УДК 621.37

Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов

Исследование распространения сверхкороткого импульса в микрополосковой С-секции при изменении зазора между связанными проводниками

Показана актуальность исследования особенностей распространения сверхкоротких импульсов (СКИ) и локализации максимумов сигнала вдоль связанных линий. Вычислены первичные и вторичные параметры микрополосковой С-секции при сближении её проводников и формы распространяющегося в ней СКИ. Выявлен и локализован максимум напряжения, в два раза превышающий амплитуду сигнала на входе и выходе и смещающийся от центра к выходу С-секции.

Ключевые слова: С-секция, печатная плата, локализация максимумов сигнала, электромагнитная совместимость.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-79-82

Связанные линии достаточно хорошо изучены и исследованы [1, 2]. Однако особенности явлений, происходящих при значительном увеличении взаимной связи между проводниками, изучены недостаточно. Кроме того, большинство исследований проведено в частотной области, тогда как временной уделено меньше внимания. Между тем изучение процессов во временной области позволит усовершенствовать защиту от сверхкоротких импульсов (СКИ) [3, 4]. Актуальны выявление и локализация максимумов сигнала в связанных линиях, поскольку результаты могут быть полезны для выявления и локализации мест возможных паразитных взаимовлияний, излучений и восприимчивости, чтобы своевременно принять меры по их устранению для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и информационной безопасности. Другим применением может быть определение мест установки датчиков контроля полезных сигналов или мониторинга помеховых сигналов, обеспечивающих требуемую чувствительность, что также важно для повышения помехозащищенности и надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [5].

Для таких исследований целесообразно использовать компьютерное моделирование. Это связано с необходимостью вычисления форм сигнала в большом числе точек вдоль каждого проводника сложных структур. Другой причиной является искажение сигнала входным импедансом измерителя. При разработке сложных печатных плат с высокой плотностью трассировки повсеместно используют системы компьютерного моделирования, обеспечивающие анализ и визуализацию параметров сигнала, что позволяет лучше оценить процессы, происходящие в них.

Для анализа межсоединений печатных плат широко используют квазистатический подход, так как схемотехнический анализ не всегда позволяет получить результаты достаточной точности, а электродинамический требует значительных вычислительных затрат. Теоретические основы квазистатического вычисления отклика для произвольной схемы из отрезков многопроводных линий передачи (МПЛП)

описаны в работах [6, 7]. На основе данной теории разработаны алгоритмы вычисления временного отклика [8], которые позволяют выполнить вычисления значений токов и напряжений только в узлах схемы.

Представлены первые результаты по реализации в системе TALGAT вычисления токов вдоль каждого проводника межсоединения печатной платы [9, 10], а также напряженности создаваемого электрического поля [11]. Основные выражения и алгоритм, позволяющие вычислить значения тока и напряжения в заданной координате вдоль каждого проводника отрезка МПЛП для произвольной схемы, на основе которых усовершенствовано вычисление временного отклика в системе TALGAT [12], приведены в [5]. В данной работе продемонстрирована возможность нахождения и отображения местоположения максимальных амплитуд напряжений и токов на примере микрополосковой меандровой линии из двух витков. Выявлен и локализован максимум амплитуд напряжений, который в 1,14 раза превышает входное напряжение. Обоснованность результатов, полученных с помощью квазистатического моделирования, доказана их совпадением с результатами электродинамического анализа. Однако особенности распространения СКИ вдоль меандровых линий изучены недостаточно. Цель данной работы – восполнить этот пробел.

Метод исследования

Для более ясного понимания характера изменения формы СКИ рассмотрена меандровая линия из одного витка. Такую линию называют С-секцией [13]. Выбран её микрополосковый вариант, включенный в тракт 50 Ом, с длиной полувитков по 27 мм (рис. 1). При такой длине выбранный в качестве воздействия СКИ в форме трапеции амплитудой 1 В, с длительностью фронта, вершины и спада по 0,1 нс полностью разлагается на два импульса [3].

Ширина проводника (w) – 0,489 мм, толщина проводника (t) – 0,1 мм, толщина диэлектрика (h) – 0,3 мм, $d=2*w$, диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) – 4. Для исследования особенностей возникно-

вения максимумов амплитуд усиливалась взаимная связь между проводниками с помощью уменьшения расстояния между ними. Моделирование специально выполнено без учета потерь, чтобы они не ослабляли влияние факторов, увеличивающих амплитуду сигнала. Для визуального отображения изменения форм сигнала в доступной авторам системе TALGAT на принципиальной схеме указывался начальный узел А и конечный узел В. Каждый полувиток меандровой линии передачи разделен на 50 сегментов, в каждом из которых вычислены формы напряжений.

Рис. 1. Схема включения (а) и поперечное сечение (б) микрополосковой С-секции

Результаты моделирования

Выполнены вычисления для 22 разных расстояний между полувитками (s уменьшалось с 0,4 мм до 1 мкм) но приведены результаты только для 6 вычислений с наиболее различными результатами.

Рассмотрим изменение форм сигнала на выходе линии (узел 4) из рис. 2. Первый положительный импульс является ближней перекрестной помехой. Его амплитуда увеличивается до 0,26 В. Амплитуда второго положительного импульса уменьшается в 2 раза (с 0,5 до 0,24 В). Примечательно, что при $s=1$ мкм амплитуда помехи становится больше, чем у основного импульса.

Рассмотрим изменение форм сигнала на входе линии (узел 2) из рис. 2. Амплитуда его первого положительного импульса уменьшается в 1,5 раза (с 0,5 до 0,33 В). Амплитуда второго положительного импульса наоборот – сначала увеличивается приблизительно в 5 раз (с 0,06 до 0,32 В). При $s=8$ мкм она равна 0,32 В, однако при s менее 8 мкм амплитуда идет на спад (до 0,29 В). Абсолютное значение амплитуды первого отрицательного импульса, подобно второму положительному импульсу, сначала увеличивается в 2 раза (с -0,06 до -0,13 В) и после $s=8$ мкм уменьшается почти в 4 раза (до -0,034 В).

Рассмотрим изменение форм с максимальными амплитудами сигнала. Амплитуды меняются незначительно: сначала постепенно увеличиваются с 0,578 до 0,633 В (при $s=10$ мкм), а затем уменьшаются до 0,6 В. Тем не менее при последнем вычислении (рис. 2, е) амплитуда максимума превышает амплитуду сигнала на входе и выходе в 2 раза.

Рис. 2. Формы сигнала при $s = 400$ (а); 80 (б); 40 (в); 10 (г), 8 (д), 1 (е) мкм

Геометрические, первичные и вторичные параметры связанных линий, максимальные значения амплитуд вычисленных напряжений, номер сегмента, в котором локализован максимум, среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод приведены в таблице. Все локализованные максимумы находятся во втором проводнике – между узлами 3 и 4 (см. рис. 1, а). Интересен и тот факт, что при увеличении взаимной связи между

полувитками локализованные максимумы смещаются ближе к центру полувитка.

Значение среднего геометрического значения волновых сопротивлений четной и нечетной мод снижается с 52 до 11 Ом. Целесообразно проверить, как его выравнивание с нагрузками повлияет на сигналы. Формы сигнала для $s = 1$ мкм при $R_1 = R_2 = 11,1$ Ом приведены на рис. 3.

Параметры С-секции

s , мкм	$V_{\max}$, В	№ сегм.	L_{11} , нГн/м	L_{12} , нГн/м	C_{11} , пФ/м	C_{12} , пФ/м	τ_o , нс/м	τ_e , нс/м	z_o , Ом	z_e , Ом	$(z_e z_o)^{0,5}$, Ом
400	0,5778	47	294,03	53,54	103,81	-10,28	5,2375	5,70120	60,96	45,91	52,9
80	0,6205	45	269,45	124,38	122,73	-37,85	4,8263	5,78107	68,12	30,05	45,2
40	0,6272	44	253,9	148,72	141,3	-58,13	4,5798	5,78677	69,57	22,96	39,9
10	0,6333	41	226,83	182,92	225,02	-143,24	4,0214	5,78884	70,78	10,91	27,8
8	0,6330	40	223,67	186,58	250,06	-168,38	3,9394	5,78897	70,86	9,41	25,8
6	0,6306	40	220,13	190,6	290,66	-209,07	3,8415	5,78911	70,95	7,68	23,3
4	0,6262	39	216,15	195,09	369,51	-288,02	3,7208	5,78915	71,03	5,65	20,03
2	0,6138	36	211,56	200,18	598,75	-517,36	3,5642	5,78922	71,12	3,19	15,06
1	0,6012	37	208,97	203,02	1047,75	-966,40	3,4636	5,78913	71,16	1,719	11,06

Рис. 3. Формы сигнала при $s = 1$ мкм, $R_1 = R_2 = 11,1$ Ом

На входе линии первый импульс имеет амплитуду 0,5 В, т.е. половину ЭДС, что соответствует согласованию. Локализованный максимум сместился на два сегмента относительно случая из рис. 2, е в сегмент 35 полувитка между узлами 3 и 4. Его амплитуда увеличилась до 0,92 В. В данном сегменте наблюдаются затухающие колебания сигнала. На выходе линии наблюдается сильное ослабление сигнала, причем амплитуда перекрестной помехи (0,38 В) значительно превышает амплитуду основного импульса (0,19 В). Таким образом, при согласовании линии сохраняется превышение амплитуды локализованного максимума над амплитудой сигнала на входе и выходе.

Для верификации квазистатического моделирования системой TALGAT выполнено электродинамическое моделирование системой CST MWS [14] при прочих равных условиях (рис. 4). Сравнение форм напряжений в точке локализованного максимума при $s = 1$ мкм показывает хорошее согласование основной формы импульса.

Общая причина возникновения максимума напряжения заключается в перераспределении энергии сигнала между проводниками и вдоль линии из-за его отражений. Сигнал в любой точке линии можно

представить суммой падающих и отраженных волн четной и нечетной мод. В данной линии они распространяются (как следует из таблицы) с разными задержками, волновыми сопротивлениями и коэффициентами отражения от концов линии. При этом их различие увеличивается с увеличением связи из-за сближения проводников. Особенно сильно сказывается различие коэффициентов отражения четной и нечетной мод от перемычки проводников, где граничные условия близки (если пренебречь неоднородностями) к холостому ходу для четной моды и короткому замыканию для нечетной. Результирующее сложение импульсов, пришедших в заданную точку с разной полярностью и задержками, может приводить к превышению напряжения.

Рис. 4. Сравнение результатов моделирования для рис. 2, е

Заключение

Таким образом, в результате работы выявлены зависимости формы напряжения СКИ вдоль проводников микрополосковой С-секции от расстояния между её проводниками. Локализован максимум напряжения СКИ, в два раза превышающий амплитуду СКИ на входе и выходе. Полученные результаты показывают актуальность вычислений форм напряжений и токов вдоль проводников связанных линии передачи, а также выявления и локализации макси-

мумов амплитуд напряжений и токов. Можно предположить, что при наличии подобных структур в печатных платах больших размеров с высокой плотностью трассировки превышения напряжения вызовут значительные паразитные взаимовлияния или излучения.

Разработка программного обеспечения осуществлена в рамках выполнения проектной части государственного задания № 8.1802.2014/К Минобрнауки России. Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе.

Литература

1. Регулярные и нерегулярные многосвязные полосковые и проводные структуры и устройства на их основе: анализ, синтез, проектирование, экстракция первичных параметров / Н.Д. Малютин и др. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 168 с.

2. Регулярные и нерегулярные многосвязные полосковые и проводные структуры и устройства на их основе: расчет первичных параметров, импульсные измерения характеристик / Н.Д. Малютин и др. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 218 с.

3. Surovtsev R.S. Pulse Decomposition in a Turn of Meander Line as a New Concept of Protection against UWB Pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russian Federation, May 2015. – 7 p.

4. Gazizov A.T. Simple printed structures for low-cost and effective protection against UWB pulses / A.T. Gazizov // Asia Electromagnetics Symposium (ASIAEM 2015) / Design and Testing of Protective Devices and Test Methods. Jeju-si, Jeju Province, South Korea, 3–8 August 2015. – 4 p.

5. Локализация максимумов сигнала в многопроводных линиях передачи печатных плат с помощью системы TALGAT / Р.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 147–150.

6. Achar R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, № 5. – P. 693–728.

7. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Том. гос. ун-т, 2007. – 152 с.

8. Djordjevic A.R. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1987. – Vol. 35, № 10. – P. 898–907.

9. Газизов Р.Р. Вычисление токов вдоль многопроводных межсоединений печатных плат // Студент и научно-технический прогресс: сб. тезисов междунар. науч. студ. конф. МНСК–2013. – Новосибирск, 2013. – С. 76.

10. Газизов Р.Р. Результаты квазистатического анализа токов вдоль отрезка многопроводной шины печатной платы // Научная сессия ТУСУР–2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.

Томск, 15–17 мая 2013 г. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 103–105.

11. Газизов Р.Р. Программный модуль для динамической визуализации токов и электромагнитного поля печатной платы // Электронные средства и системы управления: матер. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 12–14 ноября 2014 г. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 200–202.

12. 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 радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

13. Zysman G.I. Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium / G.I. Zysman, A.K. Jonson // IEEE Trans. on MTT. – 1969. – Vol. MTT-17, № 10. – P. 753–759.

14. CST microwave studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, свободный (дата обращения: 11.02.2016).

Газизов Руслан Рифатович

Студент каф. КИБЭВС, лаборант-исследователь науч.-исслед. лаборатории

«Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ «БЭМС РЭС») ТУСУРа
Тел.: +7-923-431-77-24

Эл. почта: ruslangazizow@gmail.com

Заболоцкий Александр Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ, зав. НИЛ «БЭМС РЭС»
Тел.: +7-913-824-23-06

Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Газизов Тимур Тальгатович

Канд. техн. наук, доцент каф. информатики физико-математического факультета

Томского государственного педагогического университета, науч. сотр. НИЛ «БЭМС РЭС»
Тел.: +7-913-824-90-50

Эл. почта: timurtsk@gmail.com

Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T.

Research on ultrashort pulse propagation in microstrip C-section with varied separation between coupled conductors

The relevance of research on special aspects of ultrashort pulse propagation and signal maximum localization in the coupled lines is shown. Primary and secondary parameters of microstrip C-section with closer separation of its conductors and waveforms of propagating ultrashort pulse are calculated. We have revealed and localized voltage maximum doubling the signal amplitude at the input and output and is also moving from joint to the end of the line.

Keywords: C-section, PCB, signal maximum localization, electromagnetic compatibility.