

Проектирование фильтра из шпилечных резонаторов с металлизированными отверстиями с помощью программной системы

А.В. Лабынцев
В.В. Игнатьев
В.В. Васильев
Вит.А. Михайловский
Д.В. Харланов

Ссылка для цитирования

Лабынцев А.В., Игнатьев В.В., Васильев В.В., Михайловский Вит.А., Харланов Д.В. Проектирование фильтра из шпилечных резонаторов с металлизированными отверстиями с помощью программной системы // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 668–677. doi: 10.15827/0236-235X.142.668-677

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.09.2023

После доработки: 10.10.2023

Принята к публикации: 23.10.2023

Аннотация. В статье описывается программная система, представляющая собой прикладное программное обеспечение для проектирования микрополосковых полоснопропускающих фильтров. В ее основе лежит программное обеспечение Ansoft HFSS, предназначенное для трехмерного электромагнитного моделирования СВЧ-структур. Система состоит из двух основных взаимосвязанных компонентов – программы для решения задачи анализа фильтра и программы для решения задачи синтеза многополюсника, заменяющего фильтр в процессе его проектирования. В работе приведено описание структуры программной системы и взаимосвязи ее отдельных компонентов. Использование программной системы проиллюстрировано на примере проектирования фильтра, состоящего из трех противонаправленных шпилечных резонаторов с металлизированными отверстиями в середине сгиба шпильки. Введение в середину резонатора короткозамкнутого отверстия позволяет почти в два раза расширить верхнюю полосу заграждения фильтра за счет перехода от простого полуволнового резонатора к совокупности двух четвертьволновых резонаторов. Для проектирования фильтра с отверстиями использована программная система, основанная на переходе от фильтра к многополюснику, состоящему из связанных друг с другом резонаторов. В результате спроектирован фильтр, обладающий требуемыми электрическими характеристиками. Описанная в статье программная система для проектирования данного фильтра подтвердила свою состоятельность и эффективность. Практическая значимость работы заключается в более чем двукратном расширении верхней полосы заграждения фильтра с металлизированными отверстиями по сравнению с аналогичным фильтром из простых шпилечных резонаторов без отверстий.

Ключевые слова: проектирование, микрополосковый фильтр, шпилечный резонатор, металлизированное отверстие, программная система, алгоритм синтеза, характеристика затухания, полоса пропускания, полоса заграждения

Благодарности. Работа поддержана Южным федеральным университетом, проект № ВнГр/23-01-РТ

Введение. Проектирование микрополосковых фильтров (МПФ) невозможно без применения современных программных систем электродинамического моделирования СВЧ-устройств. Поэтому задача проектирования любого СВЧ-устройства лежит в области создания методик, алгоритмов и программных продуктов, которые являются фундаментом для построения конкретной программной системы.

Стремление обеспечить наилучшие электрические и массогабаритные характеристики МПФ нацеливает разработчиков на поиск новых эффективных топологических решений и методов проектирования микрополосковых устройств. Широко распространенные фильтры из полуволновых шпилечных резонаторов обладают слишком узкой верхней полосой заграждения, расширить которую почти в два раза позволяет введение металлизированного отверстия в точке сгиба шпильки. Такое преобразование приводит к необходимости поиска

новых подходов, пригодных для проектирования фильтра с отверстиями в резонаторах при любом заданном числе резонирующих элементов.

В данной работе эта задача решается путем создания программной системы, состоящей из двух основных взаимосвязанных компонентов:

– программы «Анализ» для решения задачи анализа фильтра;

– программы «Синтез» для решения задачи синтеза многополюсника, заменяющего фильтр в процессе его проектирования.

Переход от фильтра к многополюснику дает возможность представить фильтр как совокупность взаимосвязанных резонаторов, каждый из которых характеризуется собственной проводимостью и проводимостями связи с соседними резонаторами. Методика синтеза дает возможность сформулировать математические требования к указанным проводимостям в пределах основной полосы пропускания (ОПП).

Удовлетворение этих требований путем целенаправленного подбора геометрических размеров позволяет спроектировать многополюсник и в результате получить фильтр с требуемой шириной ОПП и с заданным положением этой полосы на частотной оси.

В данной работе приводятся основные положения методики синтеза, описаны компоненты разработанной программной системы и приведены результаты проектирования трехрезонаторного *полоснопропускного фильтра* (ППФ) из шпилечных резонаторов с металлизированными отверстиями в середине сгиба шпильки. Этот результат свидетельствует о научной новизне решаемой задачи и ее практической значимости.

Анализ современного состояния исследований по проблеме проектирования компактных МПФ

Разработке и исследованию МПФ посвящено немало научных работ. В [1–3] приведены результаты проектирования компактных МПФ на резонаторах типа шпилька и скрепка, которые обладают малым количеством резонаторов и довольно сложной топологией. Показано, как за счет существенного усложнения топологии фильтра удастся сформировать по несколько полюсов затухания справа и слева от ОПП и управлять положением этих полюсов. Такой подход позволяет добиться высокой прямоугольности характеристики затухания в окрестности ОПП [1], однако провалы между полюсами затухания могут достигать 25–35 дБ, что говорит о недостаточно высокой избирательности фильтра в широком диапазоне частот. Вследствие использования полуволновых резонаторов первая паразитная полоса пропускания формируется в окрестности удвоенной средней частоты ОПП.

Описания микрополосковых шпилечных ППФ, которые позволяют сформировать два полюса затухания в непосредственной близости от ОПП и тем самым повысить прямоугольность АЧХ-фильтра, даны в источниках [4, 5]. Однако данное решение имеет недостаток – узкая полоса заграждения, обусловленная присутствием паразитной полосы пропускания в окрестности удвоенной средней частоты ОПП.

Металлизированные отверстия традиционно применяются для заземления одного из концов резонаторов, используемых в фильтрах на четвертьволновых резонаторах – фильтрах гребенчатого или встречностержневого типа. Од-

нако о специальном применении таких отверстий для преобразования полуволнового резонатора в совокупность двух четвертьволновых в литературе упоминается довольно редко. Можно привести лишь несколько сравнительно устаревших, но единственно актуальных для данной работы статей, например [6–8], в которых предлагаются решения, использующие металлизированные отверстия в центре полуволнового резонатора. В этих работах показано, что введение металлизированных отверстий в резонатор в той или иной степени позволяет улучшить электрические характеристики фильтра, но методика проектирования фильтров в явном виде в них не описана. В данной работе предлагается алгоритм проектирования фильтра из шпилечных резонаторов с отверстиями.

Методика решения задачи проектирования фильтра

С точки зрения методики проектирования фильтров данная статья является логическим продолжением работ [9–11], в которых представлены результаты синтеза в HFSS фильтров сравнительно сложной структуры и различной топологии.

Процесс проектирования устройства в HFSS базируется на решении двух главных задач – синтеза и анализа устройства. Программа HFSS позволяет решить только задачу анализа устройства, а именно, найти электрические характеристики устройства для определенной конструкции со всеми заданными геометрическими размерами его конструктивных элементов.

Напротив, в ходе проектирования фильтра необходимо решить обратную задачу – задачу синтеза устройства, а именно, осуществить поиск геометрических размеров всех элементов конструкции по известным электрическим характеристикам объекта. Правильность полученного конструктивного решения подтверждается выполнением задачи анализа спроектированного макетного образца, который должен обладать электрическими характеристиками, удовлетворяющими техническому заданию.

Задача проектирования МПФ является многопараметрической и не имеет аналитического решения. Прямой подход к ее решению основан на расчете и оптимизации характеристики фильтра $|S_{21}(f)|$ путем подбора геометрических размеров. Данную характеристику можно считать лишь численными методами при всех

заданных размерах элементов фильтра в выбранной разработчиком программной среде электродинамического моделирования, например в HFSS [12]. Поскольку значения размеров в начале синтеза неизвестны, берутся приближительные. Далее выполняется анализ фильтра с этими размерами, в результате которого становится ясно, что полученная характеристика $|S_{21}(f)|$ далеко не соответствует требованиям технического задания.

Изменение любого геометрического размера и повторный расчет характеристики, который, кстати, может занять от одного до нескольких часов машинного времени, приводят к такому же отрицательному результату. Поэтому прямой путь решения задачи синтеза, основанный на многократных расчетах и параметрической оптимизации $|S_{21}(f)|$ в процессе подбора геометрических размеров, как правило, не может привести к успешному результату проектирования.

В работах [9–11] предлагается иной подход к проектированию МПФ, основанный на переходе от фильтра к так называемому $2n$ -полюснику, где n – число резонансных элементов фильтра. Для реализации такого перехода были разработаны два программных продукта, которые получили названия «Анализ» и «Синтез» и являются основными компонентами программной системы для проектирования фильтра. В данной работе программная система применена для проектирования фильтра из трех противонаправленных шпилек с металлизированными отверстиями в середине сгиба шпильки. Топология фильтра с обозначениями задаваемых и искомым геометрических размеров представлена на рисунке 1.

Для упрощения задачи предполагается, что фильтр обладает осевой геометрической симметрией и сопротивление нагрузок на его входе и выходе одинаковое. К искомым размерам конструкции относятся длины l_1 , l_2 и l_3 резонансных элементов, зазоры s_1 , s_2 и s_3 между резонансными элементами, точки подключения lt подводящих линий, соединяющих вход и выход фильтра с крайними резонансными элементами. Ширина подводящей линии wl выбирается из условия равенства ее волнового сопротивления сопротивлениям нагрузок. Ширина резонансных элементов w_1 , w_2 и w_3 и ширина перемычки шпильки w задаются произвольно, но в ходе синтеза могут изменяться для более точного решения задачи.

Схематическое изображение фильтра и соответствующего ему $2n$ -полюсника приведено

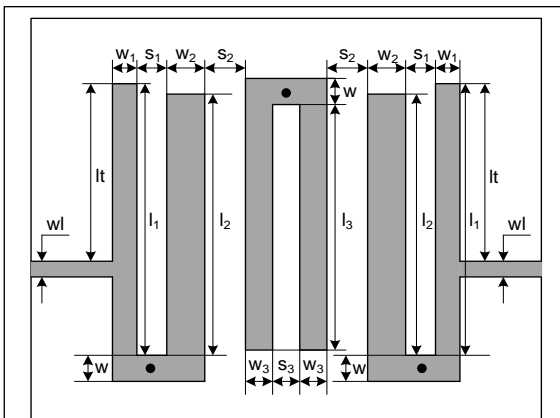


Рис. 1. Топология фильтра с обозначениями геометрических размеров

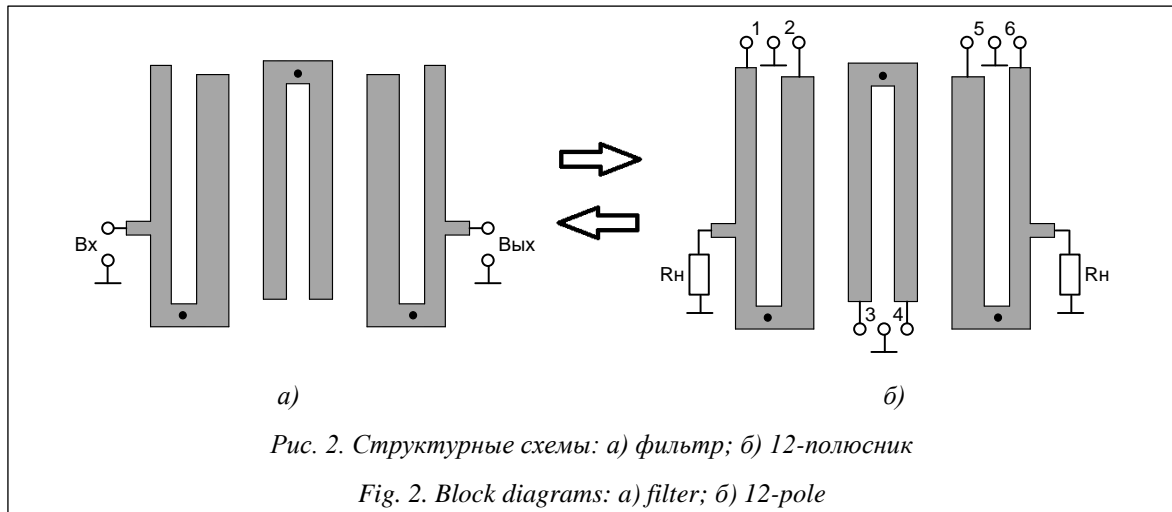
Fig. 1. Filter topology with geometric dimensions

на рисунке 2. В данном случае $2n$ -полюсник содержит $n = 6$ резонансных элементов, поэтому является 12 -полюсником.

Как видно на рисунке 2, для перехода от фильтра к 12 -полюснику необходимо выполнить всего два действия. Во-первых, в точках входа и выхода устройства надо разместить сосредоточенные резисторы с сопротивлением, равным входному сопротивлению на внешних зажимах фильтра. Во-вторых, в середине разомкнутых концов каждого резонансного элемента надо создать новый виртуальный полюс, который будет являться зажимом для определения новых электрических характеристик резонансных элементов фильтра. Такими характеристиками являются собственные проводимости резонансных элементов $\dot{Y}_{ii}(f)$ и проводимости связи $\dot{Y}_{ij}(f)$ между резонансными элементами.

Таким образом, в результате перехода от фильтра к $2n$ -полюснику фактически осуществляется переход от одной характеристики фильтра $|S_{21}(f)|$ к совокупности большого числа характеристик $2n$ -полюсника. Ими являются проводимости $\dot{Y}_{ij}(f)$, каждая из которых представляет собой комплексную функцию частоты, характеризующую свойства отдельного резонансного элемента во взаимосвязи с другими элементами $2n$ -полюсника. Матрица проводимостей 12 -полюсника на рисунке 2б имеет вид

$$[\dot{Y}]_6 = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{61} & \cdots & \dot{Y}_{66} \end{bmatrix}.$$



Требования к проводимостям 12-полосника формулируются в пределах ОПП и представляют собой совокупность условий резонанса и условий согласования. Исследования показали, что эти условия для 2n-полосника на рисунке 2б выглядят следующим образом:

– условия резонанса

$$\frac{\text{Im} \dot{Y}_{i,i}(f) \cdot \rho_i}{\text{Im} \dot{Y}_{i,i+1}(f) \cdot \gamma} \leq 1, f \in [f_n, f_e], i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

– условия согласования

$$\frac{\rho_1}{|\text{Im} \dot{Y}_{1,2}(f)|} = \frac{\rho_2}{|\text{Im} \dot{Y}_{2,3}(f)|} = \frac{1}{\text{Re} \dot{Y}_{1,1}(f) + \text{Re} \dot{Y}_{2,2}(f)}, f \in [f_n, f_e]. \quad (2)$$

В соотношениях (1) и (2) использованы обозначения: $\text{Im} \dot{Y}_{i,i}(f)$ – мнимая составляющая собственной проводимости i -го резонансного элемента; $\text{Im} \dot{Y}_{i,i+1}(f)$ – мнимая составляющая проводимости связи между i -м и $i+1$ -м элементами; $\text{Re} \dot{Y}_{i,i}(f)$ – реальная составляющая собственной проводимости i -го резонансного элемента; f_n – нижняя граничная частота ОПП; f_e – верхняя граничная частота ОПП; ρ_i, γ – вещественные константы, определяемые на основе параметров лестничного прототипа g_i по формулам:

$$\gamma = g_1, \rho_j = \frac{g_1}{\sqrt{g_j \cdot g_{j+1}}}, j = 1, 2, \dots, n-1. \quad (3)$$

Важно, что собственные проводимости отдельных резонансных элементов $\text{Im} \dot{Y}_{i,i}(f)$, фигурирующих в (1), зависят прежде всего от геометрических параметров именно того элемента, на зажиме которого они определяются. Другие элементы тоже оказывают определен-

ное влияние на эту характеристику, но оно существенно меньше. Это позволяет удовлетворить требования (1) к проводимостям 2n-полосника в пределах ОПП в ходе итерационного подбора значений геометрических размеров при сравнительно небольшом числе итераций.

Выполнить условие согласования (2) можно лишь в одной или двух точках в пределах полосы пропускания, поскольку практически во всех случаях функции $\frac{\rho_1}{|\text{Im} \dot{Y}_{1,2}(f)|}$, $\frac{\rho_2}{|\text{Im} \dot{Y}_{2,3}(f)|}$ и

$$\frac{1}{\text{Re} \dot{Y}_{1,1}(f) + \text{Re} \dot{Y}_{2,2}(f)}$$

ведут себя неодинаково. Основное влияние на значение последней функции оказывают геометрические параметры крайней шпильки, к которой подключаются внешние цепи.

Управлять значением первых двух функций можно величиной зазоров s_1 и s_2 , но надо учитывать, что значения $\text{Im} \dot{Y}_{1,2}(f)$ и $\text{Im} \dot{Y}_{2,3}(f)$ фигурируют и в условиях резонанса (1), влияя на наклон резонансной характеристики, а следовательно, на ширину полосы пропускания. Поэтому основным способом обеспечения согласования фильтра с внешними цепями является верный выбор значения $\frac{1}{\text{Re} \dot{Y}_{1,1}(f) + \text{Re} \dot{Y}_{2,2}(f)}$.

Важно отметить, что условие (1) так или иначе выполняется при любых геометрических размерах элементов фильтра. То есть резонансная характеристика $\frac{\text{Im} \dot{Y}_{i,i}(f) \cdot \rho_i}{\text{Im} \dot{Y}_{i,i+1}(f) \cdot \gamma}$, определенная

для каждого из резонансных элементов, всегда будет пересекать частотную ось на своей резонансной частоте и в окрестности этого нуля резонансной характеристики будет формировать-

ся *потенциальная полоса пропускания* (ППп) данного резонансного элемента, ширина которой будет удовлетворять соответствующее неравенство (1).

В ходе проектирования необходимо обеспечить максимальное совпадение всех ППп по всем резонансным элементам, причем границы этих полос должны совпадать с границами *заданной полосы пропускания* (ЗПП) или быть близкими к ним. Если выполнить и условия согласования (2) в пределах ППп, то полученная ППп перейдет в *фактическую полосу пропускания* (ФПП) фильтра, определяемую как диапазон частот, в пределах которого функция $20\lg|S_{21}(f)|$ принимает значения менее 3 дБ. Этот факт обязательно требует подтверждения в итоге проектирования, которое осуществляется путем перехода от $2n$ -полосника к фильтру и расчетом его характеристик.

Компоненты программной системы и алгоритм проектирования

Описанный алгоритм проектирования был реализован в виде программной системы, структурная схема которой представлена на рисунке 3. Далее описываются структура этой системы и алгоритм ее использования для достижения поставленной цели.

В программной среде HFSS [12] разрабатывается программа «Синтез», содержащая макет многополосника. В этой программе задаются первоначальные значения геометрических параметров устройства и определяется диапазон частот, в котором будет производиться синтез многополосника. Проектирование фильтра начинается с расчета характеристик многополосника, фигурирующих в выражениях (1) и (2), в пределах ЗПП и ее окрестности.

По результатам анализа определяются положение ППп по факту удовлетворения соотношения (1), а также степень выполнения условий согласования (2) в этой ППп. Выявленные различия между параметрами ППп и ЗПП позволяют скорректировать размеры элементов многополосника, причем важно, что корректировка производится с помощью аргументированных численных расчетов, а не «слепым» перебором. Это, в свою очередь, существенно уменьшает число итераций по подбору требуемых геометрических размеров и сокращает общее время проектирования.

Расчет характеристик многополосника и корректировка его размеров повторяются до тех пор, пока разработчик не будет удовлетво-

рен степенью выполнения требований (1) и (2) и соответствия ППп и ЗПП. На этом первый этап синтеза устройства заканчивается.

На следующем этапе из макета многополосника в программе «Синтез» создается макет фильтра в программе «Анализ» при неизменных значениях всех размеров элементов устройства. Выполняется расчет характеристик фильтра, основной из которых является элемент матрицы рассеяния $S_{21}(f)$, представленный в логарифмическом виде $20\lg|S_{21}(f)|$. В результате расчета определяются границы ФПП по уровню -3 дБ и устанавливается степень соответствия между ФПП, ППп и ЗПП. В большинстве случаев это соответствие удовлетворяет разработчика, а некоторое расхождение между ФПП и ЗПП при необходимости можно ликвидировать незначительной корректировкой длин резонаторов в самом фильтре.

Анализ полученных результатов

Перейдем к синтезу фильтра, топология которого представлена на рисунке 1. Прежде всего для заданного уровня пульсаций 3 дБ максимально плоской аппроксимации и числа резонансных элементов $n = 6$ определяются параметры g_i и выполняется расчет параметров цепочечного прототипа ρ_i , γ по формулам (3): $g_1 = g_6 = 0,5176$, $g_2 = g_5 = 1,414$, $g_3 = g_4 = 1,932$, $\gamma = 0,5176$, $\rho_1 = \rho_5 = 0,605$, $\rho_2 = \rho_4 = 0,313$, $\rho_3 = 0,268$.

Для определенности на первом этапе проектирования будем считать, что нижняя и верхняя границы ЗПП по техническому заданию равны: $f_n = 1,05$ ГГц и $f_v = 1,35$ ГГц.

В среде HFSS в программе «Синтез» создается макет 12-полосника на диэлектрической подложке Arlon AD 1000 толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2. После нескольких итераций по подбору геометрических размеров 12-полосника путем удовлетворения соотношений (1) и (2) согласно структурной схеме и алгоритму, представленным на рисунке 3, получены результаты, приведенные ниже.

На рисунке 4 изображена модель спроектированного 12-полосника в HFSS и приведена таблица его геометрических размеров в соответствии с обозначениями, представленными на рисунке 1.

На рисунке 5 представлены итоговые характеристики 12-полосника, подтверждающие выполнение условий резонанса (1) и условий согласования (2). В отличие от первого и тре-

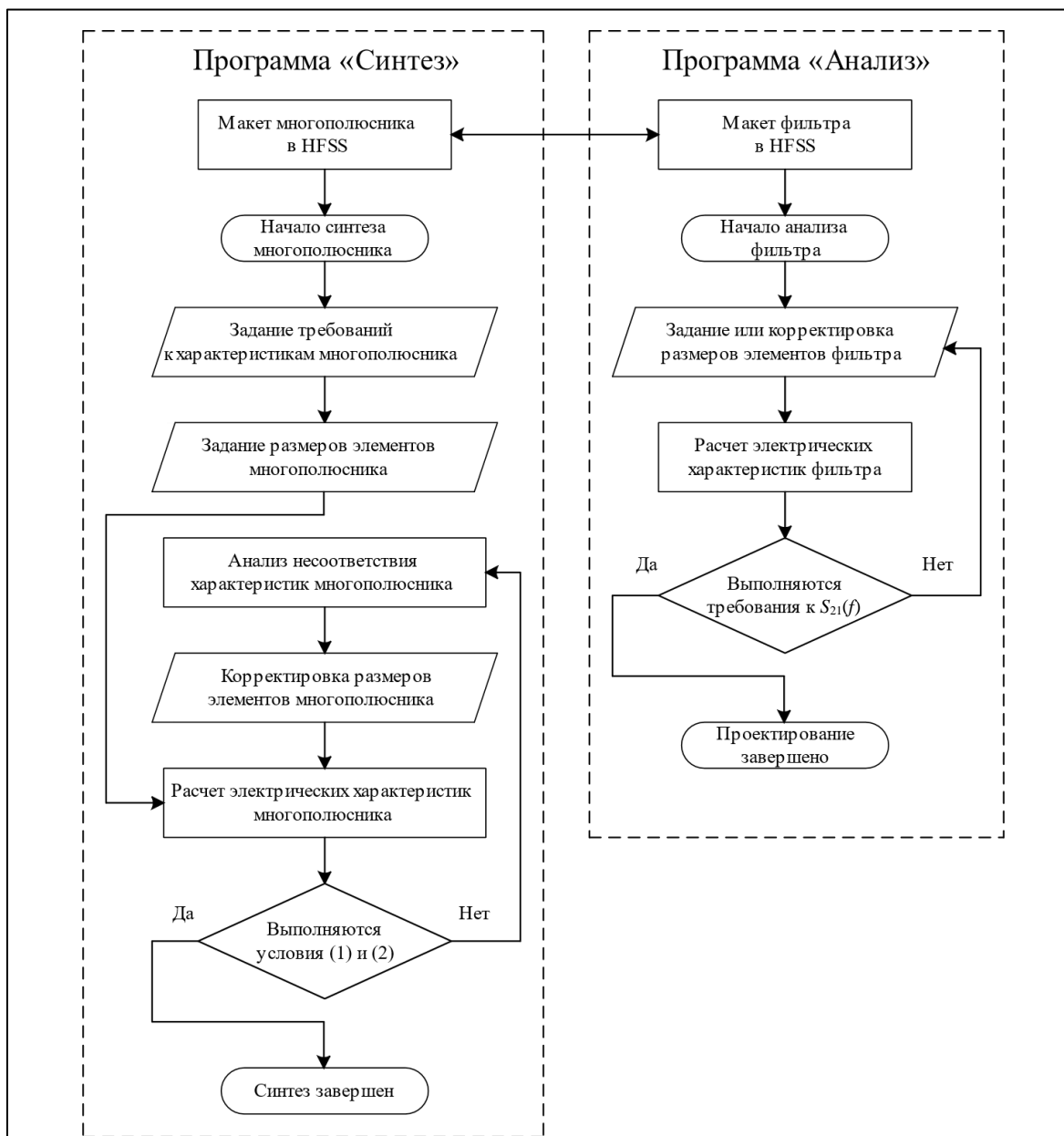


Рис. 3. Структурная схема программной системы проектирования фильтра

Fig. 3. Block diagram of a filter design software system

твого резонансных элементов, для которых условия резонанса (1) выполняются с достаточной точностью и границы ППП соответствуют границам ЗПП, резонансная характеристика второго резонансного элемента имеет слишком большую крутизну, хотя и проходит через ноль в середине ЗПП. Данное обстоятельство сужает ППП по второму резонансному элементу, объясняется это тем, что выбор зазора s_2 осуществлялся, исходя из обеспечения условия согласования (2), которое выполняется в середине ЗПП в окрестности частоты 1,2 ГГц.

По характеристикам фильтра $20\lg|S_{21}(f)|$ и $20\lg|S_{11}(f)|$, полученным после перехода к фильтру от 12-полюсника, представленного на рисунке 26, построен график (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/14.jpg>).

Анализ этих характеристик показывает их хорошее соответствие характеристикам 12-полюсника, что подтверждает применимость и эффективность использованной для проектирования методики синтеза. ППП всех резонансных элементов не удалось выровнять в связи с тем, что ППП первого и третьего резонансных

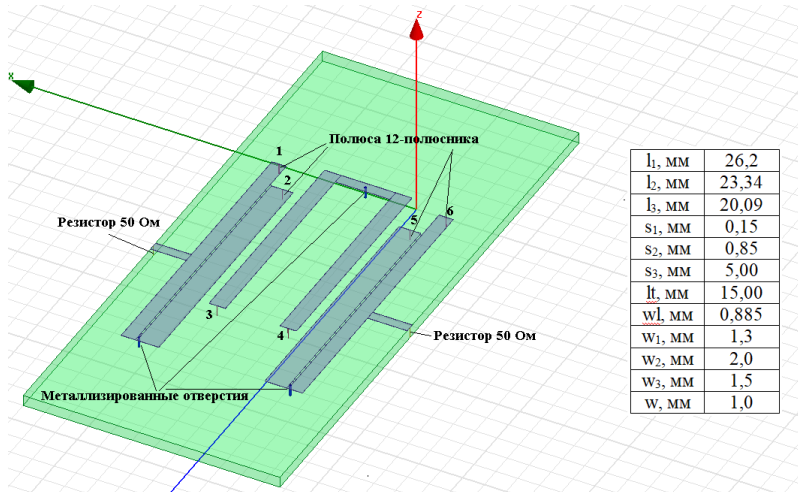


Рис. 4. Модель спроектированного 12-полосника в HFSS и таблица геометрических размеров

Fig. 4. 12-pole in HFSS model and a table of geometric dimensions

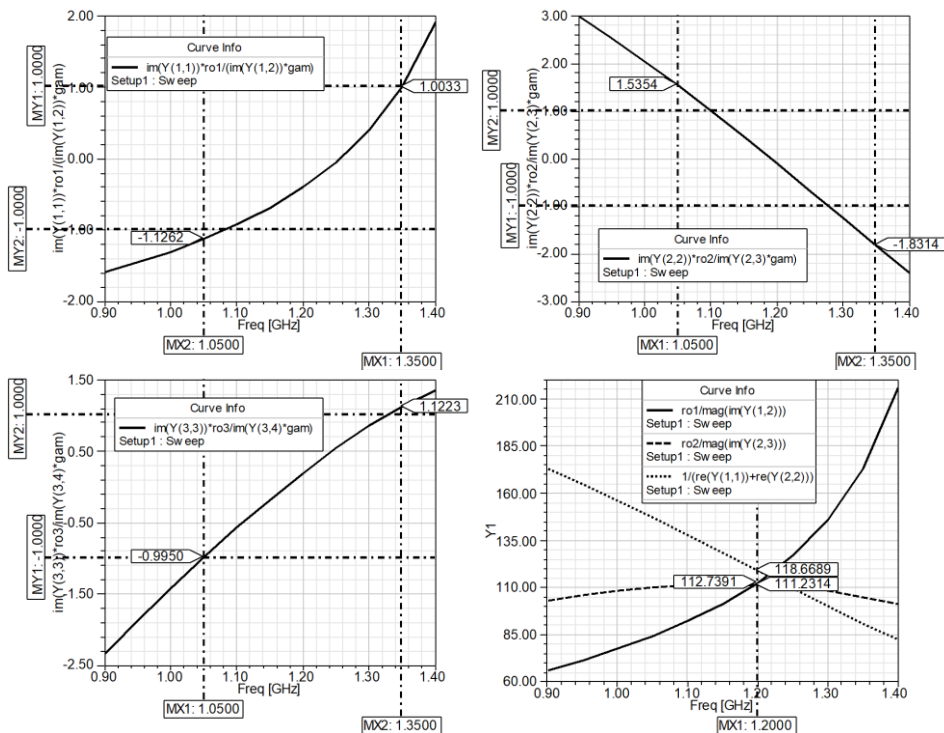


Рис. 5. Итоговые характеристики 12-полосника

Fig. 5. 12-pole final characteristics

элементов соответствуют границам ЗПП, а ППП второго резонансного элемента расположилась в диапазоне от 1,1 до 1,28 ГГц. ФПП фильтра занимает диапазон от 1,075 ГГц до 1,255 ГГц, ширина ФПП 180 МГц, что соответствует ширине ППП второго резонансного элемента, но уже, чем ЗПП.

Характеристики спроектированного фильтра в широком диапазоне частот ([http://www.](http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/15.jpg)

[swsys.ru/uploaded/image/2023-4/15.jpg](http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-4/15.jpg)) показывают, что полоса заграждения по уровню -30 дБ расположена от 1,35 до 2,65 ГГц и составляет 1,3 ГГц.

Для подтверждения эффекта от введения в шпильки металлизированных отверстий на рисунке 6 приведены результаты расчета характеристик фильтра без металлизированных отверстий.

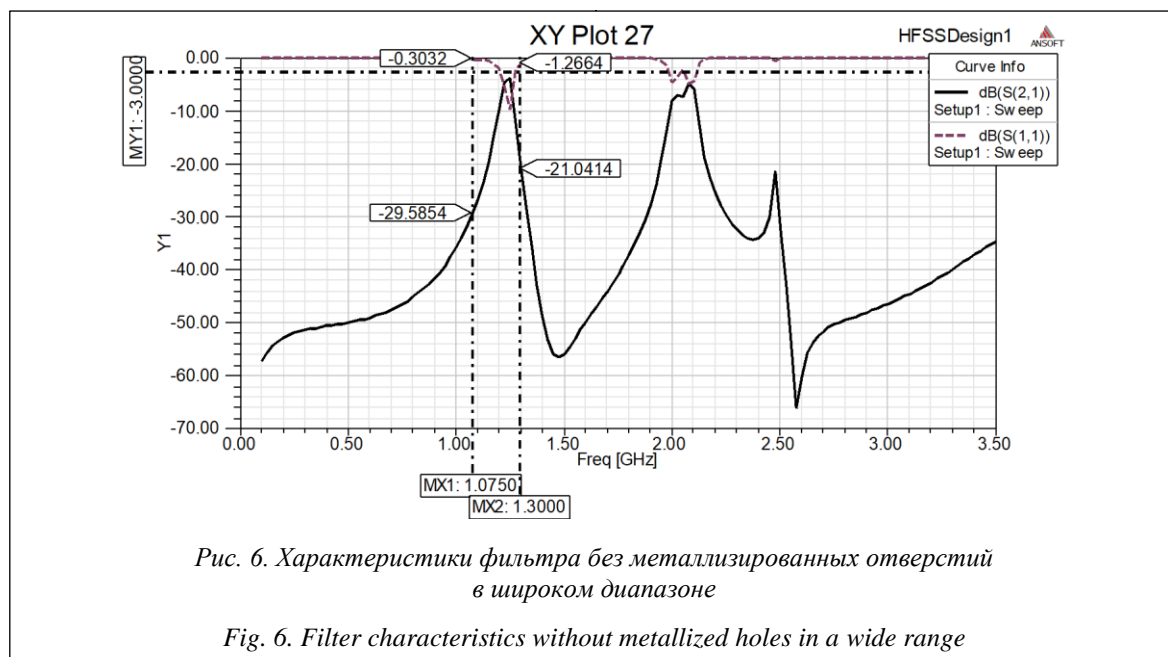


Рис. 6. Характеристики фильтра без металлизированных отверстий в широком диапазоне

Fig. 6. Filter characteristics without metallized holes in a wide range

Данный фильтр был получен из фильтра с итоговыми характеристиками в широком диапазоне простым удалением металлизированных отверстий. Фильтр без отверстий в шпильках не подвергался синтезу, поэтому его характеристики в ОПП не являются оптимальными. Это и не требовалось, поскольку основная задача исследования на данном этапе заключалась только в оценке ширины полосы заграждения фильтра. Первая паразитная полоса фильтра без отверстий расположена в окрестности удвоенной средней частоты ОПП. По уровню -30 дБ полоса заграждения фильтра без отверстий занимает диапазон от 1,35 до 1,9 ГГц, то есть ее ширина составляет 0,55 ГГц. Отношение ширины полосы заграждения фильтра с отверстиями к полосе фильтра без отверстий составляет $1,3/0,55 = 2,36$. Таким образом, введение отверстий в шпильчатые резонаторы поз-

волило более чем в два раза расширить полосу заграждения устройства.

Заключение

Результаты данной работы иллюстрируют использование разработанной программной системы для проектирования фильтров из шпильчатых резонаторов с металлизированными отверстиями на сгибе шпилек. Введение отверстий в резонаторы позволило расширить верхнюю полосу заграждения фильтра более чем в два раза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование представленной методики синтеза и реализующей ее программной системы для проектирования аналогичных фильтров, состоящих из большего числа резонаторов, приведет к повышению затухания в полосе заграждения фильтра при сохранении прочих положительных результатов проектирования.

Список литературы

1. Аристархов Г.М., Кириллов И.Н. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной частотной избирательностью на основе полуволновых резонаторов // СИНХРОНИНФО. 2020. Т. 11. № 2. С. 40–44. doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166122.
2. Аристархов Г.М., Кириллов И.Н., Корчагин А.И., Кувшинов В.В. Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на свернутых сонаправленных шпильчатых резонаторах // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 4. С. 126–137. doi: 10.18127/j00338486-202104-14.
3. Aristarkhov G.M., Arinin O.V., Kirillov I.N., Markovskiy A.V., Doronina A.D. Multi-band bandpass microstrip filters based on two codirectional hairpin resonators. Proc. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091997.
4. Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков Ан.А., Грушевский Е.О. Высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на резонаторах с двухсторонним рисунком полосковых проводников на подвешенной подложке // Письма в журнал технич. физики. 2019. Т. 45. № 10. С. 13–16. doi: 10.21883/PJTF.2019.10.47749.17703.
5. Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Govorun I.V., Afonin A.O., Ugryumov A.V., Leksikov An.A. A method of stop-band widening in BPF based on two-conductor suspended-substrate resonators. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2018, vol. 72, pp. 11–16. doi: 10.2528/pier117102302.

6. Xiao F., Norgren M., He S. Compact third-order microstrip bandpass filter using hybrid resonators. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2011, vol. 19, pp. 93–106. doi: 10.2528/PIERC10092706.
7. Girbau D., Lázaro A., Pérez A., Pradell L. Dual-band bandpass filter based on a hole resonator. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, vol. 51, no. 7, pp. 1649–1652. doi: 10.1002/mop.24410.
8. Lin W.-J., Li J.-Y., Houng M.-P. Miniaturized wideband ring-type bandpass filters with upper stopband characteristic. *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 2010, vol. 24, no. 7, pp. 931–939. doi: 10.1163/156939310791285191.
9. Obukhovets V.A., Labyntsev A.V., Kharlanov D.V., Ponomarev N.E., Sarzhanov A.N. Example of filter synthesis on two anti-directional stud resonators with one metallized hole in each resonator. *Proc. RSEMW*, 2023, pp. 160–163. doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202019.
10. Labyntsev A.V., Ponomarev N.E., Kharlanov D.V., Sarzhanov A.N., Maksimov M.N. Design of a small-sized filter on quarter-wave hairpin resonators. *Proc. RSEMW*, 2023, pp. 164–167. doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202118.
11. Лабынцев А.В., Харланов Д.В., Пономарёв Н.Е., Саржанов А.Н. Полосовой микрополосковый фильтр из двух трехсекционных резонаторов // *Антенны*. 2022. № 6. С. 69–78. doi: 10.18127/j03209601-202206-06.
12. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО «НПП „Родник“», 2009. 256 с.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.668-677

2023, vol. 36, no. 4, pp. 668–677

Designing a filter from metallized-hole hairpin resonators using a software system

Alexey V. Labyntsev
Vladimir V. Ignatyev
Vasily V. Vasilyev
Vitaly A. Mikhaylovsky
Dmitry V. Kharlanov

For citation

Labyntsev, A.V., Ignatyev, V.V., Vasilyev, V.V., Mikhaylovsky, Vit.A., Kharlanov, D.V. (2023) ‘Designing a filter from metallized-hole hairpin resonators using a software system’, *Software & Systems*, 36(4), pp. 668–677 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.668-677

Article info

Received: 19.09.2023

After revision: 10.10.2023

Accepted: 23.10.2023

Abstract. The paper describes a software system that is an application software for designing microstrip bandpass filters. The developed system is based on Ansoft HFSS software designed for three-dimensional electromagnetic modeling of microwave structures. The system consists of two main interrelated components, namely: a program for solving a filter analysis problem and a program for solving a multi-pole synthesis problem when a multi-pole replaces a filter during its design. The paper describes the software system structure and the relationship of its individual components; presents an algorithm of using the system. The software system use is illustrated by the example of designing a filter that consists of three counter-directional hairpin resonators with metallized holes in the middle of a hairpin bend. A short-circuited hole in the middle of a resonator expands a filter barrier upper band almost twice due to a transition from a simple half-wave resonator to a combination of two quarter-wave resonators. A filter with holes is designed using a software system based on a transition from a filter to a multi-pole consisting of resonators connected to each other. The result is a designed filter that has the required electrical characteristics. The software system described in the paper for designing this filter has confirmed its viability and effectiveness. The practical significance of the work is in the more than twofold expansion of a filter barrier upper band with metallized holes compared with a similar filter made of simple hairpin resonators without holes.

Keywords: design, microstrip filter, hairpin resonator, metallized hole, software system, synthesis algorithm, attenuation characteristic, bandwidth, barrier band

Acknowledgements. The paper was supported by the Southern Federal University, project no. VnGr/23-01-RT “Research of software-defined radio systems”

References

- 1 Aristarkhov, G.M., Kirillov, I.N. (2020) ‘Compact microwave half-wave resonator filters with increased frequency selectivity’, *SYNCHROINFO*, 11(2), pp. 40–44 (in Russ.). doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166122.
- 2 Aristarkhov, G.M., Kirillov, I.N., Korchagin, A.I., Kuvshinov, V.V. (2021) ‘Compact highly selective microstrip filters on folded co-directional hairpin resonators’, *Radioengineering*, 85(4), pp. 126–137 (in Russ.). doi: 10.18127/j00338486-202104-14.
- 3 Aristarkhov, G.M., Arinin, O.V., Kirillov, I.N., Markovskiy, A.V., Doronina, A.D. (2023) ‘Multi-band bandpass microstrip filters based on two codirectional stud resonators’, *Proc. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091997.
- 4 Belyaev, B.A., Serzhantov, A.M., Bal’va, Ya.F., Leksikov, An.A., Grushevskiy, E.O. (2019) ‘Highly selective band-pass filter on resonators with a two-sided pattern of strip conductors on a suspended substrate’, *Tech. Phys. Letters*, 45(10), pp. 13–16 (in Russ.). doi: 10.1134/S1063785019050225.
- 5 Leksikov, A.A., Serzhantov, A.M., Govorun, I.V., Afonin, A.O., Ugryumov, A.V., Leksikov, An.A. (2018) ‘A method of stopband widening in BPF based on two-conductor suspended-substrate resonators’, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 72, pp. 11–16. doi: 10.2528/pierl17102302.
- 6 Xiao, F., Norgren, M., He, S. (2011) ‘Compact third-order microstrip bandpass filter using hybrid resonators’, *Progress in Electromagnetics Research C*, 19, pp. 93–106. doi: 10.2528/PIERC10092706.
- 7 Girbau, D., Lázaro, A., Pérez, A., Pradell, L. (2009) ‘Dual-band bandpass filter based on a hole resonator’, *Micro-wave and Optical Technology Letters*, 51(7), pp. 1649–1652. doi: 10.1002/mop.24410.
- 8 Lin, W.-J., Li, J.-Y., Houn, M.-P. (2010) ‘Miniaturized wideband ring-type bandpass filters with upper stopband characteristic’ *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 24(7), pp. 931–939. doi: 10.1163/156939310791285191.
- 9 Obukhovets, V.A., Labyntsev, A.V., Kharlanov, D.V., Ponomarev, N.E., Sarzhanov, A.N. (2023) ‘Example of filter synthesis on two anti-directional stud resonators with one metalized hole in each resonator’, *Proc. RSEMW*, pp. 160–163. doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202019.
- 10 Labyntsev, A.V., Ponomarev, N.E., Kharlanov, D.V., Sarzhanov, A.N., Maksimov, M.N. (2023) ‘Design of a small-sized filter on quarter-wave hairpin resonators’, *Proc. RSEMW*, pp. 164–167. doi: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202118.
- 11 Labyntsev, A.V., Kharlanov, D.V., Ponomarev, N.E., Sarzhanov, A.N. (2022) ‘Bandpass microstrip filter from two three-section resonators’, *Antennas*, (6), pp. 69–78 (in Russ.). doi: 10.18127/j03209601-202206-06.
- 12 Bankov, S.E., Kurushin, A.A. (2009) *Calculation of Antennas and Microwave Structures Using HFSS Ansoft*. Moscow, 256 p. (in Russ.).

Авторы

Лабынцев Алексей Викторович¹, к.т.н.,
доцент, старший научный сотрудник,
labyntsev@yandex.ru

Игнатьев Владимир Владимирович¹, к.т.н.,
ведущий научный сотрудник, vvignatev@sfnu.ru

Васильев Василий Васильевич¹,
младший научный сотрудник, vasily@sunsdr.com

Михайловский Виталий Алексеевич¹,
младший научный сотрудник, vityal@sunsdr.com

Харланов Дмитрий Валентинович¹, соискатель,
mitya999@mail.ru

¹ Южный федеральный университет,
г. Таганрог, 347900, Россия

Authors

Alexey V. Labyntsev¹, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Senior Researcher,
labyntsev@yandex.ru

Vladimir V. Ignatyev¹, Cand. of Sci. (Engineering),
Leading Researcher, vvignatev@sfnu.ru

Vasily V. Vasilyev¹, Junior Researcher,
vasily@sunsdr.com

Vitaly A. Mikhaylovsky¹,
Junior Researcher, vityal@sunsdr.com

Dmitry V. Kharlanov¹, Candidate,
mitya999@mail.ru

¹ Southern Federal University,
Taganrog, 347900, Russian Federation