КОМПАКТНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ФИЛЬТР ГАРМОНИК

С.Н. Власенко, В.В. Задорожный, М.М. Мусаев

*Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Представлен метод построения топологии компактных микрополосковых фильтров низких частот с широкой полосой заграждения для фильтрации гармоник выходного сигнала твердотельного усилителя мощности. Метод основан на добавлении к шлейфовому фильтру согласующих структур в виде шпильковых резонаторов со свернутыми полосками в непериодический меандр и треугольных петлевых элементов, обеспечивающих увеличение крутизны спада АЧХ и величину подавления третьей гармоники при минимальных размерах.

Ключевые слова: микрополосковый фильтр, фильтр гармоник, шпилечный резонатор.

COMPACT MICROSTRIP HARMONIC FILTER

S.N. Vlasenko, V.V. Zdorozhny, M.M. Musaev

*Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications,
Rostov-on-Don, Russian Federation*

A method for constructing the topology of compact microstrip low-pass filters with a wide obstacle band for filtering the harmonics of the output signal of a solid-state power amplifier is presented. The method is based on the addition of matching structures to the loop filter in the form of hairpin resonators with rolled strips in a non-periodic meander and triangular loop elements, which provide an increase in the slope of the amplitude-frequency response characteristic and the amount of suppression of the third harmonic at minimum dimensions.

Keywords: microstrip filter, harmonic filter, hairpin resonator.

В цифровых антенных решетках (ЦАР) к каждому излучателю подключен приемопередающий канал со встроенным твердотельным усилителем мощности (УМ). С повышением рабочей частоты шаг расположения излучателей уменьшается, что обуславливает снижение габаритных размеров приемопередающих каналов и сокращение места для размещения УМ.

Для обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических устройств различного назначения необходимо подавление внеполосных сигналов ЦАР, поэтому на выходе твердотельных УМ устанавливаются фильтры подавления гармоник выходного сигнала. Для построения фильтров гармоник часто используют ступенчатые и шлейфовые микрополосковые полоснозаграждающие фильтры, обычно для этих целей используют фильтр нижних частот (ФНЧ) [1; 2]. Применение микрополосковых фильтров обеспечивает реализацию компактных размеров, а использование печатных технологий для производства обеспечивает повторяемость характеристик.

Недостатком ступенчатых и шлейфовых фильтров является малое подавление в полосе заграждения при ограниченных размерах фильтра. С повышением рабочих частот вопросы проектирования выходных фильтров с компактными габаритными размерами при сохранении требований к величине подавления гармоник являются актуальными.

Цель работы – построение топологии компактного микрополоскового фильтра гармоник с широкой полосой заграждения.

Решаемые задачи:

1. Разработка метода построения топологии и численное моделирование характеристик двух микрополосковых ФНЧ с минимальными габаритными размерами, отличающимися частотными диапазонами.

2. Изготовление макетов, разработанных ФНЧ, и экспериментальная проверка их параметров.

Разрабатываемые ФНЧ предназначены для подавления третьей гармоники выходного сигнала твердотельного УМ не менее чем на 36 дБ в полосах $0,26\lambda_{01}$ и $0,26\lambda_{02}$ соответственно для первого и второго фильтра, где λ_{01} , λ_{02} – длины волн центральной частоты f_{01} и f_{02} рабочего диапазона соответственно первого и второго фильтров. Габаритные размеры первого фильтра не должны превышать $0,12 \times 0,04\lambda_{01}$, а второго – $0,08 \times 0,024\lambda_{02}$. Особенностью фильтров является высокая мощность фильтруемого сигнала, превышающая десятки ватт.

При разработке топологии был выполнен анализ возможности построения ФНЧ в виде шлейфового фильтра, часто используемого для построения фильтров гармоник [1, 2]. Вариант реализации топологии фильтра из последовательно включенных в передающую линию разомкнутых шлейфов для частоты f_{01} приведен на рис. 1а. Расчетная АЧХ этого фильтра приведена на рис. 1б.

Фильтр включает в себя восемь секций шириной $0,055\lambda_{01}$ с шириной шлейфов $0,011\lambda_{01}$. Передающая линия имеет 6 участков с шириной $0,011\lambda_{01}$ и три участка с шириной $0,022\lambda_{01}$. Для снижения размеров фильтра используется фольгированный диэлектрический материал типа RO3010 с диэлектрической проницаемостью 10,2 и толщиной 0,64 мм.

Рис. 1. Вариант реализации ФНЧ в виде шлейфового фильтра: а) топология; б) АЧХ

Анализ характеристик варианта реализации ФНЧ в виде шлейфового фильтра показывает, что для получения требуемого подавления третьей гармоники размеры фильтра значительно превышают заданные и составляют $0,44 \times 0,046\lambda_{01}$.

Для снижения габаритных размеров фильтра был разработан метод построения топологии фильтра, заключающийся в добавлении к шлейфовому фильтру согласующих структур в виде шпильковых резонаторов со свернутыми полосками в неперiodический меандр и треугольных петлевых элементов. Предлагаемый метод разработан на основе метода оптимизации характеристик фильтров, предложенного в [3], использующего широкополосные согласующие структуры в виде разомкнутых шлейфов неперiodической структуры.

Построение первого ФНЧ с рабочей частотой f_{01}

Предложенный метод использован для построения топологии первого ФНЧ с длиной волны центра полосы пропускания λ_{01} . Внешний вид полученной топологии одной секции ФНЧ приведен на рис. 2а, расчетная АЧХ – на рис. 2б.

Топология секции включает шпильковый резонатор, соединенный с верхним краем шлейфа и треугольный петлевой элемент, соединенный с нижним краем шлейфа. Полоски шпилькового резонатора свернуты в неперриодический меандр для уменьшения высоты резонатора. Соединение этих элементов со шлейфом выполнено с помощью плавных тройников, что обеспечивает снижение КСВ соединения по сравнению с Т-образными тройниками [4]. Для улучшения согласования в полосе частот тройники имеют дополнительные элементы, охватывающие края шлейфов с двух сторон.

В секции использованы более тонкие полоски шириной $0,0014\lambda_{01}$, а ширина свернутых полосок шпилькового резонатора и полоски в петлевом индуктивном элементе составляет $0,0007\lambda_{01}$. Предложенная топология позволила сократить длину секции в 4 раза с $0,055\lambda_{01}$ до $0,014\lambda_{01}$ при сохранении высоты $0,04\lambda_{01}$.

Рис. 2. Одна секция первого ФНЧ: а) топология; б) АЧХ

Эквивалентная схема секции включает в себя два последовательно включенных параллельных колебательных контура, на резонансной частоте сопротивление такого контура велико и имеет полюс затухания. Численное моделирование характеристик полученной топологии секции фильтра показывает, что формирование первого полюса затухания на частоте $3,11 f_{01}$ обеспечивает верхняя часть секции, при этом максимальный ток на этой частоте протекает по ее элементам. Второй полюс затухания на частоте $5,13 f_{01}$ формируют элементы топологии, расположенные в нижней части секции.

Поскольку одна секция фильтра дает узкую полосу заграждения, то с целью расширения полосы заграждения при построении ФНЧ использовано последовательное соединение секций, полюса затухания которых смещены по частоте.

При увеличении количества секций возрастает величина подавления в полосе заграждения третьей гармоники и расширяется ее полоса. Увеличивается также полоса заграждения четвертой и более высоких гармоник. Результирующий вариант топологии первого ФНЧ включает в себя восемь секций, при этом четыре секции повторяются (рис. 3). Размеры ФНЧ составляют $0,12 \times 0,04\lambda_{01}$.

Рис. 3. Результирующая топология первого ФНЧ из восьми секций

Для экспериментальной проверки полученной топологии и измерения характеристик фильтра был изготовлен его макет и измерена АЧХ (рис. 4).

Рис. 4. Экспериментальная АЧХ макета первого фильтра

Результаты измерений показывают, что потери в рабочей полосе пропускания ФНЧ составляют от 0,21 до 0,47 дБ, подавление в полосе заграждения третьей гармоники превышает 50 дБ, подавление в полосе заграждения четвертой и более высоких гармоник также превышает 50 дБ. Применение предложенного метода обеспечивает снижение площади, занимаемой топологией фильтра в 3,6 раза по сравнению с шлейфовым типом фильтра (рис. 1) и около 1,5 раза по сравнению с фильтром, описанным в [3].

Построение второго ФНЧ с рабочей частотой f_{02}

Предложенный метод был использован также и при построении топологии второго фильтра гармоник с более низкой рабочей частотой $f_{02} < f_{01}$.

Топология одной секции приведена на рис. 5. В секции использованы шпильковые резонаторы с полосками, свернутыми в непериодический меандр в верхней части секции и петлевые элементы в нижней части секции. Из-за более низкой рабочей частоты полоски резонатора свернуты в меандр, форма которого отличается от используемого в первом фильтре (рис. 2а). Тройники, соединяющие дополнительные согласующие элементы со шлейфом, имеют плавную форму, что обеспечивает снижение КСВ. Ширина полосок составляет $0,0003 \lambda_{02}$.

Рис. 5. Одна секция второго ФНЧ: а) топология; б) АЧХ

Эквивалентная схема секции включает в себя три последовательно включенных параллельных колебательных контура. Численное моделирование характеристик полученной топологии секции фильтра показывает, что формирование первого и второго полюса затухания на частотах $3,1 f_{02}$ и $3,4 f_{02}$ обеспечивает верхняя часть секции, при этом максимальный ток на этой частоте протекает по ее элементам. Третий полюс затухания на частоте $8,7 f_{02}$ формируют элементы топологии, расположенные в нижней части секции.

С целью получения широкой полосы заграждения при построении ФНЧ использовано последовательное соединение секций, полюса затухания которых смещены по частоте.

При увеличении количества секций возрастает величина подавления в полосе заграждения третьей гармоники и расширяется ее полоса. Увеличивается также полоса заграждения четвертой и более высоких гармоник. Результирующий вариант топологии второго ФНЧ включает в себя десять секций, при этом пять секций повторяются (рис. 6). Размеры второго ФНЧ составляют $0,08 \times 0,024 \lambda_{02}$.

Рис. 6. Результирующая топология второго ФНЧ из десяти секций

Для экспериментальной проверки полученной топологии и измерения характеристик второго ФНЧ был изготовлен его макет и измерена АЧХ (рис. 7).

Результаты измерений показывают, что потери в рабочей полосе пропускания ФНЧ составляют 2,2 дБ, подавление в полосе заграждения третьей и более высоких гармоник превышает 40 дБ.

Рис. 7. Экспериментальная АЧХ макета второго ФНЧ

Предложенный метод построения топологии ФНЧ с широкой полосой заграждения, основанный на использовании согласующих структур в виде шпильковых резонаторов с полосками, свернутыми в неперiodический меандр и петлевых элементов, обеспечивает получение компактных габаритных размеров фильтра. На основе представленного метода разработана топология двух ФНЧ, включающих соответственно восемь и десять секций при габаритных размерах $0,12 \times 0,04 \lambda_{01}$ и $0,08 \lambda_{02}$. Применение представленного метода позволяет снизить площадь, занимаемую фильтром, в 3,8 раза по сравнению с обычно используемыми для этой цели шлейфовыми фильтрами.

Экспериментально измеренные АЧХ макетов фильтров показывают, что потери в рабочей полосе пропускания составляют у первого фильтра от 0,21 до 0,47 дБ, у второго – 2,2 дБ, подавление в полосе заграждения третьей и более высоких гармоник у фильтров превышает 40 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по элементам полосковой техники / под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
2. Hong J.S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Wiley, 2011.
3. Петров И.А. Фильтры СВЧ с использованием широкополосных согласующих структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. №1. С. 51–56.
4. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Сов. радио, 1976. 216 с.