на стадиях калибровки и измерения, к исходным сигналам в виде напряжений и конечным результатам измерений. Приведена математическая модель двух различных способов цифровой фильтрации, используемых совместно и позволяющих улучшить форму квадратурного сигнала и уменьшить влияние шумов различного происхождения, присутствующих в анализируемом сигнале.

*Ключевые слова:* фазовращатель, изменение фазы, фазовый сдвиг.

**Abstract.** An algorithm for the use of digital filtering to the sine and cosine components of the quadrature signal in vector network analyzer is presented. Filters used for calibration and measuring stages to the original signals in volts and end measurements values. The mathematical model of three different methods of digital filtering, used together, and allowing better form quadrature signals and remove the noise of various origins in the analyzed signal is presented.

*Keywords:* phase shift, phase change, phase shift.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 107, No. 5, pp. 13-18**

**Digital filtering of square signals of chains' vector analyzers**

**D.A. Kondrashov, A.V. Gusinsky, A.M. Kostrikin, M.S. Svirid**

### Введение

Современное развитие электронно-вычислительных технологий позволяет в режиме реального времени производить преобразование в цифровую форму поступающих аналоговых сигналов с высокой частотой дискретизации. При этом зачастую возникает необходимость дополнительной обработки преобразованного сигнала, такой как фильтрация сигнала в выбранном диапазоне частот с сохранением текущей фазы и амплитуды частотных составляющих сигнала. Именно такая обработка цифровых сигналов требуется при создании вычислительных комплексов, производящих в режиме реального времени измерение сигнала с выходов сверхвысокочастотных (СВЧ) детекторов пропорционально изменению СВЧ мощности при прохождении через исследуемый объект.

Цифровая фильтрация предназначена для реализации следующих целей:

- устранения незначительных по значению флуктуаций отображаемого сигнала на отдельных участках характеристики – усреднение отдельных участков характеристики;
- устранения выбросов в отдельных значениях характеристики, обусловленных выбросами в выходных сигналах генератора качающейся частоты – удаление пиков.

Такие цели могут быть достигнуты разработкой алгоритмов цифровой фильтрации сигналов.

### Математическая модель

*Алгоритм усреднения отдельных участков характеристики.* Имеются значения характеристики в 256 частотных точках  $x_0, \dots, x_i, \dots, x_{255}$  ( $i = 0, \dots, 255$ ). Усреднение

производится на основе  $r$  ближайших точек с каждой частотной точкой значений ( $r=1, \dots, 125$ ). Значение  $r$  вводится исходя из требования к участку усреднения. Обозначим через  $m$  текущие значения точек в пределах изменения от 1 до  $r$  ( $m=1, \dots, r$ ) (рис. 1).

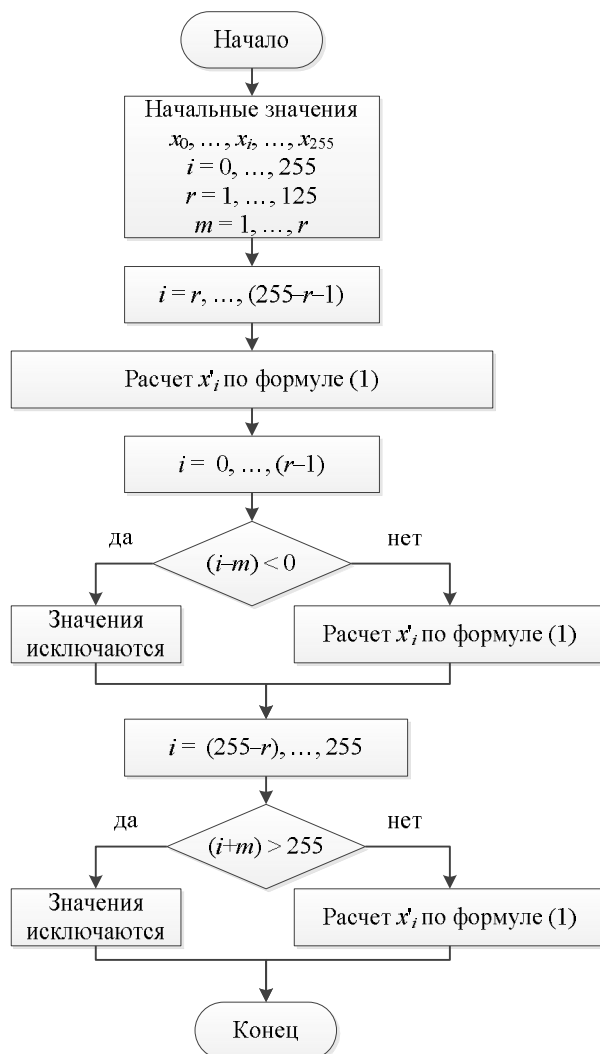


Рис. 1. Алгоритм усреднения отдельных участков характеристики

Тогда, начиная с точек от  $r$  до  $(256 - r - 1)$ , усредненное значение характеристики  $x'_i$  находится из формулы

$$x'_i = \left[ \begin{aligned} &x_i + \frac{r}{r+1} \cdot (x_{i-1} + x_{i+1}) + \frac{r-1}{r+1} \cdot (x_{i-2} + x_{i+2}) + \\ &+ \dots + \frac{r+1-m}{r+1} \cdot (x_{i-m} + x_{i+m}) + \\ &+ \dots + \frac{2}{r+1} \cdot (x_{i-r+1} + x_{i+r-1}) + \frac{1}{r-1} \cdot (x_{i-r} + x_{i+r}) \end{aligned} \right] / (r+1). \quad (1)$$

Для точек от 0 до  $(r-1)$  используется формула (1), но отбрасываются члены, для которых выполняется условие  $(i-m) < 0$ . Аналогично для точек от  $(256-r)$  до 256 точки также используется формула (1), но отбрасываются члены, для которых выполняется условие  $(i+m) > 256$ .

*Алгоритм удаления пиков.* Имеются значения характеристики в 256 частотных точках  $x_0, \dots, x_i, \dots, x_{255}$ . Согласно алгоритму (рис. 2) находятся приращения по формулам (2)–(6).

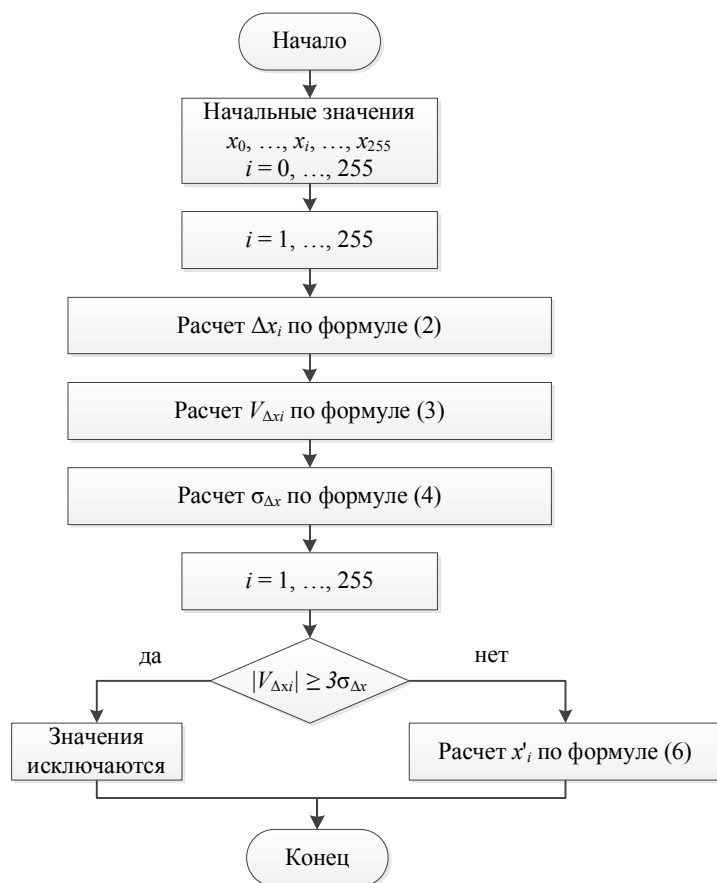


Рис. 2. Алгоритм удаления пиков

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x_1 = x_1 - x_0; \\ \Delta x_2 = x_2 - x_1; \\ \dots \\ \Delta x_i = x_i - x_{i-1}; \\ \dots \\ \Delta x_{255} = x_{255} - x_{254}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Находится среднее значение отклонения по всему диапазону и отклонения от этого среднего значения в отдельных точках:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{255} \Delta x_{i,i-1}}{255-1}; \\ V_{\Delta x 1} = \Delta x_1 - \Delta \bar{x}; \\ V_{\Delta x 2} = \Delta x_2 - \Delta \bar{x}; \\ \dots \\ V_{\Delta x i} = \Delta x_i - \Delta \bar{x}; \\ \dots \\ V_{\Delta x 255} = \Delta x_{255} - \Delta \bar{x}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Вычисляется значение оценки среднеквадратичного отклонения:

$$\tilde{\sigma}_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{255} V_{\Delta x_i}^2}{255 - 2}}. \quad (4)$$

Для нахождения пиков используется критерий «трех сигм», т. е. если для какого-то значения  $j$

$$|V_{\Delta x_j}| \geq 3 \cdot \tilde{\sigma}_{\Delta x}, \quad (5)$$

то такое значение характеристики исключается. Для замены этого значения находятся два ближайших значения в точках слева и справа, в которых нет пиков, и берется усредненное значение:

$$x'_j = \frac{x_2 - x_1}{2}, \quad (6)$$

где  $x_2, x_1$  – ближайшие значения в точках, в которых нет пиков.

### Результаты исследований

Алгоритмы цифровой фильтрации могут применяться как к исходным данным квадратурных сигналов (синусной и косинусной составляющим), получаемым с детектора в виде последовательностей значений напряжений в вольтах в зависимости от частоты сигнала, так и к расчетным данным  $S$ -параметров, получаемым в результате калибровки и последующих измерений векторными анализаторами цепей.

Внешний вид полученных характеристик исследуемого устройства в виде зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  и коэффициента передачи  $S_{21}$  от частоты без цифровой фильтрации  $S$ -параметров сигналов и с применением цифровой фильтрации  $S$ -параметров сигналов приведены на рис. 3–6. Измерения проведены на векторном анализаторе цепей P4-MVM-118 производства Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

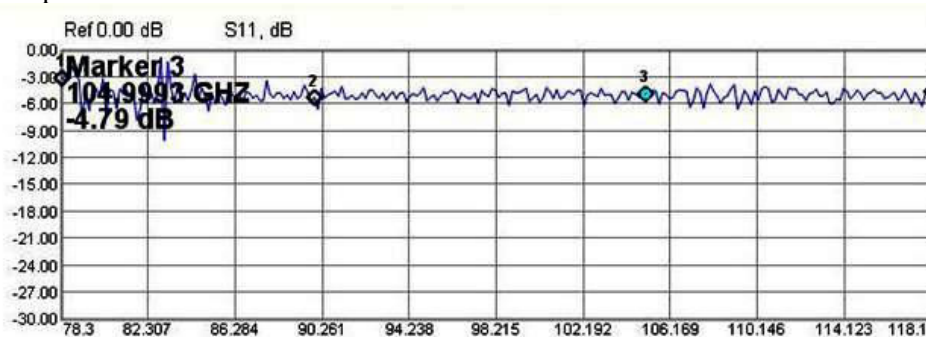


Рис. 3. Коэффициент отражения  $S_{11}$  исследуемого СВЧ устройства без применения цифровой фильтрации сигналов



Рис. 4. Коэффициент отражения  $S_{11}$  исследуемого СВЧ устройства с применением цифровой фильтрации сигналов по алгоритму усреднения

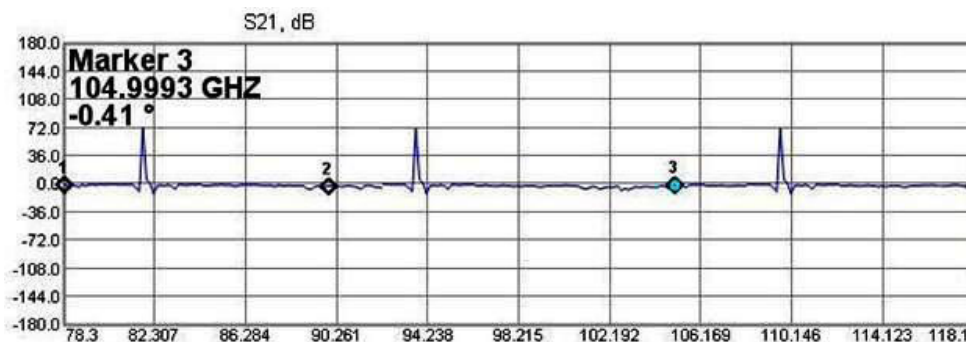


Рис. 5. Коэффициент передачи  $S_{21}$  исследуемого СВЧ устройства без применения цифровой фильтрации сигналов



Рис. 6. Коэффициент передачи  $S_{21}$  исследуемого СВЧ устройства с применением цифровой фильтрации сигналов по алгоритму устранения пиков

Как видно из сравнения рис. 3, 4 и 5, 6, применение цифровой фильтрации только к расчетным характеристикам  $S$ -параметров дает результат в виде устранения флуктуаций сигналов на отдельных участках характеристики и устранения выбросов в отдельных значениях характеристики. Представленные алгоритмы также применяются для фильтрации квадратурных сигналов, получаемых с СВЧ детекторов в приборе Р4-МВМ-118.

Применение алгоритма усреднения отдельных участков характеристики при исследовании в узкой полосе частот полосовых фильтров с небольшой полосой пропускания приводит к искажению получаемых результатов. При измерении  $S$ -параметров полосовых фильтров во всей полосе частот векторного анализатора цепей Р4-МВМ-118 высока вероятность пропуска параметров фильтра на общей характеристике. Поэтому в Р4-МВМ-118 сохранена возможность отключения применения цифровой фильтрации.

Полученные результаты показали, что формула для расчета погрешности результата измерения может быть выражена следующей формулой:  $|\Delta_{S_{21}}| = \pm(0,2 + 0,03 \cdot A)$ , дБ, где  $A$  – результаты измеренного значения в децибелах.

### Заклучение

Применение предложенных алгоритмов цифровой фильтрации к синусной и косинусной составляющим квадратурного сигнала и к расчетным  $S$ -параметрам векторного анализатора цепей позволило улучшить форму сигнала и убрать шумы различного происхождения, присутствующие в анализируемом сигнале. Использование цифровой фильтрации и на этапе калибровки, и на этапе измерения дало возможность компенсировать неидеальность СВЧ элементов, использованных при построении СВЧ тракта векторного анализатора цепей. Использование цифровой фильтрации позволяет исключить субъективную погрешность оператора при анализе и измерениях с наличием «шумовой» составляющей. Использование цифровой фильтрации позволяет улучшить качественно восприятие амплитудно-частотной характеристики и исключить неинформативное изменение показаний прибора в любой точке частотного диапазона. Особенно эффективно использование цифровой фильтрации в СВЧ диапазонах, имеющих крайне малые уровни мощности сигнала в измерительном тракте.

## Список литературы

1. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 224 с.
2. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Кн. 1. Минск: БГУИР, 2008. 240 с.
3. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Кн. 2. Минск: БГУИР, 2008. 265 с.

## References

1. Rausher K., Janssen F., Minihol'd R. Osnovy spektral'nogo analiza. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2006. 224 s. (in Russ.)
2. Gusinskij A.V., Sharov G.A., Kostrikin A.M. Vektornye analizatory cepej millimetrovyh voln. Kn. 1. Minsk: BGUIR, 2008. 240 s. (in Russ.)
3. Gusinskij A.V., Sharov G.A., Kostrikin A.M. Vektornye analizatory cepej millimetrovyh voln. Kn. 2. Minsk: BGUIR, 2008. 265 s. (in Russ.)

## Сведения об авторах

Кондрашов Д.А., с.н.с. 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.

Кострикин А.М., к.т.н., доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Свирид М.С., с.н.с. Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

## Information about the authors

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

Gusinsky A.V., PhD., associate professor, director of Center 1.9 of R&D department of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kostrikin A.M., PhD, associate professor of information protection department of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Svirid M.S., senior researcher of Center 1.9 of R&D department of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 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, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. + 375-17-293-88-76;  
e-mail: denis\_kondrashov@yahoo.co.uk  
Kondrashov Denis Alexandrovich