

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

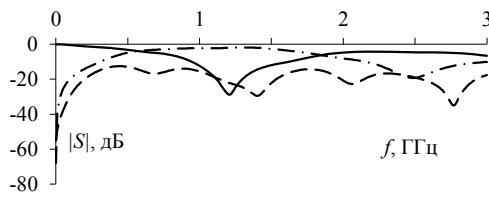


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (---), $|S_{21}|$ (—), $|S_{41}|$ (- · -) для встречно-штыревой структуры после оптимизации

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 ширины 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.

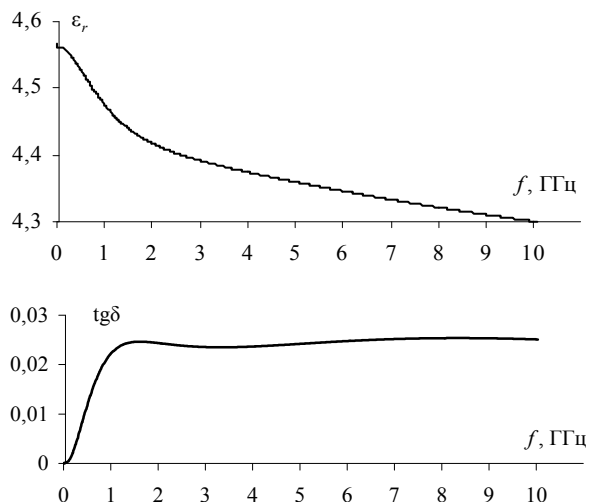


Рис. 1. Зависимости ϵ_r и $\text{tg}\delta$ от частоты для FR-4 [4]

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).

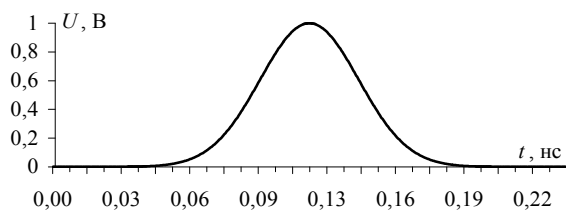


Рис. 2. Гауссов импульс

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.

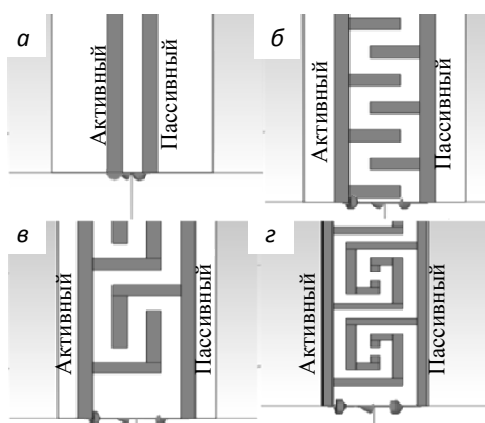


Рис. 3. Структуры для моделирования: исходная (а); встречно-штыревая (б); L-образная (в); спиралевидная (г)

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.

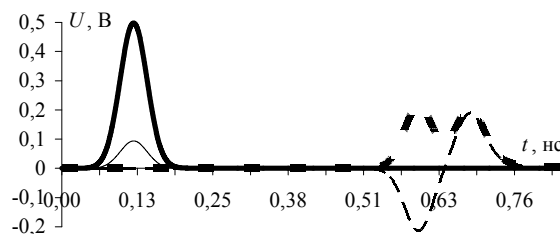


Рис. 4. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (—) проводников; в конце активного (— — —) и пассивного (— — —) проводников

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.

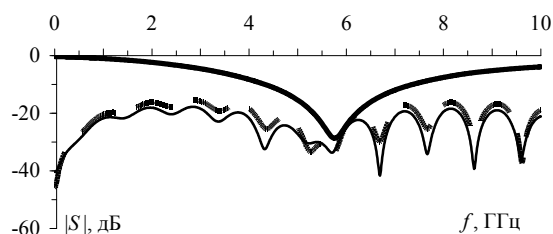


Рис. 5. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (- - -), $|S_{21}|$ (— — —), $|S_{12}|$ (- - -)

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

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.

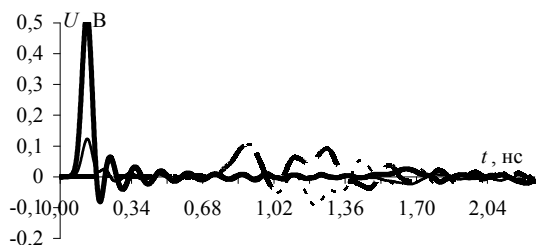


Рис. 12. Временные отклики для исходной структуры в начале активного (—) и пассивного (---) проводников; в конце активного (— — —) и пассивного (---) проводников

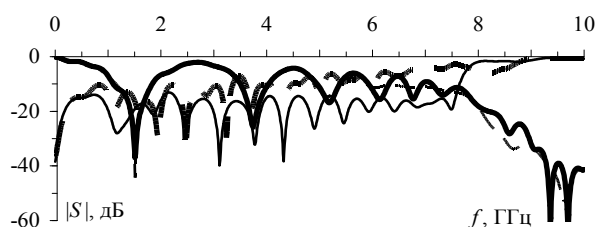


Рис. 13. Частотные зависимости: $|S_{11}|$ (—), $|S_{22}|$ (— — —), $|S_{21}|$ (— — —), $|S_{12}|$ (---)

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