

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.372.543.2

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА НА ДВУХМОДОВЫХ СВЕРНУТЫХ РЕЗОНАТОРАХ

© 2009 г. И. А. Довбыш, В. В. Тюрнев

Поступила в редакцию 23.12.2008 г.

Разработан эффективный метод оптимизации фильтров СВЧ на двухмодовых резонаторах, в котором используются априорные знания о характере зависимости параметров полосы пропускания от резонансных частот и связей резонаторов. Показано, что правила интеллектуальной оптимизации фильтров, сформулированные ранее для одномодовых резонаторов, применимы и для двухмодовых. Для этого необходимо каждому двухмодовому резонатору фильтра сопоставить свою пару мнимых одномодовых резонаторов, частоты связанных колебаний которой совпадают с частотами двухмодового резонатора.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим этапом проектирования фильтров сверхвысоких частот (СВЧ) является оптимизация параметров конструкции. Стандартные универсальные методы оптимизации, процедуры которых включают в системы автоматизированного проектирования (САПР) устройств СВЧ, на практике оказываются мало эффективными при синтезе фильтров. Это связано с тем, что в стандартных методах оптимизации не используются априорные знания о характере зависимости амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра от геометрических параметров конструкции.

Такие знания, касающиеся влияния расстройки резонансных частот и связей резонаторов в полосно-пропускающем фильтре на искажения формы АЧХ в полосе пропускания, получены в [1–4]. Там же предложен способ настройки микрополосковых фильтров, построенный на этих знаниях.

Метод оптимизации фильтров СВЧ, в котором используются априорные знания о селективных устройствах, реализован в экспертной системе Filtex32, предназначенной для проектирования полосковых и микрополосковых фильтров [4–6]. Многолетний опыт проектирования полосно-пропускающих фильтров различных конструкций с помощью Filtex32 показал высокую эффективность интеллектуального метода оптимизации [7–10].

Однако интеллектуальный метод оптимизации требует доработки для случая так называемых фильтров СВЧ на многомодовых резонаторах, в которых в формировании полосы пропускания участвует не одна, а сразу несколько мод колебаний резонатора.

В данной работе доработка интеллектуального метода оптимизации реализована для случая двух-

звенного широкополосного микрополоскового фильтра на двухмодовых свернутых резонаторах, конструкция которого описана в [11]. Такой двухзвенный фильтр отличается миниатюрностью, малыми потерями в полосе пропускания, но при этом имеет частотную характеристику четырехзвенного фильтра на обычных, одномодовых, резонаторах [12].

1. КОНСТРУКЦИЯ ФИЛЬТРА И ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ

Рассматриваемый двухзвенный фильтр СВЧ выполнен на диэлектрической подложке. Одна сторона подложки металлизирована и является экраном. На другую сторону нанесены два свернутых полосковых проводника, образующих симметричную пару микрополосковых резонаторов. Один из концов в обоих резонаторах замкнут на экран, а второй разомкнут. Резонаторы электромагнитно связаны друг с другом по всей длине и кондуктивно подключены к внешнему тракту СВЧ. Полосковые проводники фильтра показаны на рис. 1.

Благодаря наличию скачка ширины полоскового проводника в резонаторе, а также свернутой форме, его спектр резонансных частот не является эквидистантным. С уменьшением как отношения w_1/w_2 , так и зазора S_1 происходит сближение первых двух резонансных частот F_1 и F_2 (рис. 2). В результате первые две моды колебаний от каждого резонатора могут одновременно участвовать в формировании объединенной полосы пропускания фильтра. Поэтому в формировании основной полосы пропускания можно задействовать до четырех мод связанных колебаний резонаторов фильтра.

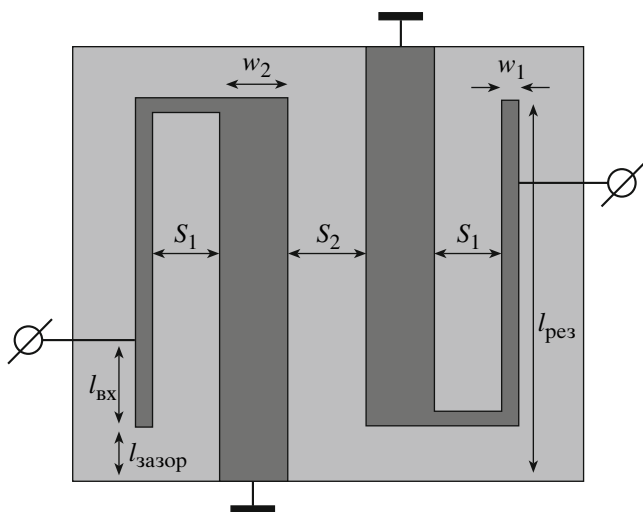


Рис. 1. Полосковые проводники фильтра.

Расчет АЧХ фильтра выполняется в рамках одномерной модели, содержащей отрезки многопроводных микрополосковых линий передачи. В явном виде учитываются только бегущие волны основного типа. Их параметры вычисляются в квазистатическом приближении [13]. Дисперсия волн основного типа учитывается в рамках приближенной аналитической модели [14]. Влияние волн высших типов, локализуемых вблизи разомкнутых концов полосковых проводников, моделируется введением эффективных конечных емкостей [15]. Амплитуды бегущих волн находят решением системы уравнений Кирхгофа для всех узловых точек одномерной модели [13].

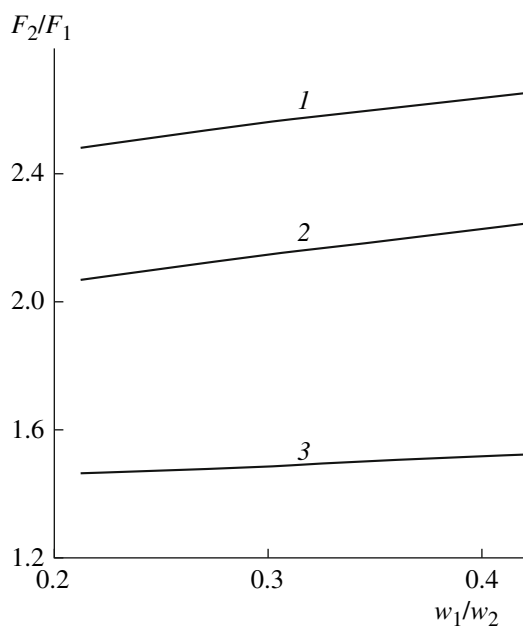


Рис. 2. Расчетные зависимости отношения резонансных частот от конструктивных параметров двухмодового резонатора: $S_1 = 8$ (1), 1.5 (2) и 0.01 мм (3).

Типичная АЧХ рассматриваемого фильтра приведена на рис. 3. На кривой обратных потерь $R(F)$ наблюдаются минимумы отраженной мощности на четырех частотах связанных колебаний, между которыми располагаются три максимума – R_1 , R_2 и R_3 . В настроенном фильтре эти величины должны совпадать со значением максимального отражения $R_{\text{макс}}$, заданного в техническом задании. Остальными величинами, характеризующими параметры полосы пропускания, являются частоты нижней F_H и верхней границы F_B полосы пропускания, определяемые по заданному уровню затухания прошедшей мощности. Таким образом, текущую полосу пропускания фильтра можно характеризовать пятью параметрами: R_1 , R_2 , R_3 , F_H , F_B . Вместо последних двух удобнее использовать центральную частоту $F_{\text{ц}} = (F_H + F_B)/2$ и ширину полосы $\Delta F = F_H - F_B$.

Задача оптимизации фильтра состоит в том, чтобы пять параметров текущей полосы пропускания приняли заданные значения. Очевидно, что для выполнения задачи потребуется настройка не менее пяти конструктивных параметров в зависимости от сложности задания. Варьирование остальных конструктивных параметров рассматривать не будем, а в дальнейшем их варьирование может быть использовано для оптимизации параметров полосы заграждения и минимизации габаритов конструкции.

В качестве настроечных параметров выбираем величины $l_{\text{рез}}$, $l_{\text{вх}}$, S_1 , S_2 , w_1 , w_2 (см. рис. 1). Очевидно, что параметр $l_{\text{рез}}$ влияет прежде всего на резонансные частоты резонаторов и потому варьирование $l_{\text{рез}}$ следует использовать для настройки центральной частоты $F_{\text{ц}}$.

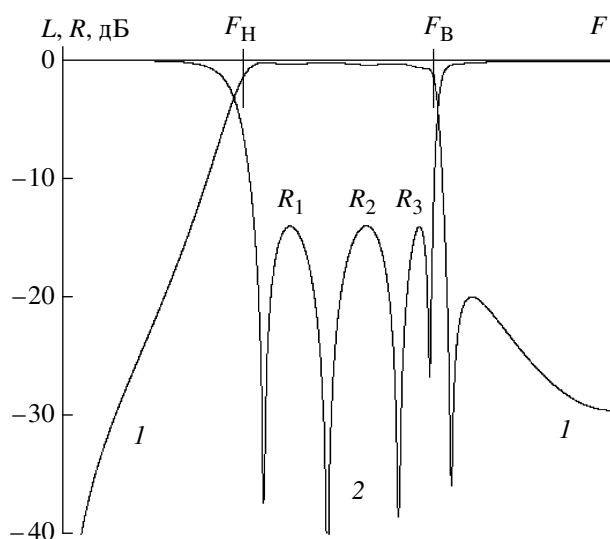


Рис. 3. АЧХ фильтра: 1 – $L = 20 \lg |S_{21}|$, 2 – $R = 20 \lg |S_{11}|$.

2. ТИПЫ ИСКАЖЕНИЙ АЧХ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Влияние варьирования величин S_1 , S_2 , w_1 , w_2 , $l_{\text{вх}}$ на значения параметров R_1 , R_2 , R_3 , $\Delta F_{\text{ц}}$ удобнее рассмотреть, если каждому двухмодовому резонатору рассматриваемого фильтра сопоставить свою пару одномодовых резонаторов. Тогда реальному двухзвенному фильтру будет сопоставлен четырехзвенный фильтр.

Одномодовые резонаторы, сопоставляемые двухмодовому резонатору, будем называть мнимыми. Частотами связанных колебаний пары мнимых резонаторов являются резонансные частоты первых двух мод колебаний двухмодового резонатора (см. рис. 2).

Физический смысл оптимизации фильтров на одномодовых резонаторах хорошо известен. Это выравнивание резонансных частот всех резонаторов и установление оптимальных для заданной полосы пропускания связей резонаторов. Связь между резонаторами принято численно характеризовать коэффициентом связи, а связь оконечного резонатора фильтра с внешним трактом СВЧ принято численно характеризовать внешней добротностью.

Различие резонансных частот внутренних и оконечных одномодовых резонаторов четырехзвенного фильтра симметричной конструкции приводит к искажению полосы пропускания, характеризуемому величиной

$$D_1 = R_1 - R_3. \quad (1)$$

Для устранения этого типа искажения при $D_1 > 0$ следует, согласно [1–4], увеличить частоту внутренних резонаторов и одновременно уменьшить частоту оконечных резонаторов, сохраняя неизменным среднее значение частот всех резонаторов. Последнее условие позволяет центральную частоту полосы пропускания $F_{\text{ц}}$ сохранить неизменной.

Настройку резонансных частот, например во встречно-штыревом микрополосковом фильтре на одномодовых резонаторах (рис. 4), можно осуществить уменьшением ширины полосковых проводников внутренних резонаторов w_2 и одновременно увеличением ширины полосковых проводников оконечных резонаторов w_1 , т.е. уменьшением отношения w_2/w_1 .

В фильтре на двухмодовых резонаторах, как показывает проверка, расстройку частот рабочих мод колебаний также можно устранить одновременным варьированием w_1 и w_2 . Однако при $D_1 > 0$ следует уменьшать не отношение w_2/w_1 , а произведение w_2w_1 .

Отклонение текущей ширины полосы пропускания ΔF от требуемой ширины ΔF_0 будет характеризоваться величиной

$$D_2 = 40(\Delta F - \Delta F_0)/\Delta F_0. \quad (2)$$

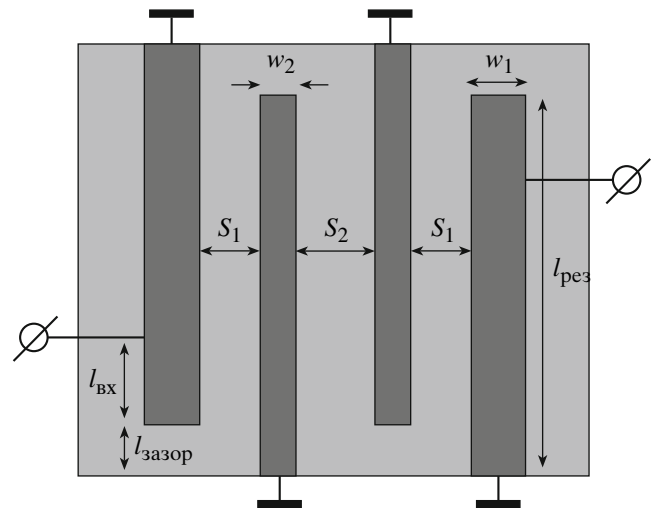


Рис. 4. Сравнимый встречно-штыревой фильтр.

Здесь коэффициент 40, полученный опытным путем, введен для возможности сравнения величины D_2 с несоразмерной величиной D_1 и с другими подобными величинами, вводимыми ниже. Такое сравнение потребует для того, чтобы оценивать, какой из всех типов искажений текущей АЧХ в полосе пропускания требуется устранить в первую очередь.

Искажение текущей полосы пропускания, характеризуемое величиной D_2 , устраняется одновременным пропорциональным изменением всех связей резонаторов в фильтре. При $D_2 > 0$ следует ослабить все связи резонаторов. Это вытекает из приближенных обобщенных формул синтеза фильтров СВЧ на основе фильтра-прототипа нижних частот [16, 17].

Во встречно-штыревом микрополосковом фильтре коррекция связей резонаторов осуществляется пропорциональным варьированием зазоров S_1 и S_2 [1–4]. Это означает, что при $D_2 > 0$ для ослабления связей следует увеличить произведение S_2S_1 .

В фильтре на двухмодовых резонаторах коррекция связей также осуществляется варьированием зазоров S_1 и S_2 . Однако при $D_2 > 0$ ослабление связей достигается увеличением не произведения S_2S_1 , а отношения S_2/S_1 . Это объясняется тем, что увеличение зазора S_1 приводит не к сближению частот первой и второй моды колебаний, как в случае связанных одномодовых резонаторов, а, напротив, к расталкиванию (см. рис. 2). Последняя особенность есть проявление роста связи между мнимыми резонаторами.

Вместо варьирования отношения S_2/S_1 можно выполнять варьирование отношения w_1/w_2 . К альтернативной коррекции следует прибегать, когда один из зазоров S_1 или S_2 становится неприемлимо узким.

Нарушение оптимальных пропорций связей в четырехзвенном фильтре на одномодовых резонаторах приводит к искажению полосы пропускания, характеризующемуся величиной [1–3]

$$D_3 = R_2 - (R_1 + R_3)/2. \quad (3)$$

Этот тип искажения при $D_3 > 0$ устраняется в четырехзвенном фильтре на одномодовых резонаторах увеличением связи между двумя внутренними резонаторами и одновременным уменьшением связи обоих конечных резонаторов с ближайшим внутренним резонатором.

Во встречно-штыревом фильтре коррекция связей, направленная на устранение неравенства $D_3 > 0$, осуществляется уменьшением зазора S_2 и одновременным увеличением зазора S_1 , т.е. уменьшением отношения S_2/S_1 .

В рассматриваемом фильтре коррекция связей, устраняющая неравенство $D_3 > 0$, также осуществляется одновременным варьированием зазоров S_2 и S_1 . Но, в отличие от встречно-штыревого фильтра, уменьшается не отношение зазоров S_2/S_1 , а их произведение S_2S_1 . Причина такого отличия была указана выше.

Неоптимальная величина связи конечных резонаторов фильтра с внешним трактом СВЧ приводит к отклонению максимумов R_1, R_2, R_3 от требуемого значения $R_{\text{макс}}$. Искажение, обусловленное отклонением величины указанной связи конечных резонаторов от оптимального значения, будем характеризовать величиной

$$D_4 = (R_1 + R_2 + R_3)/3 - R_{\text{макс}}. \quad (4)$$

Для устранения последнего типа искажений при $D_4 > 0$ необходимо, согласно [1–3], увеличить связь конечных резонаторов с внешним трактом СВЧ. Как во встречно-штыревом, так и в фильтре на двухмодовых резонаторах это достигается перемещением точки кондуктивного подключения конечных резонаторов ближе к разомкнутому концу полоскового проводника, т.е. уменьшением параметра $l_{\text{вх}}$.

Операции коррекции фильтра, сопряженные первым трем типам искажений D_1, D_2, D_3 являются квазиортогональными. Устранение любого из этих искажений не приводит к появлению других искажений, соизмеримых по величине с устраняемым искажением.

В отличие от этого, действие операции коррекции, устраняющей четвертый тип искажений D_4 , порождает другие искажения, соизмеримые по величине с D_4 . Однако негативные последствия единственной операции коррекции легко могут быть устранены остальными операциями коррекции.

В целом оптимизация фильтра представляет собой итерационный процесс. На каждом шаге итерации вычисляется, какой из четырех типов искажений является наибольшим, а затем производится

устранение этого типа искажений. Квазиортогональность первых трех операций коррекции обеспечивает устойчивость процесса оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, интеллектуальный метод оптимизации фильтров СВЧ, использующий априорные знания о влиянии варьирования резонансных частот и связей резонаторов на параметры полосы пропускания, обобщен для случая фильтров на двухмодовых резонаторах.

Для применения метода следует каждому двухмодовому резонатору сопоставить свою пару мнимых одномодовых резонаторов, частоты связанных колебаний которой совпадают с частотами двухмодового резонатора. Оптимизация производится посредством настройки резонансных частот и связей мнимых резонаторов по известным правилам, сформулированным для случая фильтров на одномодовых резонаторах.

Управление резонансными частотами и связями мнимых резонаторов путем варьирования конструктивных параметров рассмотрено на примере двухзвенного микрополоскового фильтра на свернутых двухмодовых резонаторах. Показано, что влияние варьирования конструктивных параметров на резонансные частоты и величину связи мнимых резонаторов может быть прямо противоположным, чем для реальных резонаторов во встречно-штыревом микрополосковом фильтре.

Общие правила интеллектуальной оптимизации двухзвенного микрополоскового фильтра на свернутых двухмодовых резонаторах сформулированы в терминах коррекции конкретных конструктивных параметров. Эти правила реализованы в подпрограмме синтеза фильтра, подключенной к экспертной системе Filtex32. Работа с подпрограммой показала надежность и высокую эффективность предлагаемого метода оптимизации. Сформулированные правила могут также использоваться при ручной оптимизации конструкции в стандартных САПР СВЧ и при экспериментальной настройке опытных образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (государственная программа поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ-3818.2008.3) и Сибирского отделения Российской Академии Наук (интеграционный проект № 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Б.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В. // Труды ИИЭР – Российской конференции 1997 “Микроволновая электроника больших мощностей: измерения, идентификация, применение, 1997”: ИИП – МЭ’97, Новосибирск, 23–25 сент. 1997. Изд-во НГТУ. 1997. С. 104.

2. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* // Изв. вузов. Сер. Физика. 2006. Т. 49. № 9. Приложение. С. 164.
3. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В.* // Материалы 16-й Межд. Крымской конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2006). Севастополь, 11–15 сентября 2006 г. Севастополь: Вебер, 2006. С. 517.
4. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Тюрнев В.В. и др.* // Материалы 15-ой Межд. Крымской конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2006). Севастополь, 12–16 сентября 2005 г. Севастополь: Вебер, 2005. С. 504.
5. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Тюрнев В.В. и др.* // Докл. Межд. научно-практич. конф. “Электронные средства и системы управления”. Томск, 12–14 октября 2005 г. Томск: изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2005. Ч. 1. С. 3.
6. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Тюрнев В.В. и др.* Экспертная система FilTex32 для автоматизированного проектирования и исследования полосно-пропускающих полосковых и микрополосковых фильтров // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008612877. Зарегистрировано 11.06.2008.
7. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В. и др.* // РЭ. 2000. Т. 45. № 8. С. 910.
8. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 11. С. 1315.
9. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Тюрнев В.В. и др.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 11. С. 1397.
10. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Тюрнев В.В. и др.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 1. С. 24.
11. *Беляев Б.А., Рачко Л.Т., Сержантов А.М.* Микрополосковый широкополосковый полосно-пропускающий фильтр // Патент РФ № 2182738. Б.И. 2002. № 14.
12. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М.* // Материалы 11-ой Межд. Крымской конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2006). Севастополь, 10–14 сентября 2001 г. Севастополь: Вебер, 2005. С. 501.
13. *Тюрнев В.В.* Теория цепей СВЧ. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003.
14. *Kischning M., Jansen R.H.* // Electronics Lett. 1982. V. 18. № 6. P. 272.
15. *Гунта К., Гардж Р., Чадха М.* Машинное проектирование СВЧ устройств. М.: Радио и связь, 1987.
16. *Cohn S.B.* // Proc. IRE. 1957. № 2. P. 187.
17. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971. Т. 1.