

Секция 13

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Газизов Тальгат Рашитович, зав. каф. ТУ, д.т.н.

УДК 621.391.825

Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов, А.М. Заболоцкий

Моделирование и разработка макета зеркально-симметричного модального фильтра

Выполнено предварительное имитационное моделирование зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) при реальных параметрах. Учтены конструктивные особенности МФ. Разработан макет зеркально-симметричного МФ, в котором максимальное напряжение в конце активного проводника в 7,57 раза меньше входного импульса общей длительностью 0,15 нс.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, зеркальная симметрия.

В настоящее время стремительное развитие и распространение радиоэлектронных устройств (РЭА) различного применения требует обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Особенно актуальна проблема повышенной восприимчивости к электромагнитным помехам, которая увеличивается вместе с ростом функциональных возможностей РЭА. Особо опасными представляются кондуктивные помехи, которые могут подаваться и проникать в аппаратуру непосредственно по проводникам. Для защиты РЭА от сверхкороткого импульса (СКИ) [1] предложена технология модальной фильтрации [2], основанная на явлении модального разложения импульсного сигнала на импульсы меньшей амплитуды из-за различия задержек мод [3]. Предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет зеркального добавления к существующей структуре дополнительных слоев диэлектрика и проводников [4]. Выполнена оптимизация параметров четырехпроводного зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) эвристическим поиском по двум критериям [5]. В [6] получены результаты оптимизации четырех структур зеркально-симметричного МФ по двум критериям и приведено сравнение результатов, полученных при оптимизации для каждой из структур. Кроме того, выполнена оптимизация зеркально-симметричного МФ по критериям минимизации максимальной амплитуды, выравнивания расстояний между импульсами разложения и выравнивания амплитуд импульсов на выходе линии. Между тем экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в зеркально-симметричной структуре ранее не выполнялось.

Цель работы – выполнить такое исследование.

Моделирование при реальных параметрах

Для эксперимента прежде всего необходимо изготoвить макет зеркально-симметричного МФ. Для

этого целесообразно выполнить предварительное моделирование и оптимизацию параметров с учетом технологических возможностей изготовителя: минимальная ширина проводника и минимальный зазор между проводниками (s , w), равные 200 мкм при толщине фольги (t), равной 18 мкм и 250 мкм при $t = 35$ мкм; толщина диэлектрика (h), равная 500, 1000, 1500, 2000 мкм. Также необходимо выполнить трассировку печатной платы (ПП).

Поперечное сечение исследуемой структуры представлено на рис. 1.

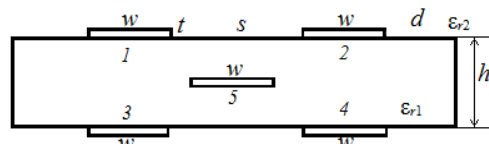


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричного МФ

Принципиальная электрическая схема четырехпроводного зеркально-симметричного МФ представлена на рис. 2, а, а форма входного сигнала – на рис. 2, б.

Вычисление параметров линий и форм сигнала выполнялось в системе TALGAT [7]. Значения резисторов взяты равными $R_{\Gamma} = R_{\Pi} = R = 50$ Ом. Длина линии $l = 1$ м. Потери в диэлектриках и проводниках учтены. Источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС = 5 В трапециевидного сигнала: длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс.

Выполнена оптимизация по следующим критериям: минимизация максимальной амплитуды, выравнивание интервалов между импульсами разложения и выравнивание амплитуд импульсов на выходе линии. Получены следующие параметры для сравнительного моделирования с учетом и без учета потерь: $s = 500$ мкм, $w = 1600$ мкм, $t = 18$ мкм и

$h = 500$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0,017$, измеренные на частоте $f = 1$ МГц. Между тем минимальное расстояние от края макета до проводников, необходимое для обеспечения монтажа надлежащего качества, устанавливается равным $0,3$ мм [8], в связи с этим оптимальное значение $d = 2w = 3200$ мкм.

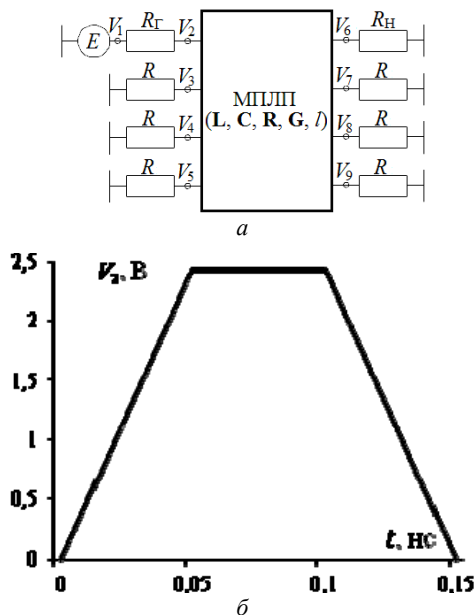


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема для моделирования (а) и форма сигнала на входе МФ (б)

На рис. 3 приведены формы сигналов на выходе зеркально-симметричного МФ при моделировании с учетом и без учёта потерь. Видно, что данные параметры позволяют получить выравненные временные интервалы между импульсами разложения.

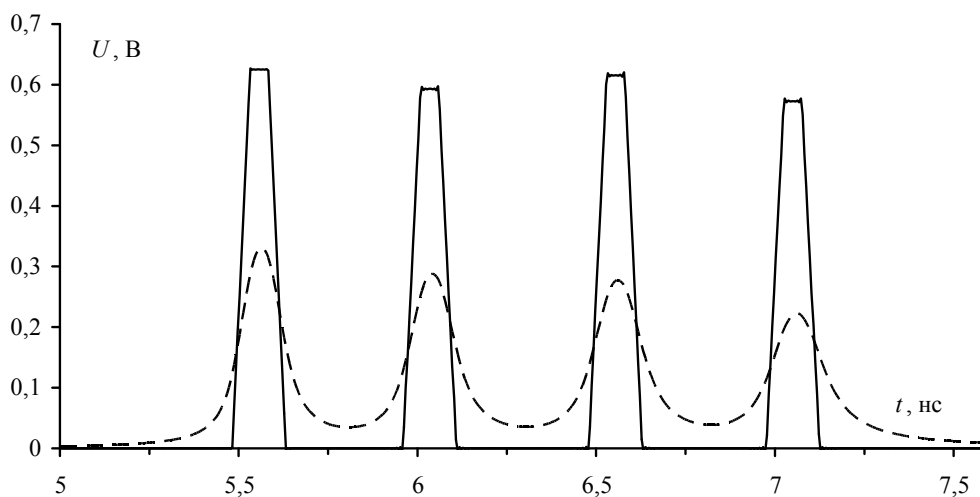


Рис. 3. Форма сигнала на выходе зеркально-симметричного МФ при моделировании с учетом (—) и без учёта (---) потерь

В табл. 1 приведены значения амплитуд импульсов на выходе, разницы погонных задержек, а также волнового сопротивления. Получено, что при моделировании без учета потерь максимальный уровень напряжения в конце активного проводника составляет $0,626$ В (что в $3,99$ раза меньше входного сигнала) и $0,33$ В при моделировании с учётом потерь (что в $7,57$ раза меньше входного сигнала).

Из табл. 1 видно, что потери влияют только на уровень амплитуд импульсов разложения. Однако из рис. 3 видно, что в результате моделирования с учётом потерь время нарастания сигнала многократно, причем некаузально возросло так же, как и время спада, что привело к наложению импульсов. Как показано в [9], это связано с неучетом частотной зависимости диэлектрической проницаемости при моделировании с учетом потерь.

Трассировка печатной платы макета

На основе полученных данных выполнена трассировка макета печатной платы (ПП) в Altium Designer [10].

При этом учитывались следующие особенности: опорный проводник находится в диэлектрике между верхним и нижним слоями; длина МФ равна 1 м, а размеры ПП составляют 27×30 см, поэтому линия выполнена в форме меандра с минимальной связью между витками. Для минимизации взаимовлияния полувитков между ними выбрано максимальное расстояние, а именно $5w$.

Для установки согласующих резисторов и SMA-соединителей использована контактная площадка (КП) размером $0,85 \times 2,8$ мм. В ней для обеспечения соединения с опорным проводником расположены три металлизированных отверстия диаметром $0,2$ мм, выведенные на верхний и нижний слой ПП (рис. 4, б).

Таблица 1

Результаты моделирования зеркально-симметричного МФ с учетом и без учета потерь

| | $U_1, \text{В}$ | $U_2, \text{В}$ | $U_3, \text{В}$ | $U_4, \text{В}$ | $Z, \text{Ом}$ | $\Delta t_1, \text{нс}$ | $\Delta t_2, \text{нс}$ | $\Delta t_3, \text{нс}$ |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Без потерь | 0,626 | 0,593 | 0,62 | 0,577 | 52,8 | 0,49 | 0,52 | 0,47 |
| С потерями | 0,33 | 0,288 | 0,277 | 0,222 | 52,8 | 0,49 | 0,52 | 0,47 |

Таблица 2

| Размеры резистора типа 0603 | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Типоразмер EIA | Типоразмер метрический | L , мм | W , мм | H , мм | D , мм | T , мм |
| 0603 | 1608 | $1,6 \pm 0,1$ | $0,85 \pm 0,1$ | $0,45 \pm 0,05$ | $0,3 \pm 0,2$ | $0,3 \pm 0,2$ |

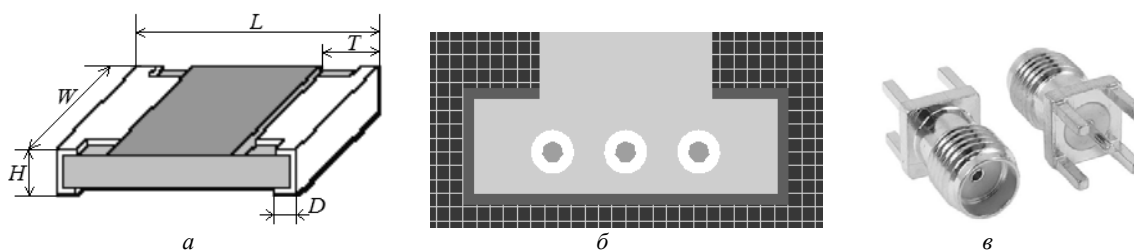


Рис. 4. Резистор типа 0603 (а); КП, обеспечивающая соединение с опорным проводником (б), и SMA-соединитель (в)

Для обеспечения согласованности тракта 50 Ом используется резистор типа 0603 сопротивлением 50 Ом (рис. 4, а), его размеры представлены в табл. 2. Для последующего монтажа резисторов на концы пассивных линий установлены КП размером $1,7 \times 0,925$ мм, расстояние между опорной КП и КП для резистора равно 1 мм.

Для соединения макета с измерительным трактом необходимо установить SMA-соединитель (рис. 4, в). Для его монтажа на конец активной линии установлена КП размером $0,85 \times 0,925$ мм, расстояние между опорной КП и КП для SMA-соединителя равно 4 мм.

Заключение

Таким образом, выполнено моделирование зеркально-симметричного МФ при оптимизированных параметрах с учетом и без учета потерь. Разработан макет зеркально-симметричного МФ длиной $l=1$ м (рис. 5). Получено, что при моделировании без учета потерь максимальный уровень напряжения на конце активного проводника составляет 0,626 В, что в 3,99 раза меньше входного сигнала, а при моделировании с учётом потерь получено напряжение 0,33 В, что в 7,57 раза меньше входного сигнала. В дальнейшем планируется изготовить ПП по созданной топологии, выполнить натурный эксперимент и сравнить результаты эксперимента с результатами моделирования.

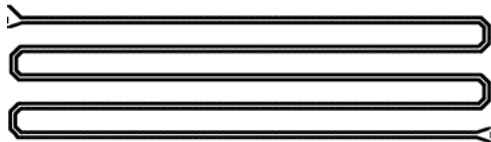


Рис. 5. Макет зеркально-симметричного МФ (верхний слой)

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

Литература

1. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 8 July 2014. – Note 41.
2. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – №4 (19). – С. 40–44.
3. Заболоцкий А.М. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
4. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 41–44.
5. Черникова Е.Б., Белоусов А.О. Оптимизация параметров зеркально-симметричного модального фильтра по двум критериям // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017», г. Томск, 10–12 мая 2017. – Томск, 2017. – С. 95–97.
6. Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Заболоцкий А.М. Параметрическая оптимизация зеркально-симметричных полосковых модальных фильтров по двум критериям // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, Россия, 4–5 мая 2017. – Красноярск, 2017. – С. 3–6.
7. Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. et al. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments // Advances in Intelligent Systems Research // Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). August 23–24, 2015, Phuket, Thailand. – PP. 293–301.
8. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
9. Салов В.К., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Получение частотной зависимости диэлектрической проницаемости диэлектрика резонаторным методом // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2014. – Т. 57, №6. – С. 134–136.
10. Сабунин А.Е. Altium designer: новое поколение в проектировании электронных устройств. – М.: Солон-пресс, 2009. – 432 с.