

В табл. 2 приведены оценки ускорения многократного вычисления матрицы  $S$  за счет использования алгоритмов перенумерации элементов матрицы СЛАУ и блочного  $LU$ -разложения для ее решения. Сравнение выполнено с исходным алгоритмом вычисления емкостной матрицы, основанным на последовательной версии  $LU$ -разложения для решения СЛАУ, при изменении толщины проводников для структуры 1, в которой число подынтервалов  $N = 1100$ . Вычисления выполнялись при изменении толщины одного из проводников. Количество изменений составляло  $2^k$ . Отношение  $N_A/N$  характеризует количество изменяемых элементов матрицы. Для первой структуры оно составило 0,73, для второй – 0,82. Оценки приведены с учетом затрат на формирование матрицы  $S$  и без учета. Аналогичные результаты для структуры 2 ( $N=1700$ ) сведены в табл. 3.

Таблица 2  
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы  $S$  для двухпроводной полосковой линии передачи при  $N_A/N=0,73$

$k$	Аналитические		Вычислительные
	без $Q_S, Q_1, Q_{13}$	с $Q_S, Q_1, Q_{13}$	
5	1,38	1,59	1,93
6	1,43	1,64	1,93
7	1,46	1,66	1,97
8	1,47	1,67	2,01

Таблица 3  
Оценки ускорения многократного вычисления матрицы  $S$  для трехпроводной полосковой линии передачи при  $N_A/N=0,82$

$k$	Аналитические		Вычислительные
	без $Q_S, Q_1, Q_{13}$	с $Q_S, Q_1, Q_{13}$	
4	1,68	1,86	2,75
5	1,90	2,07	2,83
6	2,03	2,20	2,72
7	2,11	2,27	2,78
8	2,15	2,30	2,68
9	2,17	2,32	2,69

Из табл. 2 видно, что оценки хорошо согласуются между собой. С учетом затрат на формирова-

ние матрицы  $S$  расхождение между аналитическими и вычислительными оценками составляет порядка 17%. Для трехпроводной линии (см. табл. 3) оценки в целом согласуются, а наибольшее расхождение составляет (с учетом затрат на формирование матрицы  $S$ ) 32%. Таким образом, полученные оценки показывают, что для рассмотренных структур использование перенумерации позволяет ускорить многократное вычисление матрицы  $S$  порядка 2 раз. Также можно сделать вывод, что чем больше отношение  $N_A/N$ , тем выше эффективность применения перенумерации с точки зрения минимизации временных затрат.

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

#### Литература

1. Суровцев Р.С. Многократное вычисление емкостной матрицы системы проводников и диэлектриков с изменяющимися параметрами с помощью блочного  $LU$ -разложения при решении СЛАУ / Р.С. Суровцев, С.П. Куксенко, Газизов Т.Р. // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13, №4. – С. 375–384.
2. Газизов Руст. Р., Лежнин Е.В., Куксенко С.П. Оценки использования перенумерации подынтервалов границ проводников и диэлектриков при многовариантном анализе полосковых структур // Матер. науч.-техн. конф. «Микроэлектроника и информатика–2017»: сб. ст. – Москва, Зеленоград, 19–20 апреля 2017 г. – М.: МИЭТ, 2017. – С. 14–20.
3. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 22 с.
4. Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Аналитическая оценка вычислительных затрат на решение СЛАУ при многократном вычислении емкостной матрицы в диапазоне изменения диэлектрической проницаемости диэлектриков // Зап. научн. семин. ПОМИ. – 2014. – Т. 428. – С. 196–207.
5. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиотехники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

УДК 621.371.32

Р.Р. Хажибеков

## Оптимизация параметров встречно-штыревой топологии модального фильтра для Ethernet 100 Мбит/с

Выполнена оптимизация модального фильтра со встречно-штыревой топологией в области связи. Получены параметры для МФ, позволяющего защитить оборудование Ethernet 100 Мбит/с от сверхкороткого импульса длительностью до 2 нс.

**Ключевые слова:** устройство защиты, модальный фильтр, оптимизация, разность задержек мод.

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от сверхкороткого импульса (СКИ) предложены устройства защиты – модальные фильтры (МФ),

основанные на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за разности задержек мод [1]. Одним из

способов управления задержками мод является применение в связанных структурах периодического профиля области связи [2]. Известно [3], что модуль разности задержек мод для связанной линии (рис. 1) можно вычислить как

$$|\Delta\tau| = 1/(2 \cdot f_{180}), \quad (1)$$

где  $f_{180}$  – резонансная частота, на которой  $S_{21} = 0$ , а  $S_{41} = 1$ . Из (1) следует, что увеличить значение разности задержек мод можно уменьшением  $f_{180}$ .

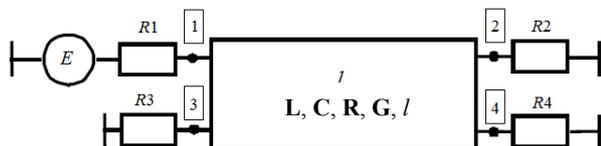


Рис. 1. Схема включения связанной линии

Важной задачей при создании устройств защиты на основе модальной фильтрации является увеличение разности задержек мод, чтобы увеличить длительность ослабляемых помеховых импульсов. Между тем решение этой задачи сопровождается уменьшением ширины полосы пропускания. Однако задачу увеличения разности задержек мод и сохранения требуемой полосы пропускания МФ можно решить путем оптимизации.

Цель работы – выполнить оптимизацию параметров МФ со встречно-штыревой топологией в области связи для реализации защиты оборудования Ethernet 100 Мбит/с от импульсов с максимальной длительностью.

Построение геометрической модели структуры, её моделирование и оптимизация выполнены в программе CST MWS. Оптимизация выполнялась с помощью алгоритма Trust Region Framework, который изменяет оптимизируемый параметр в пределах заданного доверительного интервала [4].

#### Моделирование исходной структуры

За основу взята структура МФ для Ethernet 100 Мбит/с (рис. 2) со следующими размерами: ширина проводника  $w = 0,3$  мм, толщина проводника  $t = 0,105$  мм, расстояние между проводниками  $s = 0,4$  мм, толщина диэлектрической подложки  $h = 0,29$  мм. В этой структуре активный (А) и пассивный (П) проводники расположены симметрично по отношению к оси, перпендикулярной опорному (О) и проходящей через его середину. Материал диэлектрической подложки МФ – FR-4 ( $\epsilon_r = 4,3$ ). Размеры структуры выбраны таким образом, что обеспечивались волновое сопротивление около 100 Ом и разность погонных задержек около 1 нс/м.

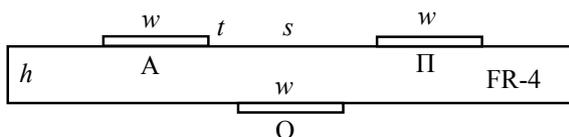


Рис. 2. Поперечное сечение исходной структуры МФ

Выполнено моделирование исходной структуры с учетом дисперсии и потерь. Для уменьшения вычислительных затрат длина структуры ( $l$ ) была

уменьшена до 0,1 м. Сопротивления резисторов  $R_1$ – $R_4$  равны 100 Ом. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из  $|S_{21}|(f)$  следует, что  $f_{180} = 6,135$  ГГц при ширине полосы пропускания 2,24 ГГц. Таким образом, есть большой резерв для уменьшения обеих частот.

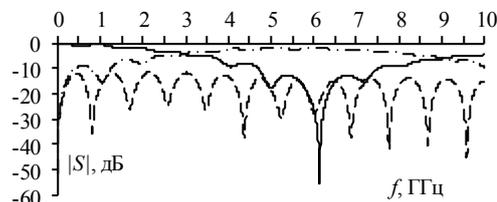


Рис. 3. Частотные зависимости для исходной структуры  $|S_{11}|$  (---),  $|S_{21}|$  (—),  $|S_{41}|$  (- · -)

#### Моделирование встречно-штыревой структуры

Встречно-штыревая структура (рис. 4) создана за счет добавления в области связи штырей длиной  $lv = 1,4$  мм. Расстояние между штырями  $s = 0,4$  мм, ширина штырей  $w = 0,3$  мм, длина структуры  $l = 0,1$  м. Вначале моделирование встречно-штыревой структуры выполнялось при значениях  $s$  и  $w$ , как у исходной структуры МФ.

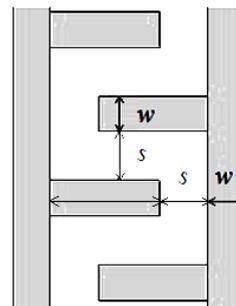


Рис. 4. Встречно-штыревая структура проводников

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Из  $|S_{21}|(f)$  следует, что  $f_{180} = 2,37$  ГГц, а полоса пропускания 0,895 ГГц.

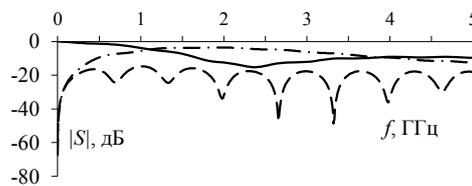


Рис. 5. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (---),  $|S_{21}|$  (—),  $|S_{41}|$  (- · -) для встречно-штыревой структуры при  $s = 0,4$  мм и  $w = 0,3$  мм

#### Оптимизация встречно-штыревой структуры

Выполнены оптимизация встречно-штыревой структуры по критериям максимизации коэффициента передачи ( $S_{12} \rightarrow 1$ ) в частотном диапазоне от 0 до 1 ГГц и минимизация первой частоты резонанса  $f_{180}$ . Доверительный интервал изменяемых параметров взят равным  $\pm 50\%$  при постоянной длине структуры. После оптимизации были получены значения параметров:  $s = 0,384$  мм и  $w = 0,18$  мм. S-параметры для оптимизированной структуры показаны на рис. 6 Из

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

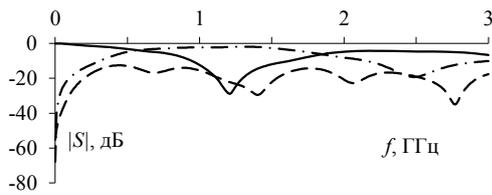


Рис. 6. Частотные зависимости  $|S_{11}|$  (---),  $|S_{21}|$  (—),  $|S_{41}|$  (- · -) для встречно-штыревой структуры после оптимизации

### 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 ( $\epsilon_r$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) приведены на