

УДК 621.37

П.В. Микола, Р.С. Суворцев

Анализ временного отклика витка меандровой микрополосковой линии из двух отрезков с разными параметрами

Представлен анализ временного отклика в конце витка меандровой микрополосковой линии из двух отрезков с разными параметрами. Продемонстрировано изменение формы и амплитуды сверхкороткого импульса на выходе линии и сделаны предположения о причинах наблюдаемых искажений.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, виток меандровой линии задержки, временной отклик.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) – важный этап при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС). Одним из аспектов ЭМС является обеспечение помехозащищенности РЭС. В связи с миниатюризацией современных устройств, а также уменьшением операционных напряжений и ростом верхней граничной частоты спектра используемых сигналов устройства становятся все более уязвимыми к повреждениям как от импульсного [1], так и от непрерывного [2] электромагнитных воздействий. Серьезную опасность представляют мощные сверхкороткие импульсы (СКИ) [3, 4]. Широкий спектр позволяет СКИ проникать внутрь РЭС через щели в корпусе. При воздействии СКИ на устройство поглощенная энергия излучения локализуется и за время импульса не успевает передаться окружающим элементам структуры [5]. Более высокая плотность энергии, чем при стационарном воздействии, способствует образованию дефектов в критических участках печатной платы РЭС.

Традиционные средства защиты на основе полупроводников или пассивные RC- и LC-фильтры не всегда могут обеспечить должную защиту из-за своих недостатков [4, 6], а для обеспечения защиты в диапазоне воздействий необходимы многоступенчатые устройства, что усложняет проектирование. Поэтому поиск и исследование новых путей эффективной защиты не теряет своей актуальности.

Примечательны полосковые устройства защиты, которые лишены большинства недостатков традиционных устройств, таких как ограниченный ресурс срабатываний и наличие полупроводниковых компонентов и паразитных параметров. В основе одного из видов таких устройств лежит явление модального искажения сигнала, которые возникают из-за различия скоростей распространения импульсов мод [7]. Защита достигается путем разложения помехового сигнала на последовательность импульсов за счет модальных искажений. Одним из устройств, использующих эти искажения, является виток меандровой линии, где СКИ в конце витка представлен последовательностью из трех основных импульсов: наводки и импульсов мод линии [8]. Выполнено много исследований подобных устройств защиты, однако нет анализа влияния нерегулярности поперечного сечения меандра на разложение СКИ. Это исследование целесообразно начать с исследования

витка меандровой линии из двух отрезков с разными параметрами. Цель данной работы – выполнить анализ отклика в конце витка меандровой линии из двух отрезков с разными параметрами на воздействие СКИ.

Исходные данные для моделирования

Для исследований выбран виток меандровой микрополосковой линии (МПЛ). Вид поперечного сечения каждого отрезка витка представляет собой связанную МПЛ (рис. 1). Исходные параметры поперечного сечения следующие: ширина и толщина проводника $w=500$ мкм и $t=100$ мкм соответственно, расстояние между проводниками $s=50$ мкм, толщина диэлектрической подложки $h=510$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=10$, расстояние от края структуры до проводника $d=3w$.

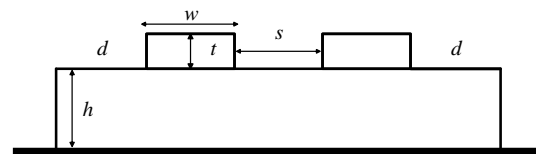


Рис. 1. Вид поперечного сечения линии

Схема соединений исследуемой линии с длиной полувитка $l=40$ см представлена на рис. 2. Она состоит из двух последовательно соединенных отрезков: оба отрезка состоят из двух параллельных проводников с длиной каждого $l_1=l_2=0,5l$. На ближнем конце один проводник первого отрезка соединен с идеальным источником ЭДС с внутренним сопротивлением R_1 , а второй – с нагрузкой, представленной сопротивлением R_2 . Проводники второго отрезка соединены на дальнем конце. Сопротивления R_1 и R_2 приняты равными 50 Ом. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В и длительностями фронта плоской вершины и спада импульса по 50 пс.

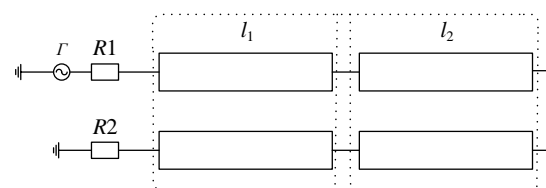


Рис. 2. Схема соединения исследуемой линии

На рис. 3 показана форма напряжения в конце линии при исходных, одинаковых для обоих отрез-

ков параметрах поперечного сечения. Как видно, наблюдаются три основных импульса: перекрестной наводки и нечетной и четной мод. Амплитуды импульсов составили 100, 237 и 245 мВ соответственно.

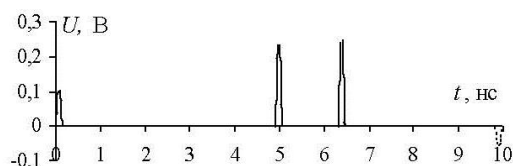


Рис. 3. Форма напряжения в конце линии при исходных параметрах

Изменение параметров первого отрезка

Сначала выполнено моделирование при $w_1=100$ и 1000 мкм при остальных исходных параметрах. Полученные формы напряжения в конце витка показаны на рис. 4.

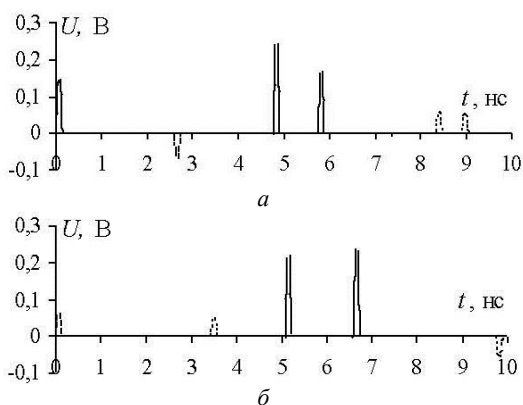


Рис. 4. Формы напряжения в конце линии при $w_1=100$ (а) и 1000 (б) мкм

Из форм напряжения при $w_1=100$ мкм видно, что перед импульсом нечетной моды появились два импульса разной полярности с амплитудами 36 и 57 мВ. Эти импульсы являются отражениями от стыка отрезков МПЛ. Амплитуды основных импульсов разложения составили 146, 244 и 167 мВ соответственно. Таким образом, уменьшение w_1 привело к существенному увеличению амплитуды импульса наводки и уменьшению амплитуды импульса четной моды. После основных импульсов также наблюдаются отраженные импульсы разной полярности. Причиной отражений является различие импедансов мод первого и второго отрезков.

Из форм напряжения при $w_1=1000$ мкм видно, что полярность отраженных импульсов между импульсом наводки и импульсами четной и нечетной мод изменилась: амплитуды первого и второго импульсов составили -23 и 57 мВ соответственно. Амплитуды основных импульсов разложения составили 67, 220 и 237 мВ соответственно. Таким образом, увеличение w_1 привело к существенному уменьшению амплитуды наводки, а амплитуды импульсов мод уменьшились незначительно.

Затем выполнено моделирование при $s_1=10$ и 100 мкм и остальных исходных параметрах. Полученные формы напряжения в конце витка меандровой линии показаны на рис. 5.

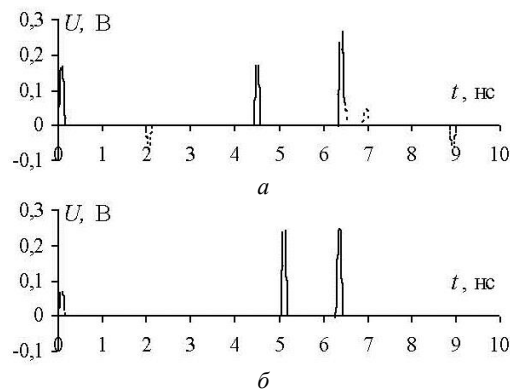


Рис. 5. Формы напряжения в конце линии при $s_1=10$ (а) и 100 (б) мкм

Из форм напряжения при $s_1=10$ мкм видно, что перед импульсом нечетной моды также наблюдаются два импульса разной полярности с амплитудами -54 и 3 мВ. Амплитуды основных импульсов разложения составили 168, 173 и 268 мВ соответственно. Таким образом, уменьшение s_1 привело к существенному уменьшению амплитуд наводки и импульса нечетной моды, а амплитуда импульса четной моды при этом увеличивается незначительно. После основных импульсов также наблюдаются отраженные импульсы разной полярности.

Из форм напряжения при $s_1=100$ мкм видно, что полярность отраженных импульсов между импульсом наводки и импульсами четной и нечетной мод изменилась: амплитуды первого и второго импульсов составили 22 и 3 мВ соответственно. Амплитуды основных импульсов разложения составили 75, 242 и 246 мВ соответственно. Таким образом, увеличение s_1 привело к более существенному уменьшению амплитуды наводки, а амплитуды импульсов мод при этом незначительно возрастают.

Изменение параметров второго отрезка

Сначала выполнено моделирование при $w_2=100$ и 1000 мкм при остальных исходных параметрах. Полученные формы напряжения в конце витка меандровой линии показаны на рис. 6.

Из форм напряжения при $w_2=100$ мкм видно, что перед импульсом нечетной моды также наблюдаются два импульса разной полярности с амплитудами 36 и 85 мВ. Амплитуды основных импульсов разложения составили 100, 231 и 213 мВ соответственно. Таким образом, уменьшение w_2 привело к уменьшению амплитуды импульса нечетной моды, при этом амплитуда наводки остается неизменной, а амплитуда импульса четной моды уменьшается незначительно. Из форм напряжения при $w_2=1000$ мкм видно, что полярность отраженных импульсов между импульсом наводки и импульсами четной и нечетной мод изменилась: амплитуды первого и второго импульсов составили 22 и -55 мВ соответственно. При этом амплитуды основных импульсов разложения составили 100, 234 и 232 мВ соответственно. Таким образом, увеличение w_2 привело лишь к незначительному (около 10 мВ) уменьшению амплитуд импульсов четной и нечетной мод линии.

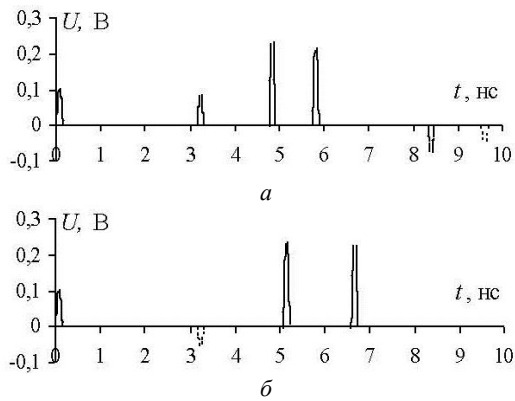


Рис. 6. Формы напряжения в конце линии при $w_2=100$ (а) и 1000 (б) мкм

Затем выполнено моделирование при $s_2=10$ и 100 мкм при остальных исходных параметрах. Полученные формы напряжения в конце витка меандровой линии показаны на рис. 7.

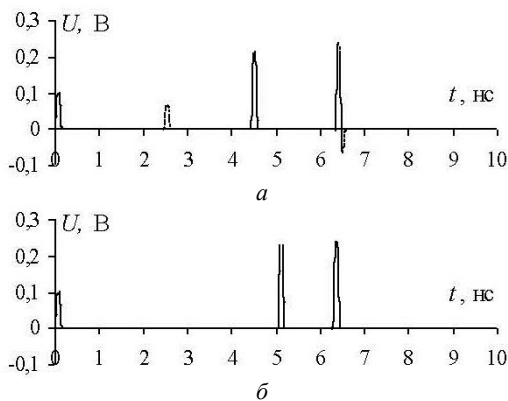


Рис. 7. Формы напряжения в конце линии при $s_2=10$ (а) и 100 (б) мкм

Из форм напряжения при $s_2 = 10$ мкм видно, что перед импульсом нечетной моды также наблюдаются два импульса положительной полярности с амплитудами 67 и 3 мВ. Амплитуды основных импульсов разложения составили 67, 215 и 244 мВ соответственно. Таким образом, уменьшение s_2 привело к существенному уменьшению амплитуд импульсов наводки и нечетной мод, а амплитуда нечетной моды практически не изменилась. После основных импульсов также наблюдаются отраженные импульсы разной полярности. Из форм напряжения при $s_2=100$ мкм видно, что полярность отраженных импульсов между импульсом наводки и импульсами четной и нечетной мод изменилась, а их амплитуды составили -21 и -4 мВ соответственно. Амплитуды основных импульсов разложения составили 101, 233 и 245 мВ соответственно. Таким образом, увеличение s_2 практически не оказывает влияния на амплитуды основных импульсов разложения (изменение менее 5 мВ).

Заключение

В работе представлен анализ временного отклика в конце витка меандровой МПЛ из двух отрезков с разными параметрами. При изменении ширины сигнальных проводников или расстояния между ними в конце линии наблюдаются три основных

импульса разложения (наводки, нечетной и четной мод линии), амплитуды которых изменяются, причем это изменение нелинейно. Между импульсами наводки и нечетной моды проявляются два отраженных импульса, которые могут изменять свою полярность в зависимости от параметров поперечного сечения отрезков. Причиной возникновения этих отражений является различие импедансов мод первого и второго отрезков. После основных импульсов к концу линии будут приходить разнополярные импульсы, которые также возникают из-за отражений сигнала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70020.

Литература

1. Мещеряков С.А. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при воздействии мощного СВЧ-импульса. Биполярные структуры // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 12. – С. 1–15.
2. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–3.
3. Гизатуллин З.М. Исследование электромагнитной совместимости локальных вычислительных сетей при наносекундных электромагнитных воздействиях / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 5. – С. 424–426.
4. Messier M.A. Response of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proc. of the 15th Int. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, Switzerland, Feb. 2003. – P. 127–132.
5. Егоров А.Б. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства / А.Б. Егоров, А.М. Сотников, И.Ф. Рыбалко // Сборник науч. тр. Донец. ин-та железнодорожного транспорта. – 2012. – № 29. – С. 49–54.
6. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.
7. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
8. Surovtsev R.S. Investigation of Possibility of Protection against Electrostatic Discharge Using Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky and T.R. Gazizov // Journal of Physics Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, № 2. – 6 p.

Микола Павел Владимирович

Магистрант каф. телевидения и управления
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Тел.: +7-952-891-57-21
Эл. почта: mikolapavell@gmail.com

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ ФИЭМС ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, 634050
Тел.: +7-913-858-16-12
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com