

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.3>

УДК: 621.391.825

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ СТРУКТУРЫ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

С.В. Власов, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2024 г.

Аннотация. На данный момент огромные объемы данных передаются в дифференциальном режиме при помощи стандартов LVDS, USB, CAN, RS-485 и Ethernet. Полупроводниковые элементы и компоненты в приемных и передающих цепях данных интерфейсов уязвимы к сверхширокополосным (СШП) импульсным воздействиям. В данной работе рассмотрена возможность снижения уровня СШП-помехи за счет модального фильтра, работающего в дифференциальном режиме. С помощью электродинамического моделирования получены S -параметры, используемые для анализа временных и частотных характеристик. Показано ослабление СШП помехи в 6,19 раз. Для оценки опасности помехи выполнен анализ значений N -норм, который показал, что исследуемая структура позволяет снизить опасность СШП помехи для оборудования. Значение N_1 уменьшилось в 6,19 раза, N_2 – в 10,18 раза, N_3 – 1,51 раза, N_4 – 4,32 раза, N_5 – в 5,1 раза. Выполнен анализ целостности полезного сигнала, для этого получены глазковые диаграммы. Выявлено, что для битовых скоростей до 1350 Мбит/с значительных искажений полезного сигнала не наблюдается.

Ключевые слова: полосковая структура, помехозащитные устройства, электродинамическое моделирование, сверхширокополосная помеха, N -нормы, дифференциальный режим, полезный сигнал.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Автор для переписки: Власов Сергей Владиславович, vlasov.s@tu.tusur.ru

Введение

На данный момент радиоэлектронная аппаратура (РЭА) выполняет прием, передачу и обработку огромных объемов данных. Чтобы обеспечить надежную и эффективную передачу таких объемов информации, широко используются различные стандарты связи, включая LVDS, USB, CAN, RS-485 и Ethernet [1]. Для реализации данных стандартов применяется низковольтная и высокочастотная РЭА, которая может быть уязвима к электромагнитным помехам. Особую опасность представляют сверхширокополосные (СШП) помехи. Источниками и причинами возникновения таких помех могут быть мощные генераторы помех [2], силовые и коммутационные цепи, переключаемые сетевые нагрузки [3] и т.д. Из-за широкого спектра СШП импульс может проникать практически в любые узлы и блоки РЭА, повреждая при этом чувствительное полупроводниковое оборудование. Для защиты в таких случаях применяют помехоподавляющие фильтры, однако у них есть ряд недостатков. Время срабатывания варисторов и разрядников может значительно превышать длительность СШП помехи, а быстродействующие ограничители обладают паразитными параметрами. Кроме того, при воздействии СШП помехи на оборудование, энергия не успевает распределиться по элементам структуры, что приводит к локализации энергии в одной точке, в которой может значительно вырасти вероятность отказа чувствительного оборудования [4].

Для эффективной защиты от импульсных СШП помех используются устройства, основанные на принципе модальных искажений, которые появляются при прохождении СШП импульса по линии с неоднородным

диэлектрическим заполнением, состоящей из N проводников (не считая опорного). Данные искажения позволяют разложить помеховый импульс на N импульсов с меньшей амплитудой. Это происходит из-за различия фазовых скоростей мод [5]. Существует ряд защитных устройств на основе данного явления, в частности, модальные фильтры (МФ) [6,7,8]. Одним из таких устройств является зеркально-симметричный модальный фильтр. Так, за счет зеркальной симметрии достигается ослабление СШП помехи более чем в четыре раза. Данная структура является простой в анализе, так как проводники симметричны относительно друг друга и между ними обеспечивается одновременно и лицевая, и боковая электромагнитные связи. Такой МФ подавляет СШП помеху, распространяющуюся на любом из проводников, с одинаковой эффективностью. Ранее, в [9, 10] анализировался МФ в частотной и временной областях. Такая структура показала эффективность защиты, как от сверхкороткого импульса, так и от электростатического разряда [11]. Ввиду симметрии предложенного МФ, его можно использовать в дифференциальном режиме для передачи данных. Целью данной работы является проведение исследования предложенной структуры в дифференциальном режиме.

1. Структура и схема включения

Поперечное сечение МФ представлено на рис. 1, и представляет собой четырехпроводную связанную линию передачи, сигнальные проводники которой располагаются на внешних слоях печатной платы, а опорные на внутренних. При этом сигнальные проводники попарно образуют дифференциальные пары. Геометрические параметры структуры: расстояние между проводниками $s = 700$ мкм, ширина проводников $w = 325$ мкм, толщина проводников $t = 35$ мкм, толщина ядра платы $h_1 = 210$ мкм, толщина препрегов $h_2 = 510$ мкм, длина линии $l = 1$ м. При моделировании структуры использовались два диэлектрика с однородным диэлектрическим заполнением. Для препрега относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{r1} = 4,4$, а тангенс угла

диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_1 = 0,015$, тогда как для ядра $\epsilon_{r2} = 4,6$ и $\text{tg}\delta_2=0,018$, соответственно.

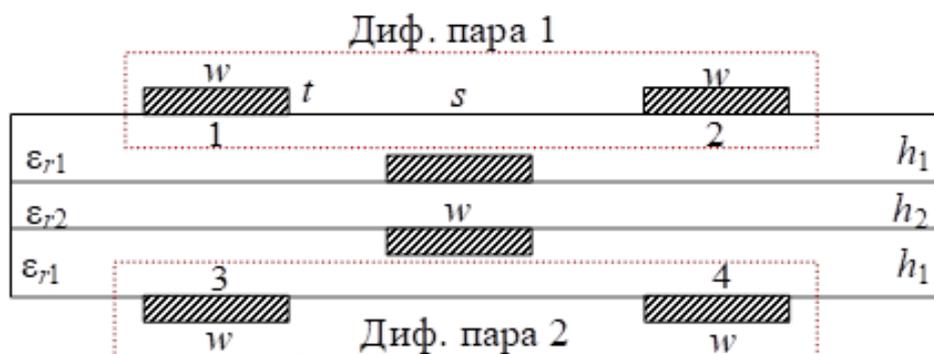


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричного МФ [9].

Эквивалентная схема включения структуры в дифференциальном режиме представлена на рис. 2. Источник ЭДС с внутренним сопротивлением R подключается на вход дифференциальной пары 1, конец дифференциальной пары 1 нагружен на сопротивление R , дифференциальная пара 2 нагружена на сопротивление R с обеих сторон. Номиналы всех резисторов выбраны по 100 Ом. Два центральных проводника, расположенных на втором и третьем слое являются заземляющими.

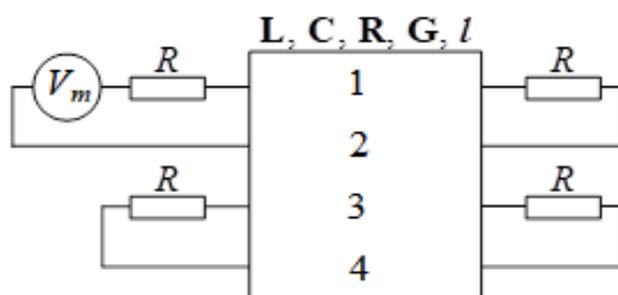


Рис. 2. Эквивалентная схема включения структуры в дифференциальном режиме.

Для анализа влияния СШП помехи на РЭА использовались N -нормы. В табл. 1 приведены анализируемые нормы и их характеристики, представленные в [12]. Их можно использовать для оценки возможности электрического пробоя, выгорания электронных компонентов и т. д. Расчет N -норм основан на применении математических операторов ко всей форме волны.

Таблица 1. N -нормы и их характеристики.

№	Формула	Название	Применение
N_1	$N_1 = U(t) _{max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
N_2	$N_2 = \left \frac{\delta U(t)}{\delta t} \right $	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
N_3	$N_3 = \left \int_0^t U(t) \right _{max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой
N_4	$N_4 = \int_0^\infty U(t) dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
N_5	$N_5 = \left\{ \int_0^\infty R(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

2. Анализ во временной области

Для исследования характеристик структуры использовали электродинамический подход. При использовании такого подхода для моделирования структуры решаются уравнения Максвелла, которые учитывают все типы волн. Это повышает точность расчетов, но также приводит к большим вычислительным затратам даже при моделировании простых конфигураций [13].

В качестве воздействующей помехи использовали импульс с амплитудой 1 В, представленный в [14]. В результате воздействия такого импульса на структуру наблюдается ослабление амплитуды. На рис. 3 представлен результат моделирования структуры во временной области на воздействие помехового импульса.

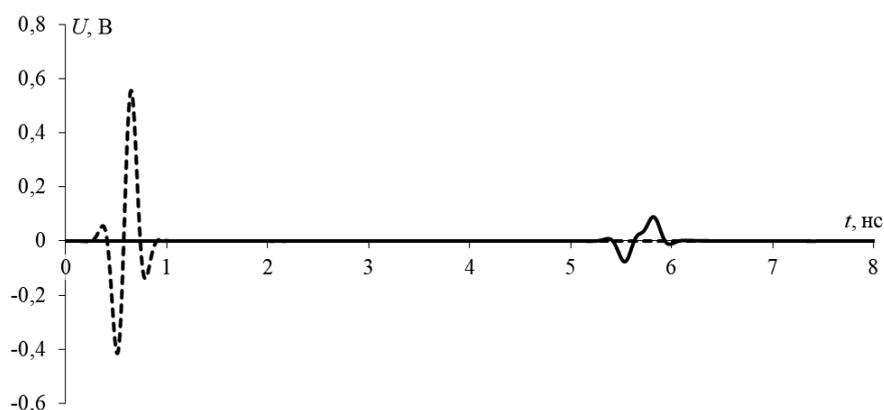


Рис. 3. Временной отклик на входе (•••) и на выходе (—).

Результаты моделирования показали ослабление амплитуды помехи в 6,19 раза. Задержка импульса составила 5,28 нс. Время задержки импульса определялось, как 10% от максимального значения импульса. Полученные N -нормы приведены в таблице 2, они были вычислены в начале и в конце активной линии. Первая норма уменьшилась в 6,19 раз, вторая – в 10,18, третья – в 1,51, четвертая – в 4,32, а пятая уменьшилась в 5,1 раза.

Таблица 2. Вычисленные значения N -норм.

	N_1	$N_2 (10^9)$	$N_3 (10^{-12})$	$N_4 (10^{-10})$	$N_5 (10^{-6})$
Вход	0,557	11,48	9,17	1,14	6,15
Выход	0,090	1,13	6,08	0,63	1,21

3. Анализ в частотной области

Результаты электродинамического моделирования частотных зависимостей коэффициента передачи $|S_{21}|$ и коэффициента отражения $|S_{11}|$ представлены на рис. 4.

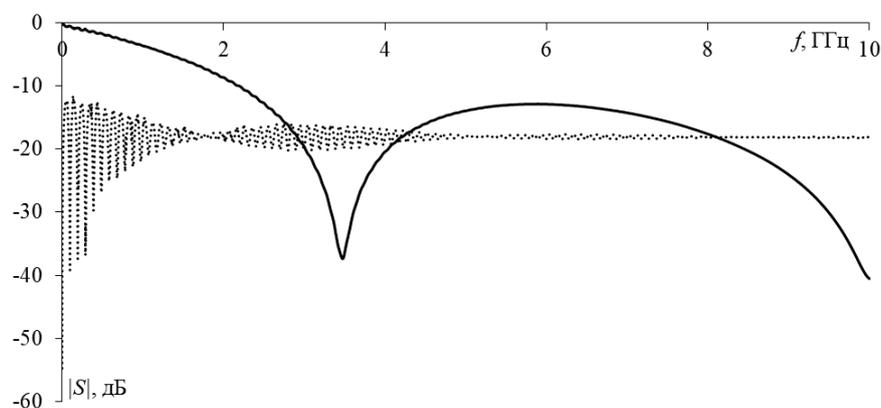


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{21}|$ (—) и $|S_{11}|$ (---).

Моделирование проводилось в диапазоне до 10 ГГц. Частота среза по уровню -3 дБ, составила 833 МГц. На частоте 3,44 ГГц наблюдается резонанс со значением $-36,4$ дБ. Значения коэффициента отражения от входа в полосе пропускания не превышает -13 дБ, с увеличением частоты коэффициент отражения от входа имеет постоянное значение, равное $-18,4$ дБ.

4. Анализ целостности полезного сигнала

Для анализа целостности полезного сигнала на вход исследуемой структуры подавалась псевдослучайная битовая последовательность (ПСБП) длиной 10000 бит. Битовая скорость выбрана 310, 830 и 1350 Мбит/с. Сигнал со скоростью 310 Мбит/с находится внутри полосы пропускания. Сигнал со скоростью 830 Мбит/с находится на границе полосы пропускания, а сигнал со скоростью 1350 Мбит/с находится за пределами полосы пропускания. Длительность фронта и спада импульса составили по 0,32, 0,12, 0,073 нс, соответственно. На рис. 5 представлены глазковые диаграммы.

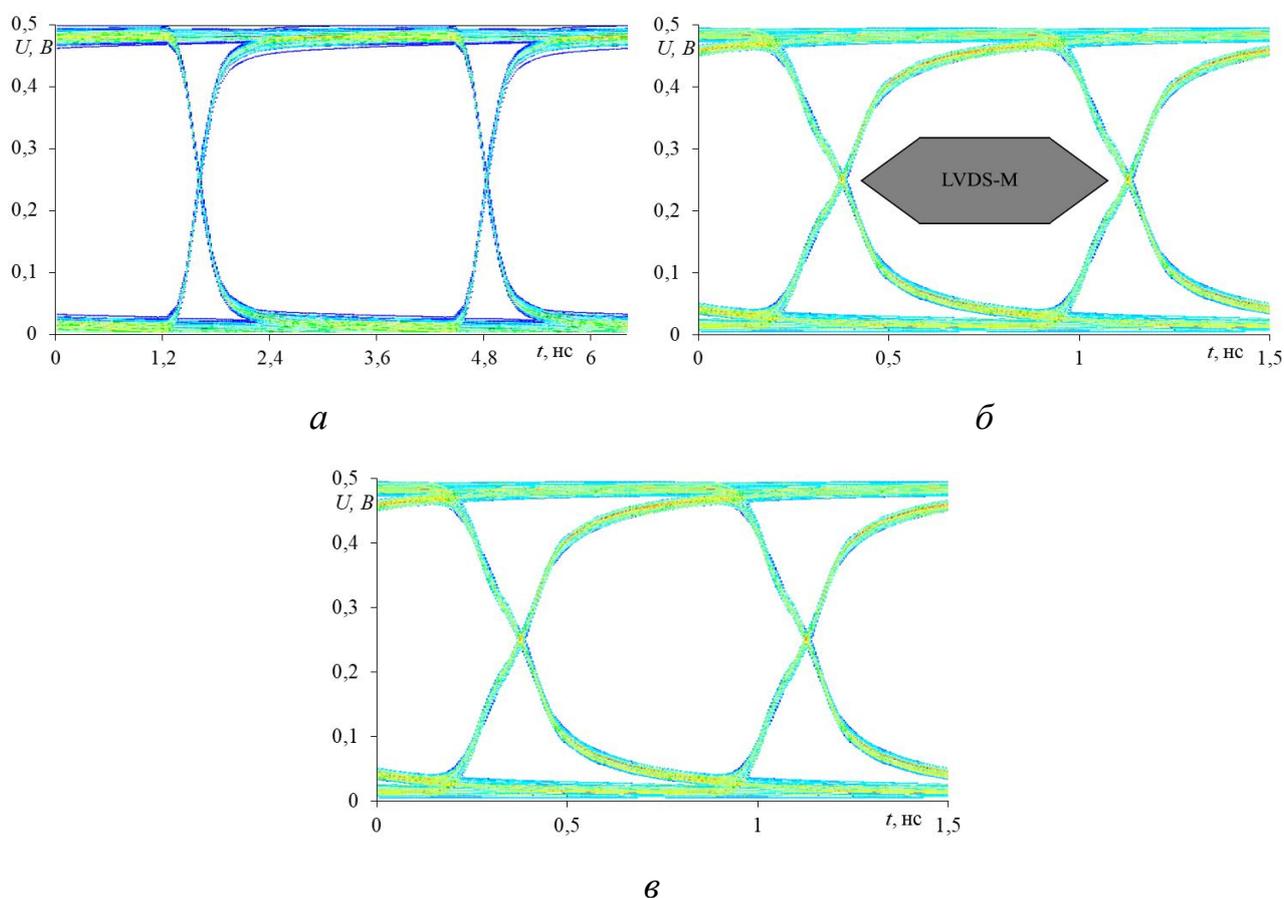


Рис. 5. Глазковые диаграммы для ПСБП со скоростью 310 Мбит/с (а), 830 Мбит/с (б) и 1350 Мбит/с (в).

Выявлено, что надёжная передача данных возможна на скорости до 1350 Мбит/с. При данном значении высота «глаза» составляет 0,707 от уровня сигнала на входе. В табл. 3 представлены основные параметры полученных глазковых диаграмм.

Таблица 3. Параметры глазковых диаграмм.

Скорость, Мбит/с	Среднеквадратичное фазовое отклонение, пс	Ширина глаза, нс	Высота глаза, мВ	Отношения сигнал/шум
310	32,26	3,211	428	33,67
830	18,07	1,188	409	20,33
1350	14,81	0,736	376	14,92

При увеличении скорости передачи данных возможно появление нежелательных эффектов, таких как увеличение шумов и помех в линии связи, что в свою очередь может привести к росту среднеквадратичного фазового отклонения и уменьшению открытия «глаза». Дальнейшее увеличение скорости передачи данных может ухудшить качество передачи информации и увеличить количество битовых ошибок.

Заключение

В данной работе исследована зеркально-симметричная структура, работающая в дифференциальном режиме. Получены временные отклики на СШП помеху, ослабление амплитуды которой составило 6,19 раза. Проведено исследование частотных характеристик в диапазоне до 10 ГГц. Частота среза по уровню -3 дБ составила 833 МГц. Рассчитаны значения N -нормы дифференциальной линии 1. Все значения N -норм на выходе меньше, чем на входе. Так, для N_1 – в 6,19 раз, N_2 – в 10,18 раза, N_3 – в 1,51, N_4 – в 4,32, N_5 – в 5,1 раз. Анализ целостности полезного сигнала показал, что передача сигнала без видимых искажений возможна на скорости до 1,35 Гбит/с. Данная структура может быть использована как для защиты, так и для передачи полезного сигнала, например, в стандартах LVDS, USB, CAN, RS-485 или Ethernet. Недостатком данной структуры являются относительно большие габариты. Перспективы дальнейших исследований включают изготовление такого МФ в миниатюрном исполнении и проведение лабораторных экспериментов для более детального изучения и определения ее характеристик.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Instruments T. Interface circuit for tia/eia-644 (lvds) //SLLA038B, Application notes, Texas Instruments. – 2002.
2. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes*. 2014. Т. 41. №. ARTICLE.
3. Huang T. et al. Reconfigurable UWB pulse generator based on pulse shaping in a nonlinear optical loop mirror and differential detection //Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 5. – С. 6401-6408.
4. Захаров А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости. *Компоненты и технологии*. 2006. №5. С. 47–52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antologiya-vydayuschih-sya-dostizheniy-v-nauke-i-tehnike-chast-33-elektromagnitnaya-sovmestimost-i-zaschita-ot-vozdeystviya-moschnyh>
5. Газизов, Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов. *Технологии ЭМС*. 2006. №4 (19). С. 40–44
6. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. 2016. Vol. 58. no. 4. P. 1136–1142. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2548783>
7. Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P. A modal filter with a parallel oscillatory circuit in a passive conductor. *Postgraduate and master students' research in electronics and control systems*. 2020. Vol. 4, no.2. P. 323-326.
8. Zabolotsky A.M. Application of reflective symmetry for modal filtration improvement. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2015. V.36. no.2. P.41-44. <https://doi.org/10.3390/sym12071117>

9. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. №2. С. 162–179. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10208>
10. Власов С.В., Жечев Е.С. Анализ четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра в синфазном и дифференциальном режимах. Научная сессия ТУСУР – 2022.
11. Zhechev Y.S., Ivantsov I.A., Zabolotsky A.M. Multicriteria optimization of a four-layer reflection-symmetric modal filter parameters for ESD protection. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Т. 1862. №. 1. С. 012–023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012023>
12. Baum. C. Norms and Eigenvector norms // *Mathematics Notes*. – 1979. – Vol. 63.
13. Orlov P.E., Dolganov E.S., Gazizov T.R. Kvizistaticheskoe i ehlektrodinamicheskoe modelirovanie modal'nyh yavlenij v mnogoprovodnyh strukturah, Infokommunikacionnye tekhnologii. `2011. V.9. no.4. P.96–100. <https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823227>
14. IEC 61000-1-5-2004. Electromagnetic compatibility (EMC) –part 1-5: general – high power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems reference

Для цитирования:

Власов С.В., Жечев Е.С., Заболоцкий А.М. Анализ характеристик зеркально-симметричной полосковой структуры в дифференциальном режиме. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2025. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.3>