

Проектирование дуплексного фильтра на основе прямоугольного волновода для ВЧ-подсистемы службы локального многоточечного распределения

Ч. Лю, С.В. Крутиев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Служба локального многоточечного распределения (Служба локального многоточечного распределения — Local Multipoint Distribution Service — LMDS) - это технология широкополосной связи в диапазоне СВЧ, предлагающая недорогое и многофункциональное решение для задач терминального доступа. В данной статье разработан дуплексер на основе прямоугольного волновода с Т-образным соединением с квадратным гребнем для LMDS. Описана конструкция фильтра с металлической диафрагмой в Е-плоскости на основе прямоугольного волновода. Металлическая диафрагма этого фильтра может быть обработана такими методами, как травление, что обеспечивает высокую точность и низкую стоимость. Проанализированы характеристики Т-образного соединения в Н-плоскости на основе прямоугольного волновода, используемого в дуплексере.

Ключевые слова: Микроволновый дуплексер, металлическая диафрагма E-plane, микроволновый фильтр, ребристый Т-образный переход, локальная многоточечная распределительная служба

1. Введение

Служба локального многоточечного распределения (Служба локального многоточечного распределения — Local Multipoint Distribution Service — LMDS) это технология микроволнового широкополосного доступа, работающая в К- и Ка-диапазонах. В Китае LMDS работает в диапазоне частот от 24,5 до 27 ГГц, обеспечивая очень широкую полосу пропускания (более 1 ГГц). Её сравнивают с технологией «беспроводного оптоволокна», она обеспечивает двустороннюю передачу голоса, данных, изображений, видео и услуг видеоконференцсвязи на короткие расстояния. Поскольку LMDS работает в миллиметровом диапазоне волн, затраты на разработку и техническая сложность высоки. Разработка недорогих широкополосных приёмопередатчиков является ключевым компонентом LMDS. Дуплексные фильтры позволяют приемнику и передатчику

использовать одну антенну, что обеспечивает компактность конструкции. Поэтому большинство РЧ/СВЧ-подсистем используют их [1,2].

Радиочастотная мощность, генерируемая передатчиком, влияет на приемник двумя способами. Во-первых, сильные сигналы на частоте передачи могут вызвать блокировку входного каскада приемника. Для устранения этого эффекта локальный передаваемый сигнал, поступающий на вход приёмника, должен быть подавлен до уровня ниже уровня блокировки. Во-вторых, шум в спектре передачи в полосе частот приёмника может напрямую попадать в приёмник, влияя на отношение сигнал/шум. Следовательно, этот шум должен быть подавлен на выходе передатчика, чтобы поддерживать его ниже эквивалентной мощности шума приёмника на входе антенны [3-5]. Дуплексные фильтры, используемые в LMDS, должны учитывать оба этих эффекта. Дуплексер состоит из фильтра передающего канала, фильтра приёмного канала и соединительных компонентов, как показано на рисунке 1. К этим соединительным компонентам в основном относятся Y-образные и T-образные разветвители. С развитием СВЧ-технологии и растущим спросом на более эффективное использование полосы пропускания, ВЧ/СВЧ-подсистемы предъявляют всё более строгие требования к характеристикам дуплексеров, таким как вносимые потери, неравномерность АЧХ внутри полосы пропускания и развязка частотных диапазонов. Для недорогих высокопроизводительных ВЧ/СВЧ-подсистем требуются дуплексеры, которые легко отлаживаются и подходят для массового производства.

Существует два основных метода проектирования волноводных дуплексеров. Один из них заключается в разработке двухканальных фильтров с последующим подключением T-образного соединения для их оптимизации. Другой способ заключается в разработке двух фильтров с последующей настройкой T-образного соединения. Различия в методах

проектирования заключаются главным образом в различных структурах фильтра и Т-образного соединения, а также в различных технологиях согласования между ними. В данной статье рассматривается дуплексер с прямоугольным волноводом К-диапазона для систем LMDS. В конструкции фильтра используется продольная (Е-плоскость) металлическая диафрагма прямоугольного волновода, а соединительный компонент использует Т-образное соединение с Н-плоскостью и квадратным гребнем. На рисунке 1 показана общая структура дуплексера. Благодаря такой структуре металлическую диафрагму можно обрабатывать травлением, что значительно повышает точность обработки по сравнению с механическим методом обработки, что способствует массовому производству дуплексеров. По сравнению с методом Т-образного соединения с треугольным гребнем, использованным в [5], Т-образное соединение с квадратным гребнем, используемое в данной статье, позволяет добиться лучшего согласования. В данной статье сравниваются и анализируются характеристики Т-образного соединения с Н-плоскостью и гребневым профилем с обычным Т-образным соединением без гребня.

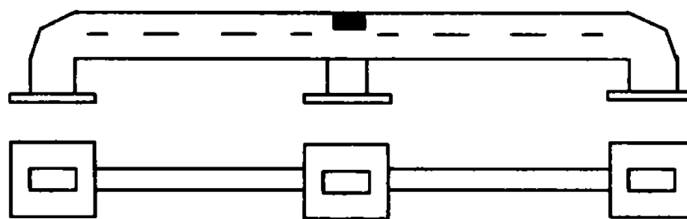


Рис. 1. – Принципиальная схема структуры дуплексера прямоугольного волновода

2. Конструкция канального фильтра

Технология проектирования фильтров в настоящее время находится на весьма развитом уровне. В данной работе рассматривается структура прямоугольного волновода с продольной (Е-плоскостью) металлической диафрагмой (рис. 2). Этот тип фильтра был впервые предложен Коноши [6].

В [7] и [8] дано подробное описание конструкции этого фильтра и предложены некоторые усовершенствования. Металлическая диафрагма может быть эквивалентна Т-образной схеме, как показано на рисунке 3. Эквивалентные параметры X_s и X_p металлической диафрагмы могут быть рассчитаны с помощью метода согласования мод и вариационного метода. Эта Т-образная схема может быть эквивалентна преобразователю импеданса К-типа. Используя эквивалентные параметры X_s и X_p , вычисляется характеристическое сопротивление K преобразователя импеданса:

$$\frac{2X_p}{1 + 2X_s X_p + X_s^2} = \tan(2 \tan^{-1}(K)) \quad (1)$$

На основе теории синтеза цепей фильтров прототип фильтра был выбран как равноволнистый (Чебышевский) тип. Порядок n и эквивалентная реактивная проводимость g_k эквивалентной цепи нижних частот были рассчитаны на основе параметров фильтра L_p , L_a , L_s , f_1 , f_2 и f_s . L_p - максимальные вносимые потери в полосе пропускания, L_a - пульсации в полосе пропускания, L_s - минимальные вносимые потери в полосе задерживания, f_1 и f_2 - верхняя и нижняя частоты среза полосы пропускания, а f_s - частота среза полосы задерживания. Используя эквивалентную реактивную проводимость g_k , были рассчитаны значения импеданса K каждого трансформатора импеданса K . Наконец, эти трансформаторы импеданса K были реализованы с использованием продольных диафрагм в волноводе, и были определены ширина и расстояние между каждой диафрагмой. Были разработаны два волноводных фильтра с центральными частотами 24,5 ГГц и 25,5 ГГц соответственно и полосой пропускания 560 МГц. Оба фильтра имеют симметричную пятиполостную структуру. Их характеристики и размеры приведены в таблице 1. Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения HFSS, и

результаты в целом соответствовали теоретическому проекту. Их кривые S_{21} показаны на рисунке 4.

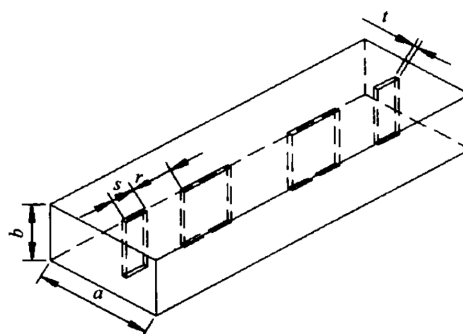


Рис. 2. – Принципиальная схема структуры волноводного фильтра третьего порядка с продольной (Е-плоскостной) металлической диафрагмой

Таблица № 1

Характеристики и размеры фильтра

	фильтр	фильтр
Размеры волновода	WR34	WR34
$a \times b$ (мм×мм)	(8.64×4.32)	(8.64×4.32)
Центральная частота (ГГц)	24.5	25.5
Ширина полосы пропускания на уровне 1 дБ (МГц)	560	560
Неравномерность АЧХ в полосе пропускания (дБ)	0.5	0.5
Внеполосное затухание (дБ)	40	40
Порядок (n)	5	5
Толщина диафрагмы t (мм)	0.127	0.127
Длина диафрагмы st (мм)	0.77, 3.45, 4.09	1.18, 4.12, 4.72
Длина резонаторной полости rt (мм)	6.61, 6.69, 6.70	5.98, 6.01, 6.02

3.Проектирование Н-образной поверхности и ребристого Т-образного соединения

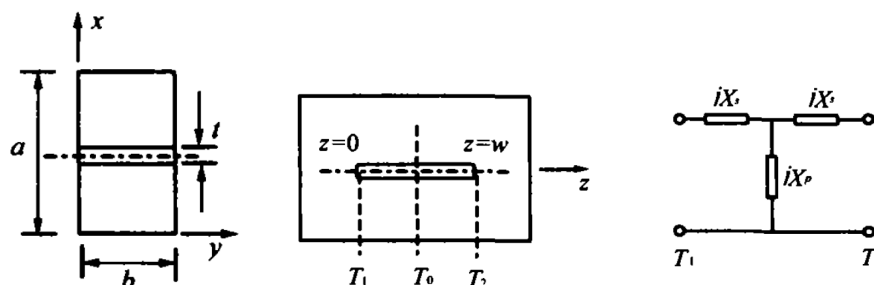
У-образные и Т-образные волноводные соединения доступны в двух исполнениях: в Е-плоскости и в Н-плоскости. У-образное соединение симметрично по трём портам, и коэффициенты отражения всех трёх портов равны, то есть $S_{11}=S_{22}=S_{33}$. Симметричное Т-образное соединение симметрично только по портам 1 и 2, то есть $S_{11}=S_{22} \neq S_{33}$. Это трёхпортовое

соединение подходит для использования в дуплексерах[9].

$$|S_{11}| = |S_{22}| \cong |S_{33}| \quad f \in b_1, f \in b_2, \quad (2)$$

Где f — частота, b_1 — полоса пропускания фильтра 1, а b_2 — полоса пропускания фильтра 2. Необходимым условием для выполнения (2) является то, что коэффициент отражения общего порта должен быть больше или равен 1/3 (-9,54 дБ) в полосе пропускания обоих канальных фильтров, то

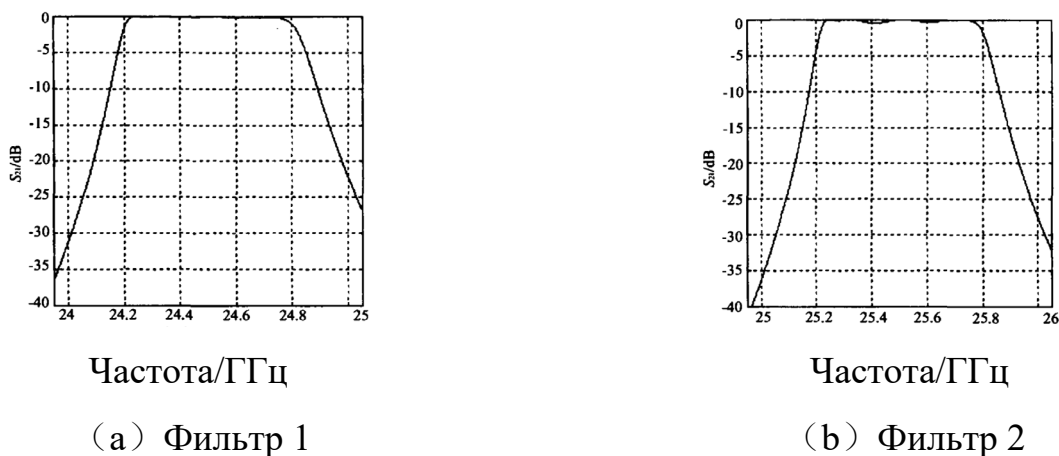
есть: $S_{33} \geq 1/3, \quad (3)$



(а) Поперечное сечение (б) Продольное сечение (с) Т-образная схема

замещения

Рис. 3. – Продольная диафрагма в волновом и ее эквивалентная схема



(а) Фильтр 1

(б) Фильтр 2

Рис. 4. – Кривая S_{21} - f фильтра Чебышева 5-го порядка

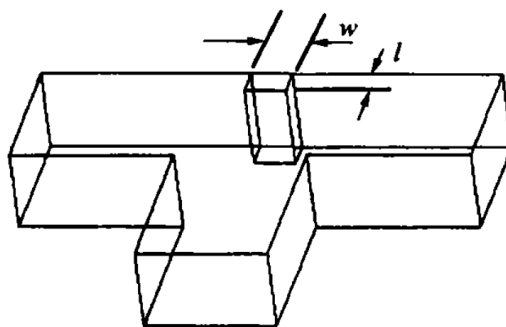


Рис. 5. – Т-образное соединение прямоугольного волновода с ребристым Н-образным профилем.

Условием получения максимальной пропускной способности является

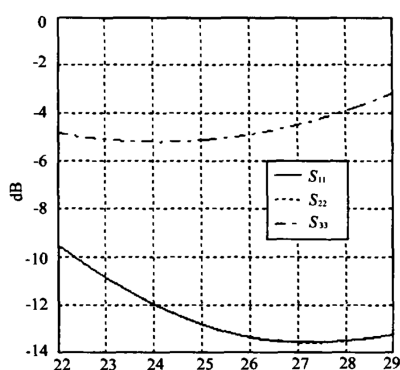
$$S_{33} = 1/3, S'_{11} \cong S'_{22} \cong S'_{33} \cong 0, f \in b_1, f \in b_2, \quad (4)$$

Где S' - частная производная S по эквивалентной частоте $\nu = \beta a$, β - постоянная сдвига фазы основной моды волновода, а a - размер широкой стороны волновода. Для получения максимальной полосы пропускания лучше всего иметь $S_{33} = 1/3$, а дисперсия должна быть как можно меньше в пределах полосы пропускания двухканального фильтра.

Для того чтобы параметры рассеяния трех портов Т-образного соединения удовлетворяли уравнению (2), в данной статье разработан Т-образный переход в Н-плоскости с квадратным гребнем посередине (рисунок 5). Регулируя размер квадратного гребня w и l , можно изменять коэффициент отражения каждого порта Т-образного соединения. На рисунке 6 показано изменение параметров рассеяния трех портов Т-образного соединения в Н-плоскости с частотой для стандартного волновода WR34 без гребня и с квадратным гребнем $w = 2,71$ мм, $l = 1,76$ мм. Видно, что обычный Т-образный разветвитель не подходит в качестве соединительного элемента дуплексера. Его использование приведёт к серьёзному рассогласованию с двухканальным фильтром. Т-образный разветвитель с гребнём в целом удовлетворяет требованиям уравнения (2) и обладает низкой дисперсией [10,11].

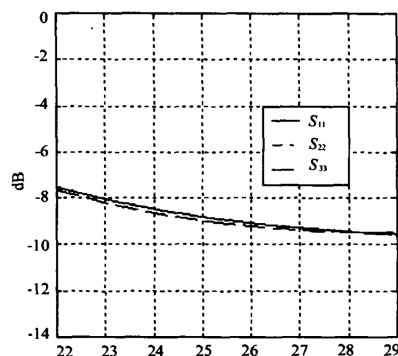
4. Конструкция дуплексера

Дуплексер построен путем объединения двух разработанных выше фильтров с Т-образным трёхпортовым сочленением в форме Н-плоскости, как показано на рисунке 1(b). Дуплексер можно оптимизировать, регулируя размер квадратного сочленения и расстояние между двумя фильтрами и Т-образным сочленением. Эта регулировка достигается путем смещения относительного положения фильтрующих мембран и Т-образного сочленения, что упрощает отладку. На рисунке 7 показан график зависимости S_{31} и S_{32} дуплексера от частоты, полученный с помощью компьютерного моделирования. Видно, что характеристики полосы пропускания/полосы задерживания двух полосовых фильтров и развязка между ними существенно не ухудшаются при использовании Т-образного сочленения, оставаясь в целом соответствующими требованиям конструкции.



Частота/ГГц

(а) Фильтр 1



Частота/ГГц

(b) Фильтр 2

Рис. 6. – Изменения S_{ii} ($i=1, 2, 3$) трех портов Т-образного соединения волновода WR34 в Н-плоскости в зависимости от частоты.

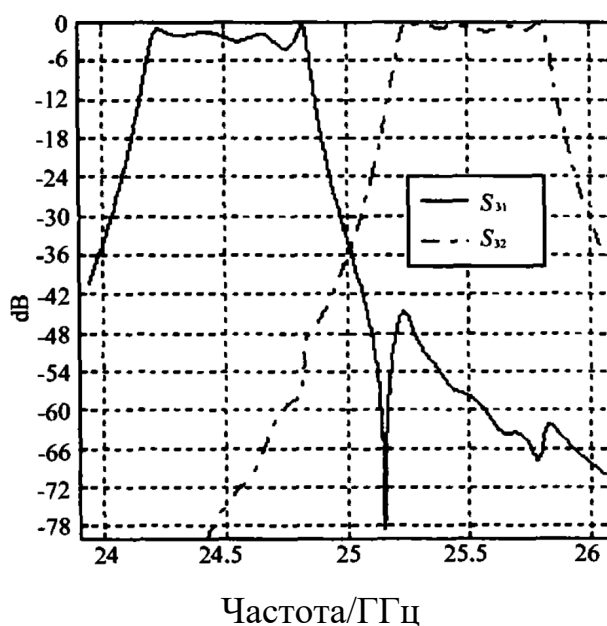


Рис. 7. – Волноводный дуплексер с Т-образным соединением в Н-плоскости

5. Заключение

Проектирование дуплексера не сводится к простому проектированию фильтров для приёмного и передающего каналов и их последующему соединению с помощью делителя мощности. Делитель мощности не подходит в качестве соединительного компонента дуплексера. Как трёхпортовый соединительный компонент, он должен соответствовать необходимому условию (2). Только дуплексер, построенный с использованием заранее разработанных фильтров, может обеспечить относительно хорошие характеристики. Дуплексер, разработанный в данной статье, имеет небольшие размеры, простую и компактную конструкцию, что способствует миниатюризации систем LMDS. Фильтр использует металлическую диафрагму с прямоугольным волноводом, расположенную продольно (в плоскости E). Такая металлическая диафрагма может быть изготовлена методом травления с высокой точностью обработки, что упрощает массовое производство и снижает затраты.

Литература

1. Борнеманн Й, Амари С. Вахлдиеск Р. Комбинированное согласование мод и метод связанных интегральных уравнений для проектирования узкополосных волноводных диплексеров с h-плоскостью // Международный симпозиум IEEE по AP-S.1999. № 2. С.950-953
2. Морини А, Роззи Т, Де Ангелис Д. Новая конфигурация согласованного диплексера в технологии e-плоскости // IEEE Trans. MTT-S Digest, 1993. № 2. С.1077-1080
3. Борнеманн Й. Лабау В. А. Интегрированный волноводный диплексер с Т-образной перегородкой для компактных приложений // IEEE Trans. MTT-S Digest, 1993. № 1 С.366~463
4. Dittloff J, Arondt F. Computer-Aided Design of slitcoupled H-plane T-junction diplexers with E-plane metal insert filter // IEEE Trans. MTT. 1988. № 36 (12). pp. 1833-1839.
5. Брагин И.В. Чадов С.Е., Гусевский В.И., Лаврецкий Е. Волноводный диплексер с использованием E-plane тройника улучшенной симметрии // 13-я Международная конференция по микроволнам. Радиолокация и беспроводная связь, МІКОН-2000. № 2. С.513~516
6. Konoshi Y. Uenakada K. The design of a bandpass filter with inductive strip-planar circuit installed in waveguide // IEEE Trans. MTT, 1974. № 22(1). pp.869-873.
7. Постоялко В. Будимир Д.С. Проектирование волноводных фильтров в плоскости Е с цельнометаллическими вставками методом оптимизации равных пульсаций // IEEE Trans. MTT, 1994, № 42(2).С.217-222
8. Хун Цзя-Шэн. Упрощенное проектирование фильтров в плоскости Е // IEE Proc., 1989.136(3) .С.215-218

9. Морини А., Роззи Т. Ограничения на оптимальную производительность и ограничения полосы пропускания диплексеров, использующих симметричные трёхпортовые соединения // IEEE Trans. MTT, 1996, 44(2). С.242-248

10. Насыбуллин А.Р., Ишкаев Т.М. СВЧ- диэлектрический волновод круглого сечения с брэгговскими периодическими неоднородностями // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4232

11. Гадзиева А.А., Земляков В.В., Крутиев С.В. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на волноводах сложного сечения, интегрированный в многослойную микросхему с применением SIW-технологии // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1505

References

1. Bornemann J, Amari S. Vahldieck R. Mezhdunarodnyj simpozium IEEE po AP-S.1999. № 2. pp.950-953
2. Morini A, Rozzi T, De Angelis D. IEEE Trans. MTT-S Digest, 1993. № 2. pp.1077-1080
3. Bornemann J. Labay V. A. IEEE Trans. MTT-S Digest, 1993. № 1. pp.366-463
4. Dittloff J, Arondt F. IEEE Trans. MTT. 1988. № 36 (12). pp. 1833-1839.
5. Bragin I.V. Chadov S.E., Gusevskij V.I., Lavreczkij E. 13-ya Mezhdunarodnaya konferenciya po mikrovolnam. Radiolokaciya i besprovodnaya svyaz, MIKON-2000. № 2. pp.513-516
6. Konoshi Y. Uenakada K. IEEE Trans. MTT, 1974. № 22(1). pp.869-873.



7. Postoyalko V. Budimir D.S. IEEE Trans. MTT, 1994, № 42(2). pp.217-222
8. Xun Czzya-Shen. IEE Proc., 1989.136(3). pp.215-218
9. Morini A., Rozzi T. IEEE Trans. MTT, 1996, 44(2). pp.242-248
10. Nasybullin A.R., Ishkaev T.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4232
11. Gadzieva A.A., Zemlyakov V.V., Krutiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1505

Дата поступления: 7.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025