

АНТЕННЫ, СВЧ-УСТРОЙСТВА И ИХ ТЕХНОЛОГИИ



УДК 621.372.543

ДВУХПОЛОСНЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР

А.Ю.Беляков, Е.В.Петров*, В.В.Попов, А.П.Штейнгарт

DUAL-PASSBAND CERAMIC FILTER

A.Iu.Beliakov, E.V.Petrov*, V.V.Popov, A.P.Shteingart

ОАО «СКТБ РТ», popov_vv@mail.ru*Институт электронных и информационных систем НовГУ, pev46@mail.ru

Представлен обзор методов построения многополосных полосовых фильтров СВЧ. Предложен вариант реализации двухполосного полосового керамического фильтра с широкой полосой и высоким уровнем загораживания между полосами пропускания с входным элементом на основе отрезков копланарной линии.

Ключевые слова: двухполосный фильтр, полосовой фильтр, керамический фильтр

A review of the microwave multiband band-pass filters design methods is presented. We offered the embodiment technique for a dual-passband ceramic filter with a wide and high-level stop-band between pass-bands with an input element on the basis of the coplanar line.

Keywords: dual-band filter, band-pass filter, ceramic filter

Частотные фильтры предназначены для селекции (выделения или подавления) частей спектра сигналов и являются неотъемлемыми компонентами большинства классов радиоэлектронной аппаратуры. Основным типом фильтров, работающих в СВЧ-диапазоне, являются полосовые (полосно-пропускающие) фильтры, причем имеющая место тенденция к усложнению аппаратуры с одновременным ужесточением требований к их эксплуатационным характеристикам требует разработки и изготовления фильтров с низкими потерями пропускания и временами задержки, с малыми коэффициентами прямоугольности, с высокой температурной стабильностью и минимальными массогабаритными показателями. Отдельным направлением реализации высоких требований к компонентам радиоэлектронной аппаратуры можно рассматривать применение многополосных полосовых фильтров.

Многополосные фильтры находят все более широкое применение в наземной и особенно в аэрокосмической аппаратуре, в частности, в передающих трактах спутниковых систем вещания и связи, характеризующихся сложным характером распределения по частотам и по зонам покрытия большого количества каналов (полос частот). На рис.1 показан пример блок-схемы спутникового транспондера, реализованного с применением двухполосных фильтров и обеспечивающего разделение каналов передачи данных по двум зонам покрытия. Передатчик с такой структурой проще традиционного и реализуется меньшим количеством элементов, в частности, на двух выходных усилителях мощности вместо четырех, т. е. он надежнее и дешевле. Многополосные фильтры также применяются в радиоаппаратуре, предназначенной для работы в сложной помеховой обстановке.

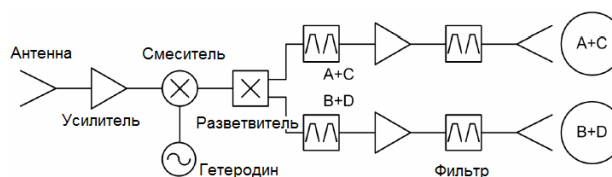


Рис.1. Блок-схема спутникового транспондера на двухполосных фильтрах

Применение многополосных фильтров, кроме очевидных преимуществ в упрощении структуры и уменьшении размеров аппаратуры, упрощает производство последней, поскольку отсутствует необходимость создания и настройки разветвителя, обеспечивающего разделение/сложение мощности и фазовое согласование входов и выходов отдельных полосовых фильтров между собой и с линией передачи; многополосные фильтры уже согласованы и устанавливаются в СВЧ-тракт аналогично другим компонентам.

Существует несколько способов реализации многополосных фильтров в зависимости от конструктивного исполнения и заданных требований к электрическим параметрам.

При небольшой разнице между центральными частотами полос пропускания, не превышающей, как правило, нескольких ширин полос пропускания, многополосные фильтры реализуются как традиционные, при этом полосы загораживания между полосами пропускания обеспечиваются нулями функции передачи, полученными введением в структуру фильтра параллельных связей. Методика расчета в таком случае аналогична применяемой для обычных полосовых фильтров, например [1]; основное отличие заключается в частотном преобразовании — переходе от нор-

мированной частоты фильтра-прототипа к физической частоте рассчитываемого фильтра. Ниже для сравнения приведены формулы частотного преобразования одно- (1) и двухполосного (2) [2] фильтров:

$$\Omega(\omega) = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right), \quad (1)$$

$$\Omega(\omega) = b_1 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} - \frac{\omega_{01}}{\omega} \right) - \frac{1}{b_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{02}} - \frac{\omega_{02}}{\omega} \right)}, \quad (2)$$

Ω — нормированная частота; ω — круговая частота, рад/с; ω_0 , ω_{01} — центральные частоты полос пропускания фильтров, рад/с; ω_{02} — центральная частота полосы заграждения двухполосного фильтра, рад/с; $\Delta\omega$ — ширина полосы пропускания однополосного фильтра, рад/с; b_1 , b_2 — коэффициенты, зависящие от ширины полос пропускания и заграждения.

Формула (2) описывает представление двухполосного фильтра в виде последовательного включения режекторного (полосно-запирающего) фильтра, формирующего полосу заграждения, и полосового (полосно-пропускающего) фильтра с общей полосой пропускания, включающей обе полосы пропускания и полосу заграждения между ними.

Данный способ позволяет реализовывать фильтры с минимальным зазором между полосами пропускания, с несимметричными полосами пропускания, в том числе с разным количеством полюсов функции передачи в каждой из полос. Основным недостатком такого подхода является сложность настройки фильтра вследствие взаимной чувствительности полос пропускания, а при реализации фильтров с широкой полосой заграждения между полосами пропускания применимость данной методики падает ввиду проявления частотной зависимости величин связей между резонаторами (согласно методике, коэффициенты матриц связи предполагаются частотно-независимыми). Получение высоких уровней заграждения (~40 дБ и более) между полосами пропускания требует введения большого количества нулей пропускания в структуру фильтра, что существенно усложняет его разработку и настройку.

Другим способом получения функции передачи с несколькими полосами пропускания является применение фильтров на многомодовых резонаторах, например фильтра на объемных прямоугольных резонаторах [3]. В данном случае каждая из полос пропускания реализуется на одной из собственных мод резонаторов. Такой подход обеспечивает возможность в некоторой степени независимой настройки отдельных полос пропускания, что упрощает изготовление фильтра. Получение фильтров с любыми заданными частотами каждой из полос пропускания возможно путем управления геометрией резонаторов. Так, в приведенном примере реализуются две полосы пропускания на «вертикальной» TE_{10} и «горизонтальной» TE_{01} модах колебаний прямоугольных резонаторов, а частоты мод практически независимо друг от друга определяются высотой и шириной резонаторов соответственно. Очевидно, что полосы пропускания функции передачи многомодового фильтра содержат одинаковое количество полюсов, реализация полос

различной ширины по сравнению с предыдущим методом ограничена. При реализации многомодовых фильтров с широкими полосами заграждения между полосами пропускания проявляется разница в добротности резонаторов на частотах различных мод, ведущая к искажению функции передачи и ограничивающая применимость данной методики. Примером реализации многомодовых фильтров в планарном исполнении являются, например, фильтры на расщепленных микрополосковых резонаторах [4].

Как сказано выше, оба описанных метода принципиально ограничены при построении многополосных фильтров с широкими полосами заграждения между полосами пропускания.

Реализация функции передачи с широкими полосами заграждения между полосами пропускания представляется целесообразной на основе условно независимых цепочек резонаторов, соединенных между собой и с входным и выходным линиями передачи определенным конструктивным элементом, который мы назовем входным (выходной, как правило, аналогичен). В отличие от реализации многополосной функции передачи несколькими отдельными фильтрами с внешней схемой согласования, такой входной элемент конструктивно включается в состав фильтра и может не только обеспечивать согласованное соединение фильтров между собой и с трактом, но и выполнять функции, например, элемента связи крайних резонаторов каждой из цепочек с линией передачи. В отличие от входных элементов связи отдельных фильтров, такой «общий» входной элемент должен быть широкополосным, т. е. обеспечивать заданную величину связи с крайними резонаторами в каждой из полос пропускания, и в общем случае должен позволять независимую настройку силы связи в каждой полосе. Очевидно, что часть параметров такого многополосного фильтра — разница центральных частот полос пропускания, ширина полос пропускания — будет ограничиваться в первую очередь характеристиками входного элемента, при этом уровень заграждения между полосами пропускания и возможности реализации функции передачи заданного вида будут сравнимы со случаем применения независимых фильтров.

В настоящей работе рассматривается двухполосный полосовой фильтр из двух цепочек связанных диафрагмами металлокерамических коаксиальных резонаторов. Входной элемент связи, обеспечивающий подключение фильтра к копланарной или микрополосковой линии СВЧ-тракта, выполнен в виде отрезков копланарных линий на боковых гранях крайних резонаторов (рис.2), он имеет общую (после соединения резонаторов по смежным граням) и отдельную (на торцевых гранях) части. Таким образом, входной элемент представляет собой встречно-стержневую структуру связанных линий, образованных крайними резонаторами фильтра и короткозамкнутыми отрезками копланарных линий, сформированных на торцевых и боковых гранях крайних резонаторов. Регулировка высоты вертикального зазора отрезка копланарной линии на торцевой грани обеспечивает возможность регулировки нагруженной

добротности крайних резонаторов в диапазоне от 17 до 101 (при наибольшей длине горизонтального зазора отрезка копланарной линии).

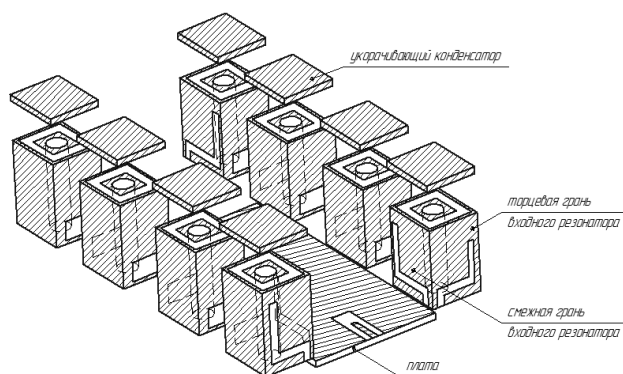


Рис.2. Конструкция двухполосного керамического фильтра («взрыв»)

Такая структура вследствие суммирования емкостной и магнитной связей обеспечивает согласование в широких полосах частот. Разделение входного элемента связи на общую и отдельные части делает возможным за счет изменения размеров короткозамкнутых отрезков копланарных линий (ширины и длины линии, ширины зазора между линией и общей частью) необходимое согласование с линией передачи в обеих полосах пропускания в широком диапазоне частот и ширин полос. Получение заданных центральных частот полос пропускания в широком диапазоне обеспечивается изменением высоты резонаторов, величины укорачивающей емкости и диэлектрической проницаемости керамического материала резонаторов.

Согласно результатам моделирования, рассматриваемая конструкция входного элемента, показанная на рис.3 (слева), имеет следующую особенность: его магнитное поле существенно распространяется за пределы объема фильтра, как это схематично показано на рис.4 (слева). Как следствие, применение фильтра требует дополнительного экранирования, частично закрывающего торцевые поверхности фильтра, в противном случае появление у торцов возмущений, например других компонентов аппара-

туры, будет приводить к существенному искажению характеристик фильтра. А добавление торцевого экранирования значительно усложняет изготовление и настройку фильтра.

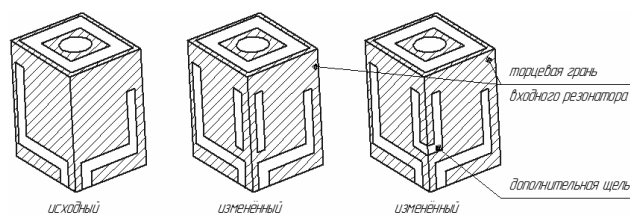


Рис.3. Конструкция входного элемента (для упрощения показана его половина)

Ослабить распространение магнитного поля за пределы фильтра позволяет изменение конструкции входного элемента, показанное на рис.3 (в центре). Добавление дополнительной вертикальной щели позволяет изменить структуру поля входного элемента на рис.4 (справа) без заметного изменения свойств последнего в отношении возбуждения в резонаторах коаксиальной моды колебаний, показанной на рисунке закрашенными стрелками. Еще сильнее этот эффект выражается при использовании входного элемента, показанного на рис.3 (справа). Как видно, применение измененного входного элемента уменьшает распространение магнитного поля за пределы фильтра, что делает дополнительный экран необязательным. Кроме того, применение измененного входного элемента за счет уменьшения связи полей в смежных резонаторах позволяет реализовывать двухполосные фильтры с большей разницей в ширинах полос пропускания.

На основе предложенной конструкции разработан двухполосный фильтр с центральными частотами полос пропускания 1030 МГц и 1530 МГц и шириной каждой из полос пропускания 30 МГц (ширина центральной полосы заграждения — более 10 ширин полос пропускания, уровень заграждения — более 40 дБ, относительная ширина полос пропускания составляет 2,9% и 2,0% соответственно). Расчетная амплитудно-частотная характеристика разработанного фильтра приведена на рис.5.

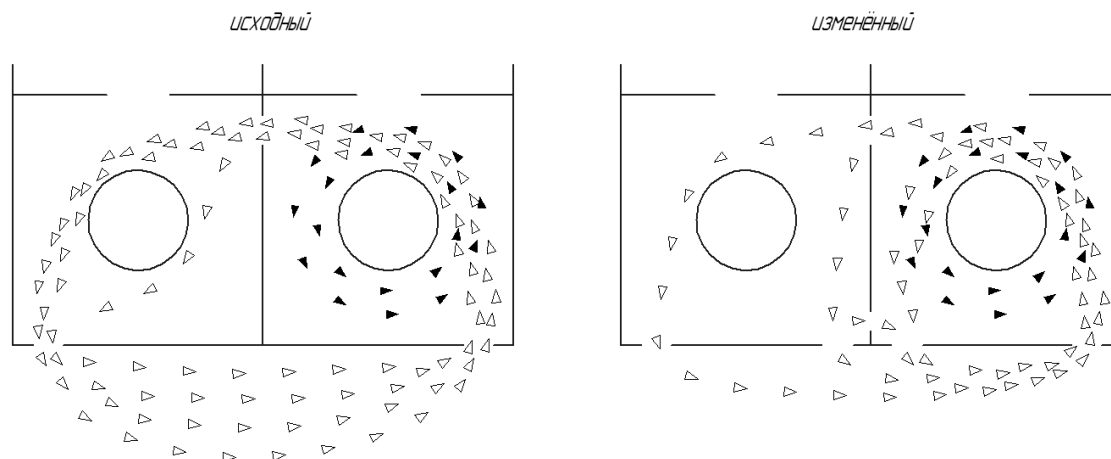


Рис.4. Структура магнитного поля в области входного элемента (вид сверху)

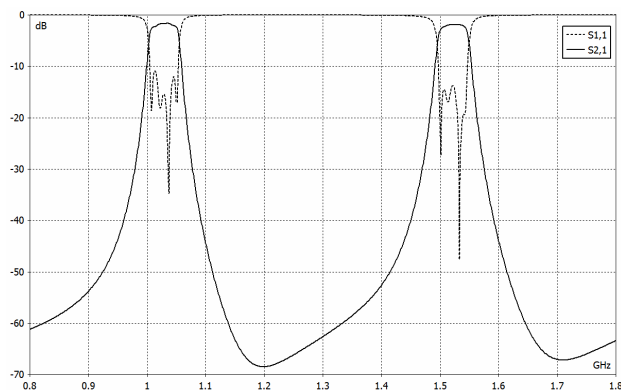


Рис.5. Расчетная АЧХ двухполосного керамического фильтра

Таким образом, предложенная конструкция СВЧ керамического фильтра на коаксиальных резонаторах с входным элементом на основе отрезков копланарных линий на боковых гранях крайних резонаторов позволяет эффективно реализовать функцию передачи с широкой полосой и высоким уровнем заграждения между полосами пропускания, с независимо получаемыми центральными частотами и ширинами полос пропускания в широком диапазоне частот и ширин полос.

1. Беляков А.Ю., Петров Е.В., Попов В.В., Штейнгарт А.П. Расчет СВЧ полосовых фильтров с частотными характеристиками специального вида // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2015. № 7 (90). С.45-51.
2. Macchiarella G., Tamaizzo S. Design Techniques for Dual-Passband Filters // IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. Vol.53. №11. P.3265-3271.
3. Amari S., Bekheit M. A New Class of Dual-Mode Dual-Band Waveguide Filters // IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques. Vol.56. №8. Pp.1938-1944.
4. Пат. РФ №2480866. МПК P013 1/00. Микрополосковый двухполосный полосно-пропускающий фильтр / Б.А.Беляев, В.В.Тюрнев, А.М.Сержантов. Заявл. 23.03.2012. Оpubл. 27.04.2013. Бюл. №12.

References

1. Beliaikov A.Iu., Petrov E.V., Popov V.V., Shteingart A.P. Raschet SVCh polosovykh fil'trov s chastotnymi kharakteristikami spetsial'nogo vida [Development of microwave band-pass filters with arbitrary frequency response]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2015, no. 7(90), pp. 45-51.
2. Macchiarella G., Tamaizzo S. Design techniques for dual-passband filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, vol. 53, no. 11, pp. 3265-3271.
3. Amari S., Bekheit M. A new class of dual-mode dual-band waveguide filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, vol. 56, no. 8, pp. 1938-1944.
4. Beliaev B.A., Tiurnev V.V., Serzhantov A.M. Mikro-poloskovyyi dvukhpolosnyi polosno-propuskaiushchii fil'tr [Microstrip dual-passband filter]. Patent RF, no. 2480866, 2013.