

УДК 621.372.544.2

А.В. Кондратенко, М.Л. Шевляков, А.А. Васин

## Частотный квадраплексер на подвешенной подложке

Приведены результаты разработки частотного квадраплексера на подвешенной подложке, обеспечивающего разделение широкой полосы частот на четыре канала.

**Ключевые слова:** квадраплексер, диплексерная пара, характеристика затухания, подвешенная подложка, топология, волновое сопротивление.

Частотные мультиплексеры предназначены для разделения широкой полосы частот на ряд более узких полос. Они требуются в тех случаях, когда для передачи или приема по нескольким каналам используется общая антенна и фильтры служат для деления широкой полосы частот. Кроме того, мультиплексеры могут использоваться и для обратной операции соединения, когда каналы с различными частотными диапазонами необходимо объединить в общем широкополосном канале без потерь энергии.

Если точка пересечения характеристик затухания двух соседних каналов мультиплексера имеет уровень 3 дБ и более, то развязку между каналами можно обеспечить без применения различных схем деления (суммирования) мощности. В данном случае можно выделить две основные схемы взаимосоединения фильтров в составе мультиплексера.

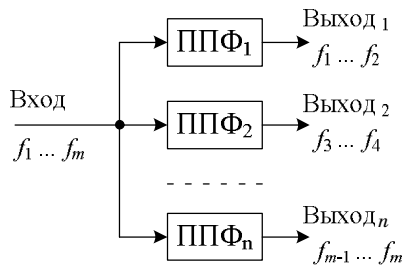


Рис. 1. Схема с соединением ППФ в общий узел

На рис. 1 представлена схема мультиплексера с соединением полосно-пропускающих фильтров (ППФ) в общий узел.

Частотные полосы, на которые производится разделение, могут быть смежными. В данном случае нижняя граничная частота полосы пропускания какого-либо канала совпадает с верхней граничной частотой полосы пропускания предыдущего канала. В то же время возможно и наличие промежуточных защитных полос.

Основной недостаток данной схемы заключается в том, что разделение частотных каналов при использовании распределенных элементов должно быть проведено так, чтобы свести к минимуму взаимодействие полей. При большом количестве ППФ в составе мультиплексера данная задача становится весьма трудоемкой, а в некоторых случаях и нереализуемой.

Наиболее предпочтительным является каскадное соединение диплексерных цепей (рис. 2). Каждая цепь содержит псевдодополнительные фильтр нижних и фильтр верхних частот (ФНЧ и ФВЧ) [1].

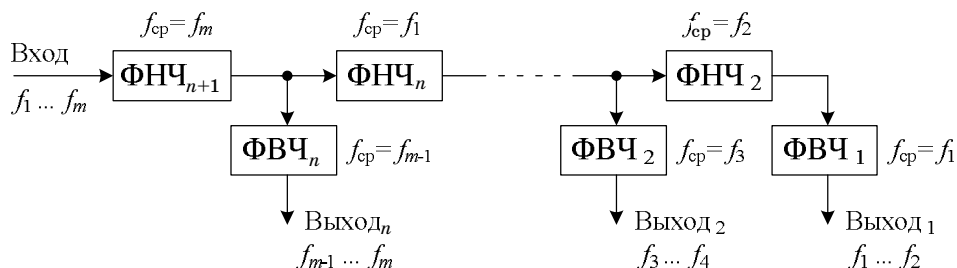


Рис. 2. Схема с каскадным соединением диплексерных цепей

Использование подобной конфигурации не только упрощает проблему взаимосоединения, но и сводит задачу расчета к рассмотрению только диплексерных цепей. Таким образом, проблема разделения каналов обычно сводится к рассмотрению параллельного соединения ФНЧ и ФВЧ. Ввиду вышеуказанных преимуществ именно данная схема выбрана для реализации.

ФНЧ и ФВЧ, входящие в состав каждой диплексерной пары, синтезированы на основе прототипа, представляющего собой ФНЧ с обобщенной чебышевской характеристикой затухания (рис. 3) [2]. В данном случае все последовательные LC-контуры в схеме имеют одинаковую резонансную частоту  $f_0$ .

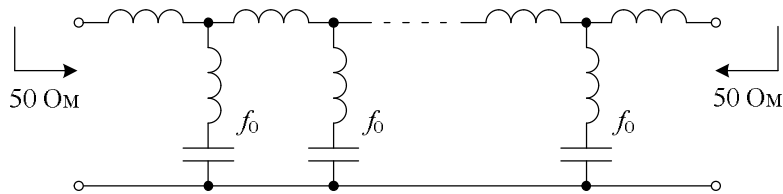


Рис. 3. ФНЧ с обобщенной чебышевской характеристикой затухания

Характеристика затухания фильтра порядка  $N$  ( $N$  – нечетное) имеет осцилляции с равной амплитудой в полосе пропускания, а также один полюс в бесконечности и  $N - 1$  полюсов на конечной частоте  $f_0$  (рис. 4). Благодаря такой ориентации полюсов данный прототип имеет практически такую же избирательность, как эллиптический ФНЧ того же порядка.

Следует отметить, что фильтры, синтезированные на основе ФНЧ с обобщенной чебышевской характеристикой, гораздо проще реализуются в микрополосковом исполнении. Данное обстоятельство объясняется тем, что максимальное изменение волнового сопротивления полосковых элементов фильтра с обобщенной чебышевской характеристикой затухания составляет порядка 2:1, в то время как для эллиптического фильтра данное отношение составляет примерно 10:1 [3].

С использованием преобразования Ричардса, а также частотного преобразования из ФНЧ-прототипа были получены квази-ФНЧ и квази-ФВЧ на отрезках идеальных линий передачи [4]. После этого осуществлен переход к конструктивной реализации.

Конструктивно фильтры квадруплексера выполнены на отрезках микрополосковых линий с подвешенной подложкой (МПЛПП). Такая линия обеспечивает хорошую экранировку и менее чувствительна к технологическим изменениям диэлектрической постоянной и толщины подложки. Поперечное сечение линии приведено на рис. 5.

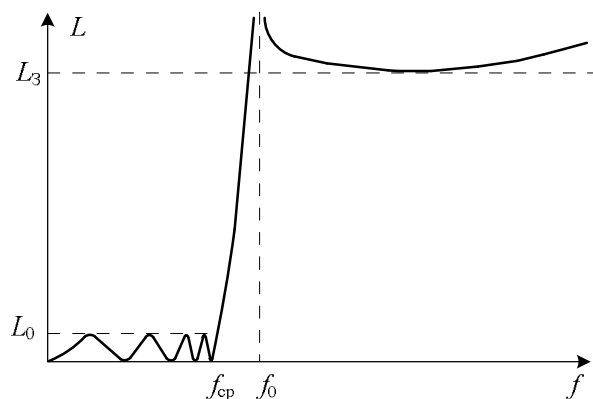


Рис. 4. Характеристика затухания фильтра

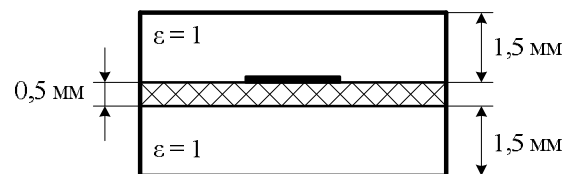


Рис. 5. Поперечное сечение МПЛПП

Поскольку в МПЛПП диэлектрик пронизывается лишь небольшой частью электромагнитного поля, то составляющая диэлектрических потерь незначительна. Следовательно, затухание в МПЛПП значительно меньше, чем в обычной микрополосковой линии (МПЛ) и определяется, в основном, потерями в проводнике и экране. В качестве материала подложки использовался ФАФ (фторопласт армированный фольгированный), с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,3$ . Толщина подложки равнялась 0,5 мм. Выбор толщины воздушной прослойки представлял собой противоречивую задачу. При увеличении толщины добротность линии возрастает. Но при этом при неизменном волновом сопротивлении линии увеличивается ее ширина, что ведет к увеличению габаритных размеров всего устройства. Компромиссным решением был выбор толщины воздушной прослойки, равной 1,5 мм. Для снижения потерь в экране корпус и крышка квадруплексера были покрыты серебром. Толщина покрытия равна 9 мкм.

Переход от топологии фильтров на идеальных линиях передачи к топологии на МПЛПП осуществлен с помощью эмпирических выражений, приведенных в работах [5, 6]. На рис. 6 схематично представлены топологии ФНЧ и ФВЧ седьмого порядка на МПЛПП.

Роль резонаторов в ФНЧ и ФВЧ играют разомкнутые на конце шлейфы (пунктирной линией на топологии ФВЧ показан шлейф с обратной стороны подложки). На частоте  $f_0$ ,

достаточно близкой к частоте среза фильтра (см. рис. 4), данные шлейфы представляют собой короткое замыкание для сигнала, обеспечивая тем самым высокую избирательность. В качестве элементов связи резонаторов в ФНЧ используются короткие отрезки высокоомной линии. В ФВЧ роль элементов связи резонаторов играют отрезки связанных через подложку линий [6].

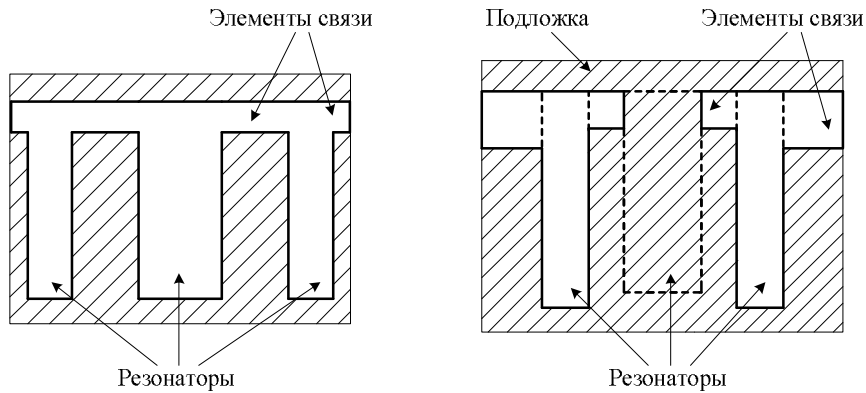


Рис. 6. Топологии ФНЧ и ФВЧ на МПЛПП

Для согласования ФНЧ и ФВЧ в каждом диплексере достаточно, чтобы сумма действительных частей составляющих нормированных входных проводимостей приблизительно равнялась единице, а сумма мнимых частей составляющих проводимостей была близка к нулю. Выполнение данных условий было обеспечено путем изменения геометрических размеров первых резонаторов и элементов связи в каждом фильтре.

На рис. 7 представлена структурная схема реализованного устройства.

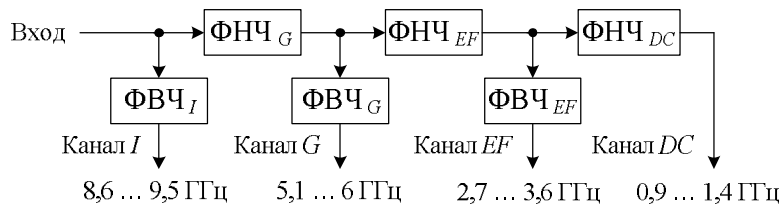


Рис. 7. Структурная схема квадруплексера

Подложка квадруплексера (вид сверху) представлена на рис. 8.

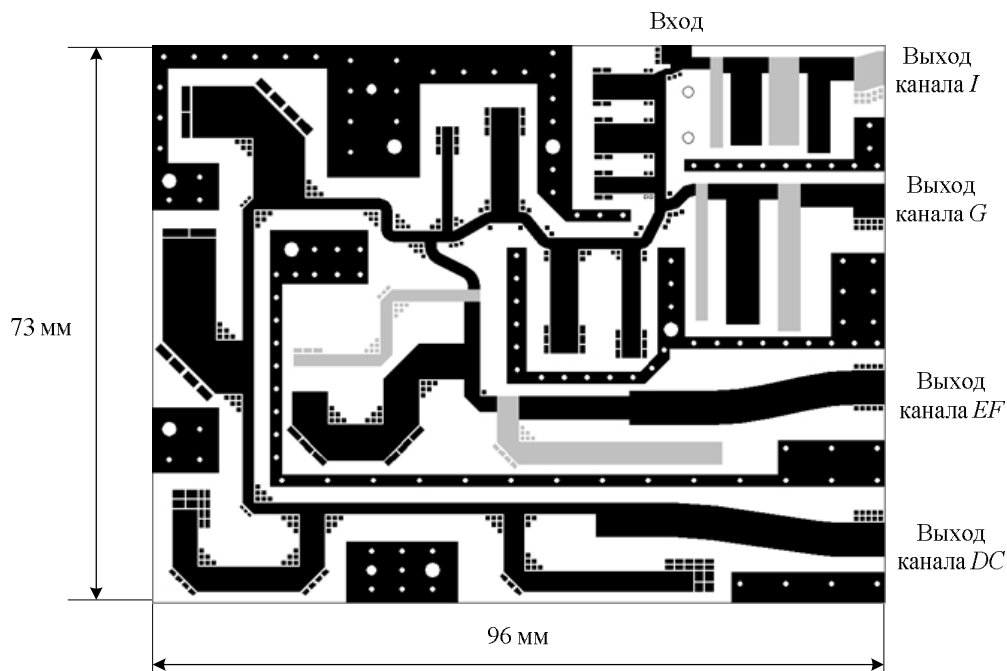


Рис. 8. Подложка квадруплексера (вид сверху)

ФНЧ на выходе канала *DC* реализован не на основе прототипа с обобщенной чебышевской характеристикой (как все другие фильтры), а на основе эллиптического прототипа с последующим изменением положения полюсов характеристики затухания на частотной оси. Смена прототипа при реализации данного фильтра обусловлена необходимостью обеспечить подавление в широкой полосе частот (ширина полосы режекции больше октавы).

Изгибы и повороты полосковых элементов фильтров выполнены с целью уменьшения габаритных размеров квадраплексера, который изначально предполагалось использовать в качестве входного частотно-разделительного устройства четырехканального конвертера СВЧ (КСВЧ). К модулю КСВЧ в свою очередь были предъявлены требования минимизации габаритных размеров. При введении в топологию изгибов и поворотов элементов фильтров удалось уменьшить габаритные размеры устройства в два раза по сравнению с топологией без дополнительных неоднородностей.

Кроме малых габаритных размеров, к достоинствам разработанного устройства также следует отнести относительную простоту настройки, которая в основном осуществляется за счет подстроечных винтов в крышке корпуса. Следует отметить тот факт, что при реализации резонаторов фильтров в виде отрезков МПЛПП с постоянным волновым сопротивлением эффективность действия подстроечных винтов значительно выше, чем в случае реализации резонаторов в виде каскадного соединения высокоомного и низкоомного отрезков линий длиной менее  $\lambda/8$  (псевдососредоточенных элементов). Кроме того, количество подстроечных элементов значительно меньше по сравнению с альтернативным вариантом реализации резонаторов на псевдососредоточенных элементах.

На рис. 9 представлены экспериментальные частотные характеристики (коэффициент передачи и коэффициент отражения) в окрестности полосы пропускания для каждого канала квадраплексера.

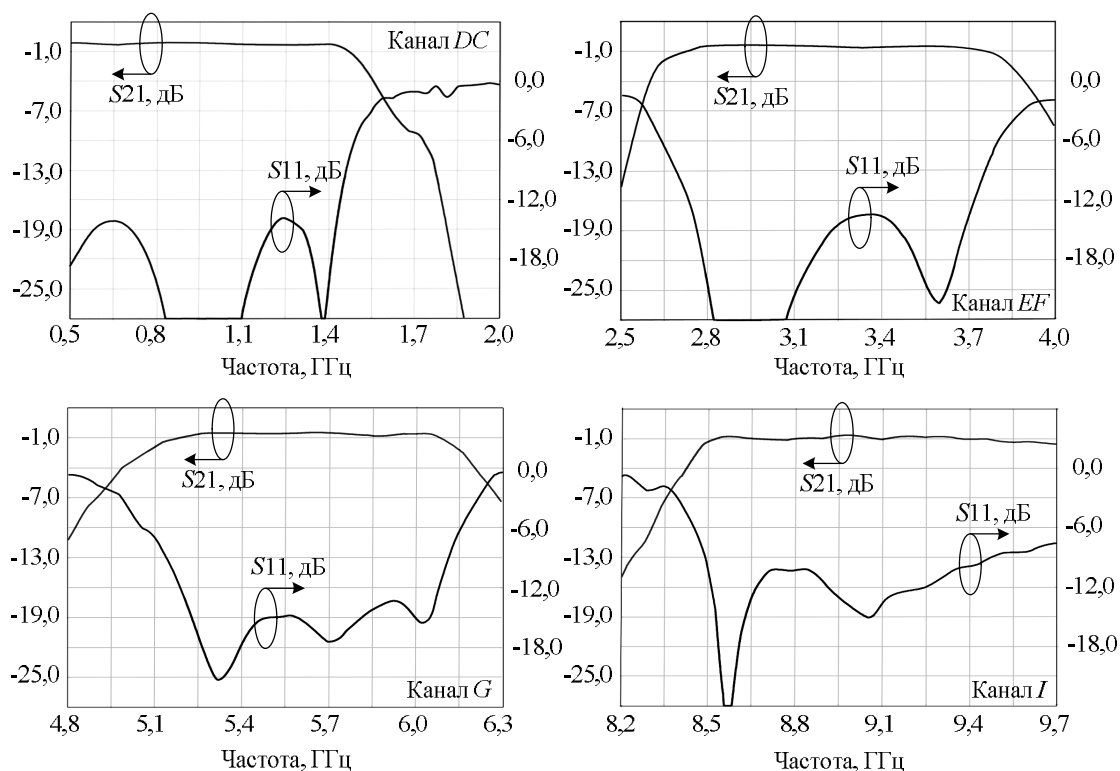


Рис. 9. Экспериментальные частотные характеристики квадраплексера

Все измерения проводились с использованием панорамного скалярного анализатора СВЧ-цепей. Основные электрические параметры разработанного устройства представлены в таблице.

Разработанный квадраплексер является функционально законченным узлом, который может использоваться как в качестве самостоятельного устройства, так и в составе более сложного модуля, например конвертера СВЧ.

**Основные технические характеристики квадруплексера**

Наименование параметра	Значение
Полоса рабочих частот, ГГц	
канал <i>I</i>	8,6...9,5
канал <i>G</i>	5,1...6,0
канал <i>EF</i>	2,7...3,6
канал <i>DC</i>	0,9...1,4
Затухание в рабочей полосе частот, не более дБ:	
канал <i>I</i>	1,5
канал <i>G</i>	1,2
канал <i>EF</i>	1,0
канал <i>DC</i>	0,7
Развязка между каналами, не менее дБ	40
КСВн в рабочих полосах частот, не более	2

На данном примере проработана методика, позволяющая проводить расчет и проектирование мультиплексеров как со смежными полосами пропускания, так и мультиплексеров, полосы пропускания которых разделяются защитными полосами. Используемая технология изготовления позволяет производить подобные устройства, предназначенные для работы в диапазоне 0...18 ГГц.

#### Литература

1. Калинина Т.И. Мультиплексеры со смежными полосами пропускания // Обзоры по электронной технике. Сер. 1 «Электроника СВЧ». – 1978. – Вып. 9 (544). – С. 2–6.
2. Mobbs C.I. A generalized Chebyshev suspended substrate stripline bandpass filter / C.I. Mobbs, J.D. Rhodes // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1983, May. – Vol. MTT-31. – P. 397–402.
3. Dean J.E. Design of MIC contiguous multiplexers / J.E. Dean, J.D. Rhodes // MTT-S International Microwave Symposium Digest 80.1. – 1980. – P. 147–149.
4. Фильтры и цепи СВЧ / Пер. с англ. Л.В. Алексеева, А.Е. Знаменского, В.С. Полякова. – М.: Связь, 1976. – 246 с.
5. Yunyi W. Synthesis equations for shielded suspended substrate microstrip line and broadside-coupled stripline / W. Yunyi, G. Kaijun, S. Yonghui // MTT-S International Microwave Symposium Digest 88.1. – 1988. – P. 331–334.
6. Losch I.E. Design procedure for inhomogeneous coupled line section / I.E. Losch, J.A.G. Malherbe // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1988, July. – Vol. MTT-36. – P. 1186–1190.

---

**Кондратенко Алексей Владимирович**  
Инженер ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск  
Тел. моб.: 8-913-855-02-02  
Эл. почта: alkon@micran.ru

**Шевляков Максим Леонидович**  
Ведущий инженер ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск  
Эл. почта: max@micran.ru

**Васин Антон Александрович**  
Инженер ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск  
Эл. почта: vasin@micran.ru

A.V. Kondratenko, M.L. Shevliakov, A.A. Vasin  
**Suspended substrate frequency quadruplexer**

The results of development of a suspended substrate frequency quadruplexer are presented. The quadruplexer provides division of a wide strip of frequencies into four channels.

**Keywords:** quadruplexer, diplexer pair, attenuation characteristic, suspended substrate, topology, characteristic impedance.