

УДК 621.3.08

## **Automated Measuring Complex for the Research of the Frequency Characteristics of Microwave Filters in a Wide Range of Frequencies**

**Andrey B. Gladyshev<sup>a</sup>, Dmitry D. Dmitriev<sup>\*a</sup>,  
Peter Yu. Zverev<sup>a</sup> and Ivan A. Smolev<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Siberian Federal University*

*79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

*<sup>b</sup>Department of Military Education*

*High Command Aero-Space Forces*

*14 Znamenka, Moscow, 119019, Russia*

Received 20.05.2019, received in revised form 10.06.2019, accepted 17.09.2019

---

*The article proposes a variant of an automated measuring complex designed to study the frequency characteristics of microwave filters. When developing microwave filters, it is necessary to control their frequency parameters, for which standard instruments are used – vector network analyzers. However, new technologies for manufacturing microwave filters, aimed at improving the frequency-selective characteristics and miniaturizing the design, do not allow for comprehensive studies using only one vector network analyzer. This is mainly due to the insufficient dynamic range of the vector network analyzers, which does not allow for a qualitative measurement of such parameters as attenuation in the filter barrier bands. This problem can be easily solved using a signal generator with an increased output power level and a spectrum analyzer. For a comprehensive study of the characteristics of microwave filters, a combination of methods for measuring the parameters of microwave filters is proposed, where the main characteristics will be measured in the passband using a vector network analyzer and the parameters of the obstacle bands using a signal generator and spectrum analyzer. By connecting devices into a network under the control of special software, we obtain a flexible and convenient system for automated research of the characteristics of microwave filters.*

*Keywords: microwave filter, measurement of frequency characteristics, amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristic, standing wave ratio.*

---

Citation: Gladyshev A.B., Dmitriev D.D., Zverev P.Yu., Smolev I.A. Automated measuring complex for the research of the frequency characteristics of Microwave filters in a wide range of frequencies, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(7), 765-772. DOI: 10.17516/1999-494X-0176.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: dmitriev121074@mail.ru

## **Автоматизированный измерительный комплекс для исследования частотных характеристик СВЧ-фильтров в широком диапазоне частот**

**А.Б. Гладышев<sup>а</sup>, Д.Д. Дмитриев<sup>а</sup>,  
П.Ю. Зверев<sup>а</sup>, И.А. Смолев<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

*<sup>б</sup>Отдел военного образования  
Главного командования ВКС ВС РФ  
Россия, 119019, Москва, ул. Знаменка, 14*

---

*В статье предложен вариант рабочего места в составе комплекса измерительных приборов, предназначенного для автоматизированного исследования частотных характеристик СВЧ-фильтров. При разработке СВЧ-фильтров необходимо контролировать их параметры. Чаще всего для контроля частотных свойств СВЧ-фильтров используют стандартные приборы – векторные анализаторы цепей. Однако новые технологии изготовления СВЧ-фильтров, направленные на улучшение частотно-селективных характеристик и миниатюризацию конструкции, не позволяют провести всесторонние исследования только с помощью одного векторного анализатора цепей. В основном это связано с недостаточным динамическим диапазоном векторных анализаторов цепей, что не дает возможность качественно измерить такие параметры, как затухание в полосах заграждения фильтров. С этой проблемой можно легко справиться, используя генератор сигналов с повышенным уровнем выходной мощности и анализатор спектра. Для всестороннего исследования характеристик СВЧ-фильтров предложена комбинация методов измерения параметров СВЧ-фильтров, где основные характеристики будут измеряться в полосе пропускания с помощью векторного анализатора цепей, а параметры полос заграждения – с помощью генератора сигналов и анализатора спектра. При связи приборов в сеть под управлением специального программного обеспечения получена гибкая и удобная система для автоматизированного исследования характеристик СВЧ-фильтров.*

*Ключевые слова: СВЧ-фильтр, измерение частотных характеристик, амплитудно-частотные характеристики, фазочастотные характеристики, коэффициент стоячей волны.*

---

### **Введение**

Для повышения миниатюризации радиоэлектронных систем разработчики жертвуют электрическими характеристиками фильтров. Это обусловлено тем, что для целого ряда задач требование по миниатюрности преобладает над требованиями по качеству систем. Однако улучшение электрических характеристик фильтров позволяет уменьшить общее количество всех фильтров в аппаратуре.

Составляющими функциональными элементами полосно-пропускающих СВЧ-фильтров являются электродинамические резонаторы [1, 2]. Они взаимодействуют между собой через электрическое и магнитное поля и имеют омический контакт с другими элементами системы радиоэлектроники.

Важнейшей характеристикой полосно-пропускающего фильтра является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), т. е. частотная зависимость коэффициентов прохождения

и отражения сигналов через устройство. Центральная частота рабочей полосы пропускания определяется рабочими частотами системы радиоэлектроники. Другие характеристики фильтра имеют свои зоны влияния на характеристики системы:

- ширина первой полосы пропускания фильтра определяет ширину рабочей полосы системы или подсистемы радиоэлектроники;
- уровень вносимых потерь в полосе пропускания определяет коэффициент ослабления сигнала, прошедшего через устройство, а также коэффициент шума;
- коэффициент стоячей волны (КСВ) определяет амплитуду сигнала, отраженного от входа фильтра;
- селективность вблизи полосы пропускания определяет помехозащищенность системы;
- неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) определяет степень совместимости сигналов с фазированной антенной решеткой;
- ширина и глубина полосы заграждения определяют устойчивость системы к паразитным сигналам.

Качество фильтра, как известно, в первую очередь определяется его частотно-селективными свойствами. Эти свойства характеризуются коэффициентами крутизны склонов АЧХ, уровнями ослабления сигнала в полосах заграждения, максимальными потерями и максимальной неравномерностью в полосе пропускания. Также важнейшими характеристиками фильтров являются уровень обратных потерь, неравномерность времени групповой задержки сигнала в полосе пропускания и др. При решении современных задач радиотехники нередко наряду с жесткими условиями, предъявляемыми к АЧХ фильтра, требуется обеспечить высокую степень его миниатюрности. Сочетание этих качеств исключительно сложная проблема.

### **Постановка задачи**

Необходимо отметить, что новейшие конструкции микрополосковых фильтров, отличающихся высокой степенью миниатюрности резонаторов на различных структурах полосковых проводников, весьма перспективны для создания многозвенных полосно-пропускающих фильтров с высокими частотно-селективными свойствами, в первую очередь, с достаточно широкой высокочастотной полосой заграждения с высоким уровнем подавления мощности СВЧ в ней. При создании таких фильтров требуется четко и точно контролировать их параметры. И одним измерительным прибором здесь не обойтись.

Для всестороннего исследования характеристик СВЧ-фильтров на рынке нет готового решения. Поэтому существует необходимость в создании комплексного решения для проведения экспериментальных исследований СВЧ-фильтров.

### **Структурная схема автоматизированного рабочего места**

С целью исследования частотно-селективных свойств было разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) с набором необходимой контрольно-измерительной техники. Структурная схема автоматизированного рабочего места для исследования образцов СВЧ-фильтров и проверки их частотных характеристик представлена на рис. 1.

АРМ обеспечивает измерение:

- амплитудно-частотной характеристики фильтра;

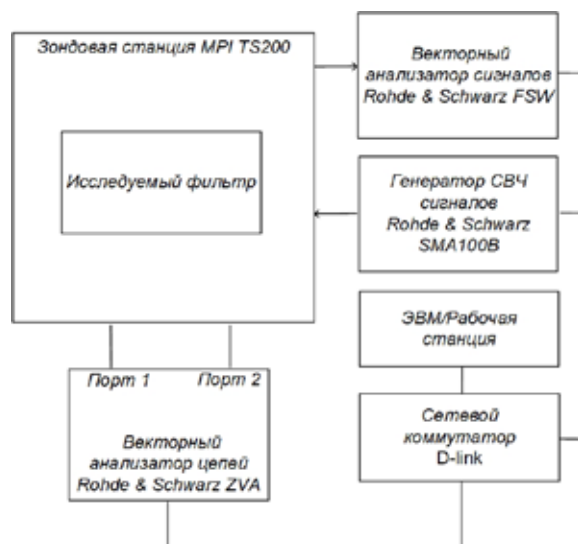


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного рабочего места

Fig. 1. Structural diagram of the automated workplace

- фазочастотной характеристики (ФЧХ);
- разности группового времени запаздывания;
- уровня затухания сигнала в полосах заграждения в пределах реализуемого динамического диапазона.

АРМ имеет следующие технические характеристики:

- диапазон рабочих частот от 10 МГц до 24 ГГц;
- динамический диапазон, не хуже –120 дБ;
- выходная мощность не менее –10 дБм;
- минимальный уровень шумов, не хуже –114 дБм.

Состав и конфигурация автоматизированного рабочего места выбраны исходя из следующих доводов.

В современных измерительных приборах применяются различные методы измерения частотных характеристик СВЧ-фильтров. В настоящее время для таких исследований применяются в основном векторные анализаторы цепей (ВАЦ). Причем в бюджетных моделях анализаторов цепей используют метод с применением генератора качающейся частоты (ГКЧ), в более дорогих – наборы гармонических сигналов или широкополосные сигналы [3].

В АРМ используется векторный анализатор цепей фирмы Rohde & Schwarz ZVA. Он предназначен для измерения параметров матрицы рассеяния исследуемых устройств, в частности коэффициента прохождения и коэффициента отражения сигнала от исследуемого устройства. Он является ключевым устройством при изготовлении и испытании полосно-пропускающих фильтров. С его помощью измеряют параметры АЧХ-, ФЧХ- и ГВЗ-фильтров.

Составляющими функциональными элементами полосно-пропускающих СВЧ-фильтров являются микроволновые резонаторы. Они электромагнитно связаны как между собой, так и с

обоими портами фильтра (входом и выходом). Амплитудно-частотная характеристика фильтра в области полосы пропускания зависит только от резонансных частот и связей резонаторов. При этом максимумы прохождения мощности СВЧ, наблюдаемые на АЧХ в широкой полосе частот, в системе связанных резонаторов могут возникать только вблизи резонансных частот. Микроволновые резонаторы в отличие от колебательных контуров на сосредоточенных индуктивных и емкостных элементах имеют не одну резонансную частоту, а бесконечную последовательность резонансных частот. Поэтому полосно-пропускающие микроволновые фильтры наряду с рабочей (нижайшей) полосой пропускания всегда имеют паразитные (высшие) полосы пропускания. Говоря о повышении частотно-селективных характеристик фильтров, в первую очередь обращают внимание на увеличение ширины и глубины полосы заграждения, отделяющей рабочую полосу пропускания от паразитной полосы в высокочастотной полосе заграждения. Для исследования вышеизложенных параметров недостаточно использовать только ВАЦ, так как в основном измерения будут ограничены динамическим диапазоном приборов, особенно при измерении параметров в полосах заграждения. Поэтому необходимо использовать генератор СВЧ-сигналов с большим динамическим диапазоном, подавая сигналы на вход исследуемого фильтра в пределах полос заграждения и анализируя отклик на выходе с помощью анализатора сигналов (спектра).

Таким образом, анализатор сигналов Rohde & Schwarz FSW совместно с генератором СВЧ-сигналов Rohde & Schwarz SMA100B позволяет производить измерение параметров полос заграждения, прохождение сигналов через исследуемые устройства на частотах полосы заграждения. Связка анализатора сигналов и генератора дает возможность осуществлять измерения параметров гармонических сигналов, в случае их возникновения, при прохождении через устройство сигналов повышенной мощности, связанных с применением полупроводниковых материалов в качестве основания устройства.

Для подключения внешних приборов к разрабатываемым миниатюрным полосно-пропускающим фильтрам, выполненным без коаксиальных переходов, в составе АРМ должна быть зондовая станция. Для автоматизированного измерения параметров без физического переподключения приборов к исследуемому фильтру используется четырехпортовая зондовая станция MPI TS200.

### **Программное обеспечение для АРМ**

Для централизованного удаленного управления всеми измерительными приборами было разработано специальное программное обеспечение (ПО). Данное ПО функционирует на платформе среды National Instruments LabVIEW [4]. В основные функции программного обеспечения входит автоматизация исследования и определения основных параметров СВЧ-фильтров:

- амплитудно-частотной характеристики;
- фазочастотной характеристики;
- разности группового времени запаздывания;
- уровня затухания сигнала в полосах заграждения.

С помощью программного обеспечения осуществляется документирование результатов измерения параметров СВЧ-фильтров с сохранением данных на жесткий диск управляющего персонального компьютера.

Разработанное программное обеспечение использует методы дистанционного управления контрольно-измерительной аппаратурой с применением средств программной архитектуры National Instruments VISA (Virtual Instrument Software Architecture) [5]. ПО применяет данные средства для унифицированного тестирования, отладки и удаленного управления аппаратурой АРМ с использованием интерфейса LAN. ПО реализует интерфейс взаимодействия с аппаратурой АРМ в формате «Запрос-ответ»: управляющий персональный компьютер отправляет команду-запрос (измерение значений АЧХ, ФЧХ, ГВЗ, перевод в режим спектрального или временного анализа и т. д.) и ожидает ответа (отчет о состоянии или результаты измерений) от контрольно-измерительной аппаратуры. Возможно организовать обновление результатов измерений с некоторой периодичностью (режим реального времени в ПО не реализован).

Блок-схема алгоритма работы ПО представлена на рис. 2. Внешний вид интерфейса ПО показан на рис. 3.

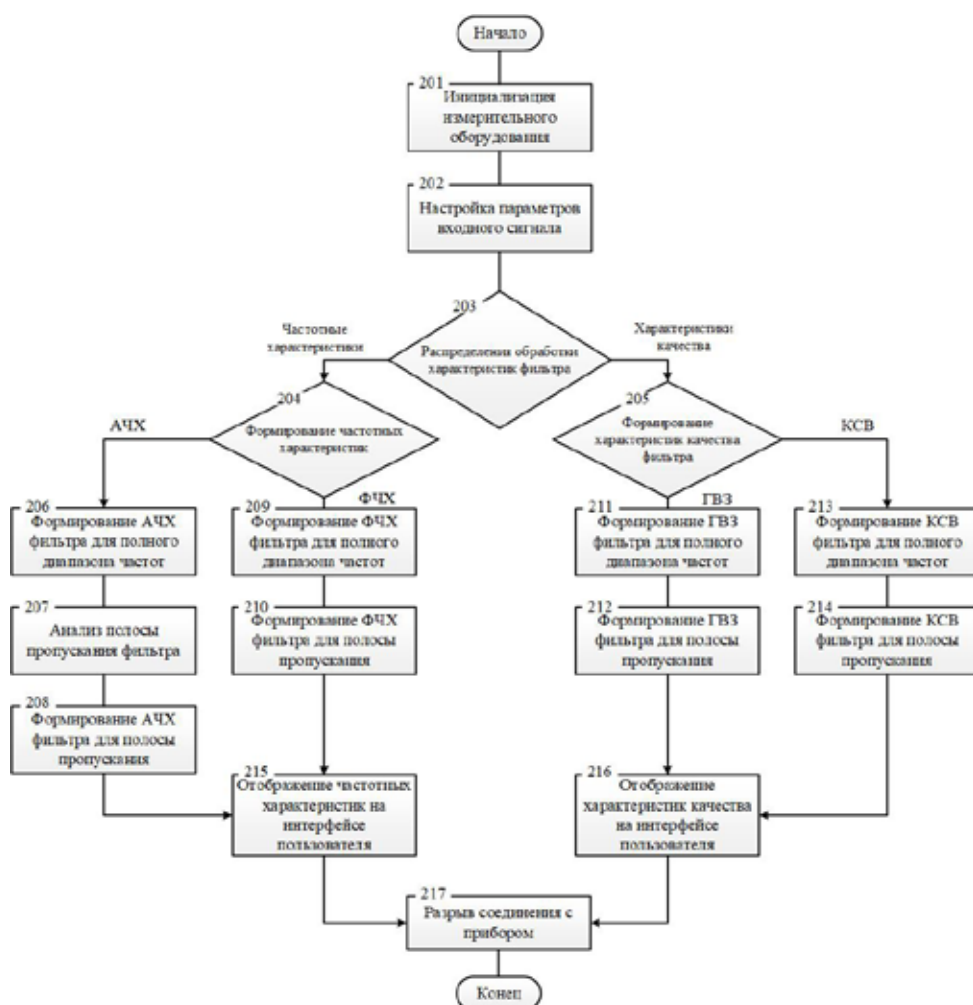


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы ПО

Fig. 2. The flowchart of the software operation

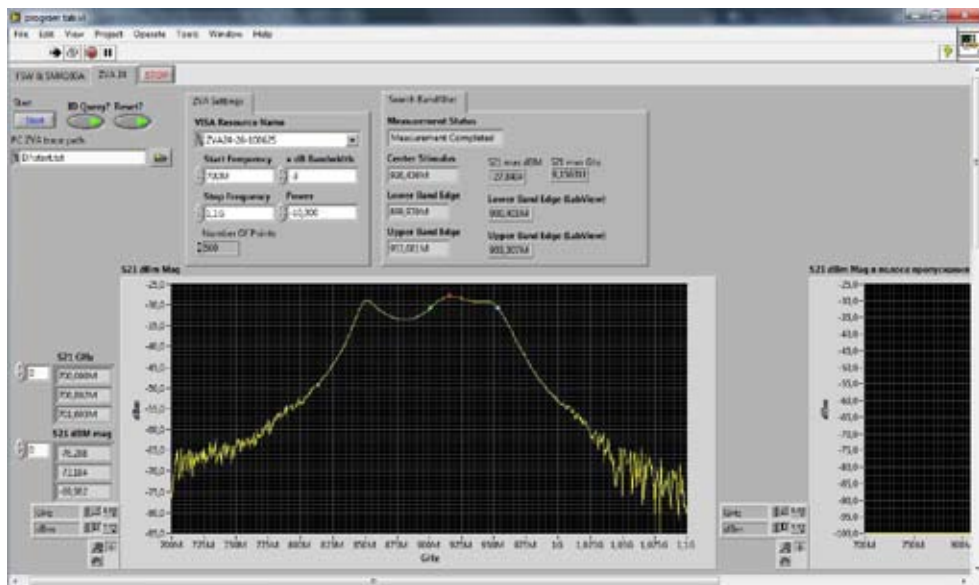


Рис. 3. Интерфейс ПО АРМ

Fig. 3. ARM software interface

Через интерфейс ПО имеется возможность установки начальных параметров измерительных приборов, настройки и управления ими. Измеренные характеристики фильтров графически отображаются в соответствующих окнах ПО (рис. 3).

Функциональные возможности АРМ при измерении характеристик фильтра для радиолокационной станции, изготовленного с применением полосковых резонаторов на подвешенной подложке [6], показаны на рис. 4.

### Выводы

Таким образом, представленное в работе АРМ позволяет не только проводить всесторонние исследования характеристик СВЧ-фильтров, но и автоматизировать этот процесс с помощью разработанного ПО. Функция документирования результатов измерения параметров СВЧ-фильтров дает возможность и в реальном времени, и после обработки осуществить анализ и сравнение характеристик СВЧ-фильтров в диапазоне частот от 10 МГц до 24 ГГц.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, договор № 03.G25.31.0279.*

### Список литературы

[1] Oh S., Lee H., Jung J-H., Lee G-Y. A Novel Wideband Miniaturized-Element Frequency Selective Surface. *International Journal of Microwave Science and Technology*, 2014, 857582.

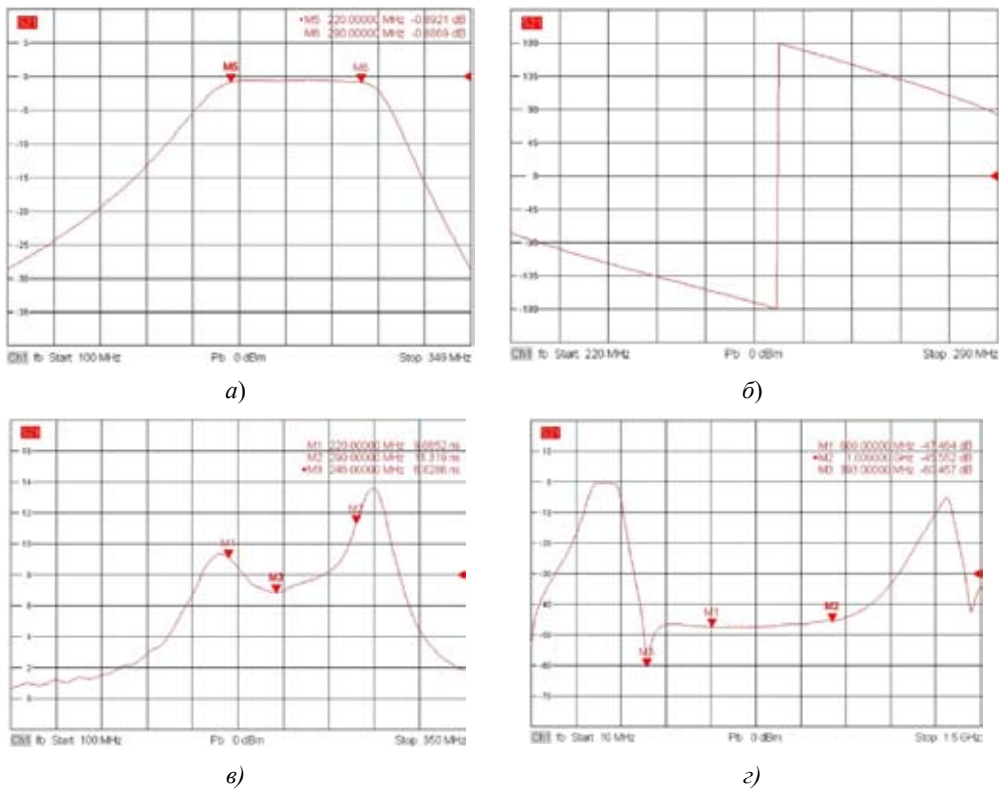


Рис. 4. Результаты измерений характеристик фильтров: а – АЧХ фильтра в полосе пропускания; б – ФЧХ фильтра в полосе пропускания; в – неравномерности ГВЗ в полосе пропускания; г – уровни затухания в полосах загораждения

Fig. 4. The results of measurements of filter characteristics: a – the frequency response of the filter in the passband; б – filter frequency response in the passband; в – non-uniformity of the group delay in the passband; г – attenuation level in boom bands

[2] Belyaev B.A., Tyurnev V.V. Design of bandpass filters composed of dielectric layers separated by gratings of strip conductors. *Optics Letters*, 2016, 41(3), 536-539.

[3] Roblin P. Nonlinear RF Circuits and Nonlinear Vector Network Analyzers: Interactive Measurement and Design Techniques. *Cambridge University Press*, 2011. 300.

[4] Официальный сайт компании National Instruments. Режим доступа: <http://www.ni.com> [Company official website National Instruments. Access: <http://www.ni.com> (in Russian)]

[5] Гладышев А.Б., Дмитриев Д.Д., Кремез Н.С., Гарин Е.Е. Имитатор сигналов для угломерных ГНСС-приемников на основе современных модульных радиоизмерительных приборов. *Решетневские чтения*, 2016, 1(20), 260-262 [Gladyshev A.B., Dmitriev D.D., Kremez N.S., Garin E.E. Simulator OF signals based ON modular instrumentation to test GNSS receivers, which measure the angular position of the object. *Reshetnev Readings*, 2016, 1(20), 260-262 (in Russian)]

[6] Belyaev B., Khodenkov S., Dmitriev D. Investigation of microstrip band-pass filters based on 2d electromagnetic crystal. *Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018*, 245-248.