

него следует, что $f_{180} = 1,21$ ГГц и полоса пропускания 0,48 ГГц.

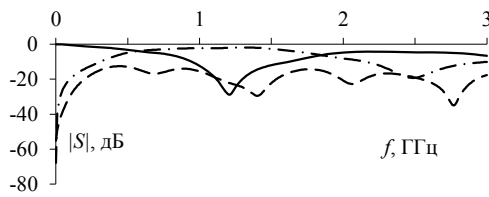


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (---), $|S_{21}|$ (—), $|S_{41}|$ (- · -) для встречно-штыревой структуры после оптимизации

Заключение

На основе полученных результатов для каждой структуры вычислены значения разностей задержек мод. Они и значения ширины полосы пропускания для всех структур сведены в таблицу.

Значения разностей задержек мод и ширин полосы пропускания

Структура	Разность задержек мод (нс)	Полоса пропускания (ГГц)
Исходная (см. рис. 3)	0,08	2,24
Встречно-штыревая (см. рис. 5)	0,21	0,9
Встречно-штыревая после оптимизации (см. рис. 6)	0,41	0,48

Из таблицы видно, что использование встречно-штыревой топологии в области связи позволило увеличить разность задержек мод в 2,6 раза по отношению к исходной структуре МФ. После оптимизации этой структуры, разность задержек мод увеличилась в 5 раз по сравнению с исходной структурой. Следовательно, можно предположить, что для обеспечения полосы пропускания 100 МГц, достаточно взять длину МФ со встречно-штыревой топологией около 0,48 м. Это позволит увеличить разность задержек мод до 2 нс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.
2. Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 280 с.
3. Hall S. Advanced signal integrity for high-speed digital designs / S. Hall, H. Heck // Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2009. – 660 p.
4. CST – Computer Simulation Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cst.com/>, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

УДК 621.396.41

М.В. Храмцов, А.М. Заболоцкий

Моделирование модального фильтра с различными периодическими профилями области связи

Исследовано влияние периодического профиля области связи модального фильтра (МФ) на разность задержек мод сигнала. Вычислены частотные характеристики МФ при изменении геометрии периодического профиля, а также временные отклики на воздействие сверхкороткого импульса на рассматриваемые структуры. Предложены решения по совершенствованию конструкции МФ.

Ключевые слова: модальный фильтр, сверхкороткий импульс, помехозащита

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) восприимчива к влиянию кондуктивных помех. Особо опасными в настоящее время являются помехи в виде сверхкоротких импульсов (СКИ) [1]. Влияние СКИ может приводить к тому, что нарушается работоспособность РЭА, выходят из строя отдельные её части, что может привести к нежелательным последствиям. Поэтому необходимо уделять большое внимание проблеме помехозащиты современной РЭА.

Существуют различные методы и способы, а также устройства помехозащиты. Одним из существующих устройств защиты от СКИ является модальный фильтр (МФ) [1]. В нем СКИ раскладывается на импульсы мод с разной задержкой. Способом изменения разности задержек мод является из-

менение периодического профиля области связи [2]. Однако профили, а значит, и их влияния могут быть разными.

Цель работы – моделирование МФ с различными периодическими профилями области связи.

Исходные данные для моделирования

В программе CST MICROWAVE STUDIO [4] построены различные структуры МФ. Моделирование выполнялось в частотной и временной областях.

В качестве материала проводника используется медь. В качестве диэлектрического материала используется FR-4, так как он является распространенным и дешевым материалом для производства печатных плат. Частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) приведены на

рис. 1. Видно, что в частотном диапазоне до 10 ГГц ϵ_r изменяется от 4,57 до 4,3, а $\text{tg}\delta$ до 1 ГГц изменяется от 0 до 0,025, а на остальных частотах почти не меняется.

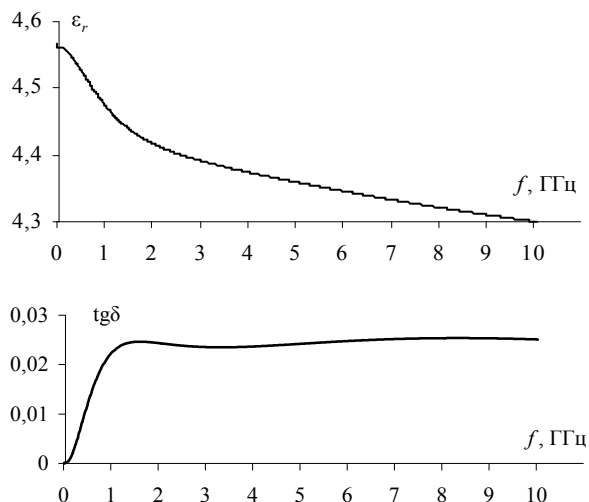


Рис. 1. Зависимости ϵ_r и $\text{tg}\delta$ от частоты для FR-4 [4]

Исходная структура МФ состоит из трех проводников длиной 100 мм на диэлектрической подложке [1]. При этом активный и пассивный проводники (с нагрузками 50 Ом) расположены на одной её стороне, а опорный – между ними по центру на обратной. Параметры структуры: ширина проводников 0,3 мм, толщина проводников 0,105 мм, расстояние между проводниками 0,4 мм, толщина диэлектрика 0,29 мм.

Разность задержек мод можно оценить с помощью временных откликов, а также как [3]

$$\Delta\tau = 0,5/f_p, \quad (1)$$

где f_p – частота первого резонанса.

На все структуры подается СКИ в виде Гауссова импульса (длительность по уровню 0,5–77 пс и амплитуда 1 В) (рис. 2).

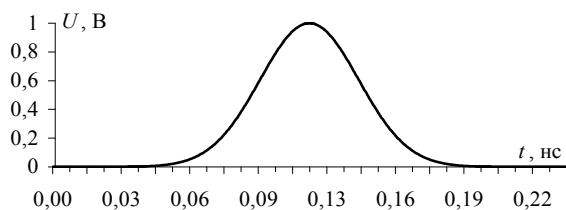


Рис. 2. Гауссов импульс

Моделирование выполнялось для четырех структур: исходная, встречно-штыревая, L-образная, спиралевидная (рис. 3).

L-образная и спиралевидная структуры являются более сложными, чем встречно-штыревая. В них увеличивается длина штырей, а значит, и задержка распространения нечетной моды.

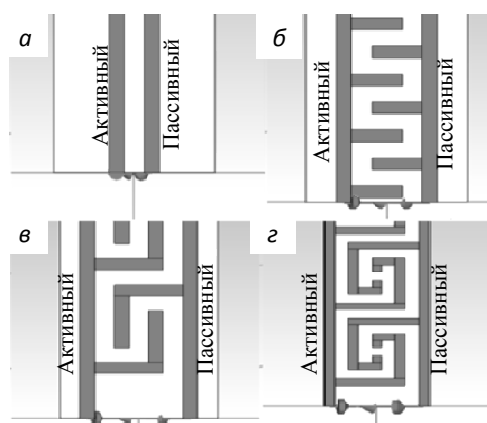


Рис. 3. Структуры для моделирования: исходная (а); встречно-штыревая (б); L-образная (в); спиралевидная (г)

Результаты моделирования

Результаты моделирования временного отклика исходной структуры представлены на рис. 4. Видно, что исходный импульс разложился на два импульса с разностью задержек около 86 пс. Амплитуда входного сигнала равна 0,5 В, а выходных – 0,22 В.

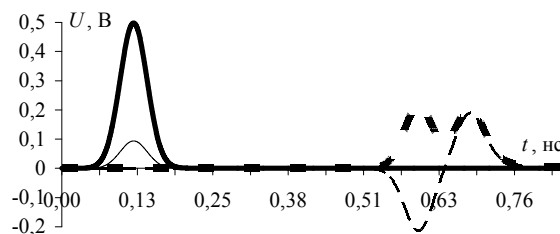


Рис. 4. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (—) проводников; в конце активного (---) и пассивного (---) проводников

Вычисленные частотные зависимости модулей параметров рассеяния приведены на рис. 5. Видно, что максимальное значение $|S_{11}|$ достигает -15 дБ. Полоса пропускания (-3 дБ) составила 2,35 ГГц. Резонанс наблюдается на частоте 5,75 ГГц, при этом затухание равно -29 дБ. По (1) разность задержек мод равна 87 пс, это подтверждает результаты, полученные во временной области.

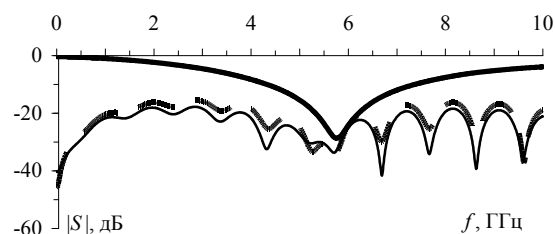


Рис. 5. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (---), $|S_{21}|$ (—), $|S_{12}|$ (---)

Результаты моделирования временного отклика встречно-штыревой структуры представлены на рис. 6. Видно, что исходный импульс разложился на

два импульса с разностью задержек 76 пс. Амплитуда входного сигнала равна 0,49 В, а выходных – 0,21 и 0,18 В.

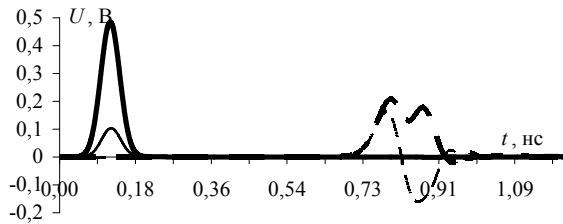


Рис. 6. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (---) проводников; в конце активного (— — —) и пассивного (---) проводников

Из вычисленных частотных зависимостей (рис. 7), видно, что максимальное значение коэффициента отражения достигает –14 дБ. Полоса пропускания (–3 дБ) составила 2,485 ГГц. Резонанс наблюдается на частоте 6,44 ГГц, при этом затухание равно –47 дБ. По (1) разность задержек мод равна 79 пс, это подтверждает результаты, полученные во временной области.

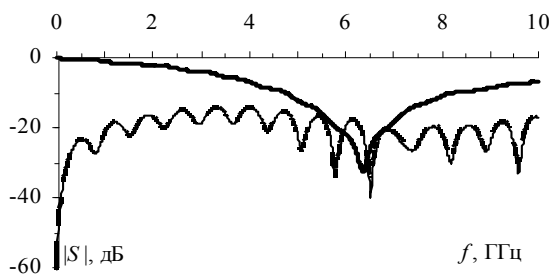


Рис. 7. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (— — —), $|S_{21}|$ (— — —), $|S_{12}|$ (---)

Из-за сложности L-образной структуры она показана с размерами в миллиметрах на рис. 8. Результаты моделирования временного отклика представлены на рис. 9. Видно, что исходный импульс разложился на два импульса с разностью задержек 200 пс. Амплитуда входного сигнала равна 0,51 В, а выходных – 0,14 и 0,11 В.

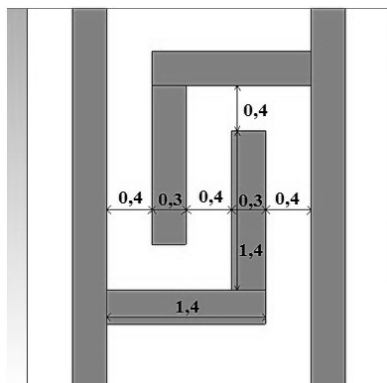


Рис. 8. Рисунок L-образной структуры с размерами

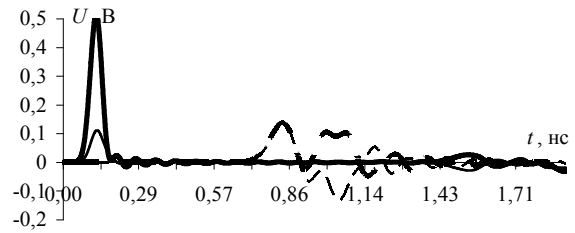


Рис. 9. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (---) проводников; в конце активного (— — —) и пассивного (---) проводников

Вычисленные частотные зависимости приведены на рис. 10. Видно, что максимальное значение $|S_{11}|$ достигает –5 дБ. Полоса пропускания (–3 дБ) составила 1041 МГц. Резонанс наблюдается на частоте 2,45 ГГц, при этом затухание равно –31 дБ. По (1) получено, что разность задержек мод равна 204 пс, это подтверждает результаты, полученные во временной области.

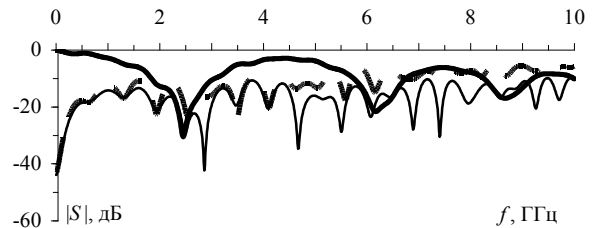


Рис. 10. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (— — —), $|S_{21}|$ (— — —), $|S_{12}|$ (---)

Результаты моделирования временного отклика спиралевидной структуры (рис. 11) представлены на рис. 12. Видно, что начальный импульс разложился на два импульса с разностью задержек 370 пс. Амплитуда входного сигнала равна 0,53 В, а выходных – 0,09 и 0,11 В.

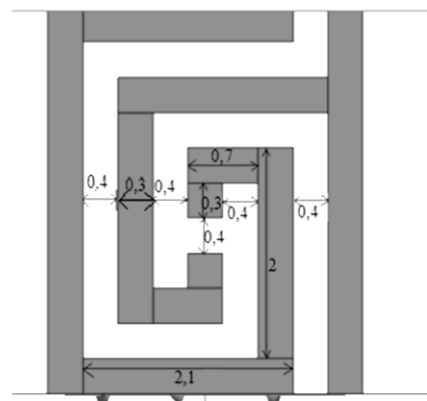


Рис. 11. Дополнительный рисунок с размерами спиралевидной структуры

Вычисленные частотные зависимости приведены на рис. 13. Видно, что максимальное значение коэффициента отражения достигает –15 дБ. Полоса

пропускания (-3 дБ) составила 620 МГц. Резонанс наблюдается на частоте 1,5 ГГц, при этом затухание равно -40 дБ. По (1) разность задержек мод равна 331 пс, это подтверждает результаты, полученные во временной области.

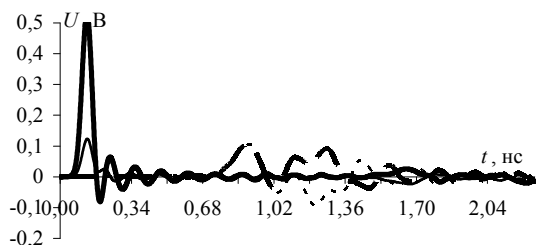


Рис. 12. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (---) проводников; в конце активного (— — —) и пассивного (---) проводников

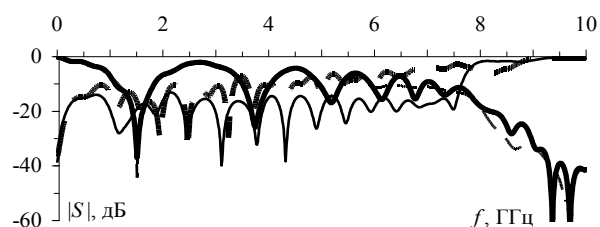


Рис. 13. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (— — —), $|S_{21}|$ (— — —), $|S_{12}|$ (---)

Сравнение результатов моделирования

Краткие результаты моделирования для сравнения представлены в таблице.

При изменении области связи наблюдалось увеличение разности задержек. Так, в исходной структуре погонная разность задержек равна 860 пс/м, а в спиралевидной – 3,7 нс/м. Объясняется это тем, что из-за усложнений структуры нечетная мода проде-

лывает наибольший путь до выхода МФ, это увеличивает разность задержек мод.

Разность задержек мод и ослабление СКИ для исследуемых структур

	Исходная	Встречно-штыревая	Г-образная	Спиралевидная
Разность задержек, пс	86	76	200	370
Ослабление СКИ	2,3	2,3	3,7	5

Заключение

Таким образом, исследовано влияние периодического профиля области связи МФ на разность задержек мод сигнала. Вычислены частотные характеристики МФ при изменении геометрии периодического профиля, а также временные отклики на воздействие сверхкороткого импульса на рассматриваемые структуры. Предложены решения по совершенствованию конструкции МФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Заболоцкий А.М. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, И.Ф. Калимулин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 288 с.
2. Хажикбеков Р.Р. Изменение задержки нечетной моды с помощью периодического профиля области связи проводников модального фильтра // Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2017». – Томск: В-Спектр, 2017. – 3 с.
3. Stephen H. Hall. Advanced signal integrity for high-speed digital designs // Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2009. – 608 p.
4. Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств среде CST MicrowaveStudio. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 150 с.

УДК 04.514

А.А. Квасников, С.П. Куксенко, Е.В. Лежнин

Разработка подсистем графического интерфейса системы TALGAT

Реализован интерактивный редактор данных для одновариантного и многовариантного анализа полосковых структур. Усовершенствованы средства визуального отображения и средства интерактивной работы с элементами в редакторе принципиальных схем.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, электромагнитная совместимость, полосковые структуры, TALGAT, QML, QT.

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является актуальной, помимо прочего, из-за увеличения количества радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), работающей в ограниченном пространстве. Подобные тенденции стали приводить к нарушению работы РЭА из-за взаим-

ных электромагнитных помех. Задача обеспечения ЭМС РЭА зачастую связана с дорогостоящими и длительными испытаниями. Выявление и устранение недостатков приводят к задержкам рабочего графика и финансовым затратам. Ранний учет ЭМС позволяет избежать подобных проблем, поэтому