

Влияние рассогласования структуры с сильными модальными искажениями на целостность сигнала

Е.С. Жечев, В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,

zhechev75@gmail.com

Аннотация — На примере микрополосковой линии передачи проанализировано влияние рассогласования структуры с сильными модальными искажениями на целостность полезного сигнала. Представлены результаты электродинамического моделирования коэффициента передачи, информационно-зависимого фазового и амплитудного отклонений исследуемой структуры в согласованной, слабо и сильно рассогласованных конфигурациях. Результаты получены с учетом потерь в проводниках и диэлектрике. Даны практические рекомендации по проектированию устройств с модальными искажениями.

Ключевые слова — микрополосковая линия передачи, полезный сигнал, информационно-зависимые фазовые отклонения, вероятность битовых ошибок, модальные искажения, модальный фильтр.

I. ВВЕДЕНИЕ

При передаче сигнала в высокоскоростных цифровых схемах выдвигаются жесткие требования к целому ряду параметров. К ним относятся собственные задержки логических элементов и микросхем, задержки на переключение, время установки и удержания, длительности фронта и спада. Но наиболее важным параметром для синхронных систем является разность между принятым синхросигналом и сигналом с данными [1]. В большинстве высокочастотных приложений на частотах свыше 100 МГц сигнал начинает проявлять аналоговые свойства. Явления дисперсии и интерференции искажают входной сигнал и ухудшают качество его приема [2]. Любая микрополосковая линия (МПЛ) с потерями или линия с частотно зависимыми фазовыми скоростями сдвигает фронты переданного сигнала относительно идеального положения. Более того, в связанных структурах с сильной электромагнитной связью сигнал может распространяться с различными фазовыми скоростями. Большая разность погонных задержек мод в таких структурах способна ещё сильнее ухудшить исходный сигнал. В случае цифрового сигнала различные битовые последовательности будут приходить в разное время. Такое явление носит название информационно-зависимого фазового отклонения [3]. В общем случае под фазовым отклонением понимается изменение времени прихода цифрового сигнала относительно его идеального положения [4], [5]. Анализ фазового и

амплитудного отклонений становится все более важным при проектировании помехозащитных устройств для сигнальных цепей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также различных линий передачи [6]–[8]. Вводимое рассогласование в соседних (пассивных) проводниках, наличие неоднородностей, а также различные скорости распространения мод в линии передачи, увеличивают вероятность появления битовых ошибок. Поэтому, анализ целостности полезного сигнала в полосе пропускания для структур с сильными модальными искажениями представляется актуальным. Действительно, при работе высокочастотного передающего или высоковольтного коммутационного оборудования возникают сложные переходные процессы [9]. Они способны генерировать широкополосные излучаемые и кондуктивные эмиссии [10]. Наиболее опасным видом электромагнитных помех (ЭМП) является сверхкороткий импульс (СКИ). За счет широкого спектра и малой длительности он способен обходить традиционные системы защиты [11]. Одним из направлений исследований в области электромагнитной совместимости является проектирование устройств защиты от кондуктивных помех малой длительности. Перспективными защитными устройствами в данной области являются модальные фильтры (МФ) и меандровые линии задержки, имеющие различные конфигурации [12]–[14] и представляющие собой связанные МПЛ. В основу таких устройств положен принцип модального разложения: и за счет большого различия скоростей распространения мод в МПЛ достигается разложение исходного импульса малой длительности на последовательность импульсов меньшей амплитуды [15]. Цель исследования – оценить влияние рассогласования связанной МПЛ (за счет использования различных оконечных нагрузок на ближнем и дальнем концах пассивного проводника) на целостность полезного сигнала на выходе активной линии. Для этого необходимо построить компьютерную модель рассматриваемой линии, получить частотные и временные характеристики, а также выполнить анализ полученных результатов.

II. ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В данной работе исследуется двухпроводный МФ, поперечное сечение которого изображено на рис. 1, а эквивалентная схема включения приведена на рис. 2.

Полезный сигнал передается по первому проводнику, обозначенному как активный. Второй проводник, являющийся пассивным по отношению к первому, необходим для появления второй моды. Изменение оконечных нагрузок пассивных проводников зачастую улучшает ослабление помех [16].

Исходные электрические характеристики исследуемого МФ представлены в табл. 1. Материал подложки выбран на основе образца Al_2O_3 96 % (относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 9,4$, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta = 0,0004$, толщина фольги $t = 105$ мкм, высота диэлектрической подложки $h = 500$ мкм). Материал проводника – медь, с проводимостью $\sigma = 5,8 \times 10^7$ См/м. Исследуемый МФ, соответствующий характеристикам из табл. 1, обладает следующими геометрическими параметрами: $w = 0,4$ мм, $s = 0,2$ мм, $l = 500$ мм. Оконечные нагрузки на концах пассивного проводника задаются с помощью R3 и R4. Короткое замыкание (K3) и обрыв (XX) имитируются сопротивлениями 1 мОм и 1 ГОм, соответственно. В работе исследованы 9 конфигураций: согласованная (50-50), слабо рассогласованные (50-K3, 50-XX, K3-50, XX-50) и сильно рассогласованные (K3-K3, XX-XX, XX-K3, K3-XX).

Таблица 1
Электрические характеристики МФ

Параметр	Расчет
Волновое сопротивление	50
Разность погонных задержек мод	1,3 нс
Токовая пропускная способность	1 А
Частота среза (по уровню -3 дБ)	400 МГц
Частота первого резонанса	740 МГц
Максимальное вносимое затухание в полосе пропускания	-3 дБ
Максимальное вносимое затухание в полосе задерживания	-16 дБ
Максимальное отражение от первого порта в полосе пропускания не более	-16 дБ

При моделировании помехозащитных устройств, на основе связанных МПЛ, могут применяться различные подходы. Наиболее распространенными являются квазистатический, схмотехнический и электродинамический подходы. В ходе электродинамического моделирования решаются уравнения Максвелла. Это позволяет учесть все типы волн, распространяющиеся вдоль линии передачи. Электродинамический подход с учетом потерь в проводниках и диэлектрике применен в данном исследовании благодаря высокой достоверности получаемых результатов. В качестве среды моделирования использовано программное обеспечение PathWave Advanced Design System (ADS 2020).

В зависимости от параметров сигнала и топологии линии передачи, переданные ранее битовые последовательности могут влиять на фронт и амплитуду последующих импульсов. Это может быть вызвано интерференцией падающих и отраженных волн, перекрестными помехами, символьной дисперсией и их различной скоростью распространения вдоль линии передачи, что приводит к отклонениям фазы и амплитуды полезного сигнала. Для определения информационно-зависимых отклонений фазы и амплитуды сигнала при прохождении через МФ, требуется проанализировать большое количество битовых последовательностей. В данном исследовании использована псевдослучайная битовая последовательность (ПСБП), размером 10000 байт. На рис. 3 показана форма импульсов, соответствующая одному единичному интервалу ПСБП. Время нарастания (t_r) и время спада (t_f) равны 1 нс, длительность единичного интервала (UI) 6 нс, амплитуда импульсов 1 В. Следует отметить, что большая часть энергетической составляющей сигнала лежит в полосе пропускания МФ. Такая ПСБП подавалась на вход активного проводника МФ (V5), а формы напряжения анализировали на выходе активной линии (V2).



Рис. 3. Идеальные формы импульсов ПСБП

На первом этапе вычислялась матрица рассеяния МФ в диапазоне частот от 0 до 3 ГГц. Далее для анализа прохождения одиночного импульса ПСБП на вход активной линии (V1) частотно определенного МФ подавался трапециевидный импульс (фронт и спад длительностью по 1 нс, плоская вершина длительностью 6 нс, амплитуда 1 В). Реакция системы на входное воздействие изучалась на выходе активной линии (V2). В работе анализируются информационно-зависимые фазовое и амплитудное отклонения путем построения глазковых диаграмм. При моделировании случайное отклонение, вызванное тепловым, дробовым и фликкер-шумами, принято равным 0 и не учитывалось.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данном разделе представлены результаты электродинамического моделирования частотных и временных характеристик, а также информационно-зависимых фазовых и амплитудных отклонений МФ.

A. Отклик в частотной области

Результаты электродинамического моделирования частотной зависимости модуля $|S_{21}|$ представлены на рис. 4.

Таблица 2

Результаты моделирования МФ
в частотной области

№	Конфигурация	F_c , ГГц	F_{R1} , ГГц	F_{R2} , ГГц
1	КЗ-КЗ	0,54	0,69	2,27
2	50-50	0,34	0,77	2,31
3	ХХ-ХХ	0,58	0,80	2,24
4	ХХ-КЗ	0,49	0,79	2,26
5	КЗ-ХХ	0,54	0,79	2,26
6	50-КЗ	0,35	0,79	2,27
7	50-ХХ	0,34	0,81	2,25
8	КЗ-50	0,35	0,79	2,27
9	ХХ-50	0,34	0,80	2,25

Независимо от исследуемой конфигурации, наблюдается, что МФ близок к фильтру нижних частот

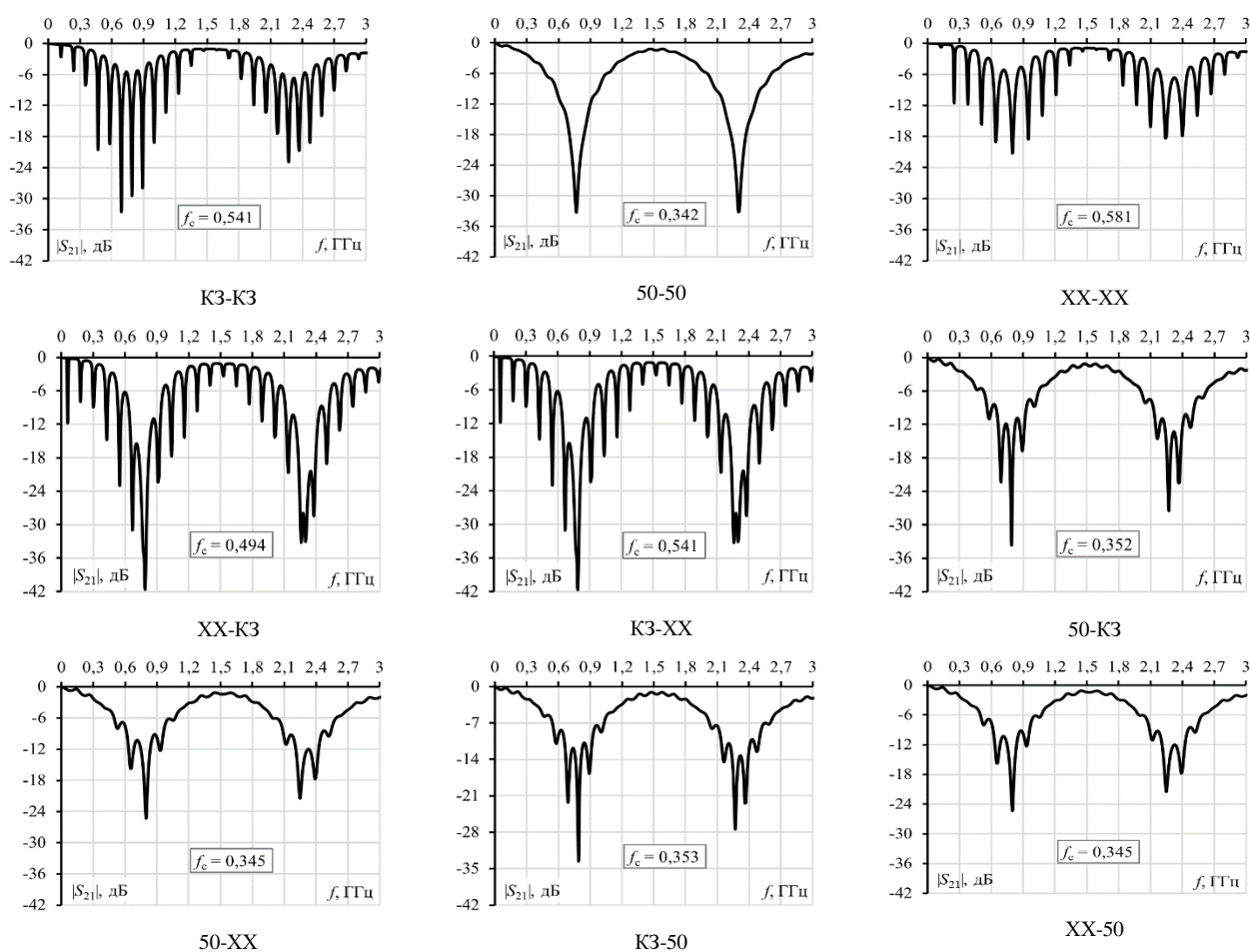


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{21}|$ при различных оконечных нагрузках на концах пассивной линии

После первого резонанса в интервале от f_{r1} до 1,5 ГГц передаточная характеристика начинает возрастать. Монотонный характер наблюдается только в конфигурации 50-50. В конфигурациях ХХ-КЗ и КЗ-

или гребенчатому фильтру. Форма огибающей передаточной характеристики МФ обусловлена габаритами и электрическими параметрами МФ. Частота среза f_c , а также частоты первого f_{r1} и второго f_{r2} резонансов представлены в табл. 2. В интервале частот от f_c до f_{r1} передаточная характеристика МФ монотонно убывает только в полностью согласованной конфигурации (50-50). В вариантах, когда один или оба конца пассивной линии рассогласованы, убывающая функция не является монотонной (слабо рассогласованы). Наблюдаются дополнительные резонансы различной амплитуды и частоты. Несмотря на то, что они могут вносить дополнительное ослабление, для целостности полезного сигнала их наличие нежелательно. Они говорят о появлении стоячих волн в активной и пассивной линиях МФ. Вследствие этого ухудшается качество полезного сигнала.

ХХ на частоте f_{r1} наблюдается минимальный уровень (-42 дБ). Он максимально увеличивается (до -21 дБ) в конфигурации ХХ-ХХ. Несмотря на то, что все характеристики имеют схожую форму огибающей,

Результаты моделирования МФ
во временной области

№	Конфигурация	U_1 , В (основ.)	$ U_2 _{\text{макс}}$, В (отраж.)
1	КЗ-КЗ	0,986	0,102
2	50-50	0,954	0,04
3	XX-XX	0,99	0,09
4	XX-КЗ	0,918	0,19
5	КЗ-XX	0,924	0,19
6	50-КЗ	0,954	0,064
7	50-XX	0,958	0,052
8	КЗ-50	0,954	0,064
9	XX-50	0,956	0,052

максимальное и минимальное значения f_c отклоняются друг от друга на 26 %, f_{r1} – на 8%, а f_{r2} – на 1,53%. Стоит отметить, что представленные характеристики не позволяют с высокой степенью достоверности оценить качество полезного сигнала на выходе активной линии МФ. Очевидно, что исследование частотной зависимости $|S_{21}|$ недостаточно при проведении анализа полезного сигнала.

В. Отклик во временной области

Отклик системы на воздействие одиночного импульса при различных граничных условиях на пассивной линии представлен на рис. 5. Так как МФ представляет собой МПЛ с потерями, они оказывают влияние на импульс. Так, затягивание фронта и спада и уменьшение амплитуды импульсов разложения вызваны вносимыми потерями, которые зависят от многих факторов: конечной проводимости сигнальных и опорных проводников, тангенса угла диэлектрических потерь, материала подложки, потерь на излучение, шероховатости поверхности проводников, а также изрезанностью их кромок. Наименьшие искажения формы импульса наблюдаются в согласованной конфигурации, тогда как наихудшие искажения соответствуют сильно рассогласованным конфигурациям (табл. 3). При этом неплохой результат показывают слабо рассогласованные конфигурации: из-

за частичного согласования отраженные импульсы рассеиваются на резисторах и не искажают сигнал.

С. Фазовые и амплитудные отклонения

В данном разделе представлены результаты электродинамического моделирования информационно-зависимых фазовых и амплитудных отклонений. Глазковые диаграммы для всех исследуемых конфигураций изображены на рис. 6. Наблюдается, что наименьшие амплитудные и фазовые отклонения соответствуют конфигурации 50-50. Минимальные ширина w_j и высота h_j «глаза» составили

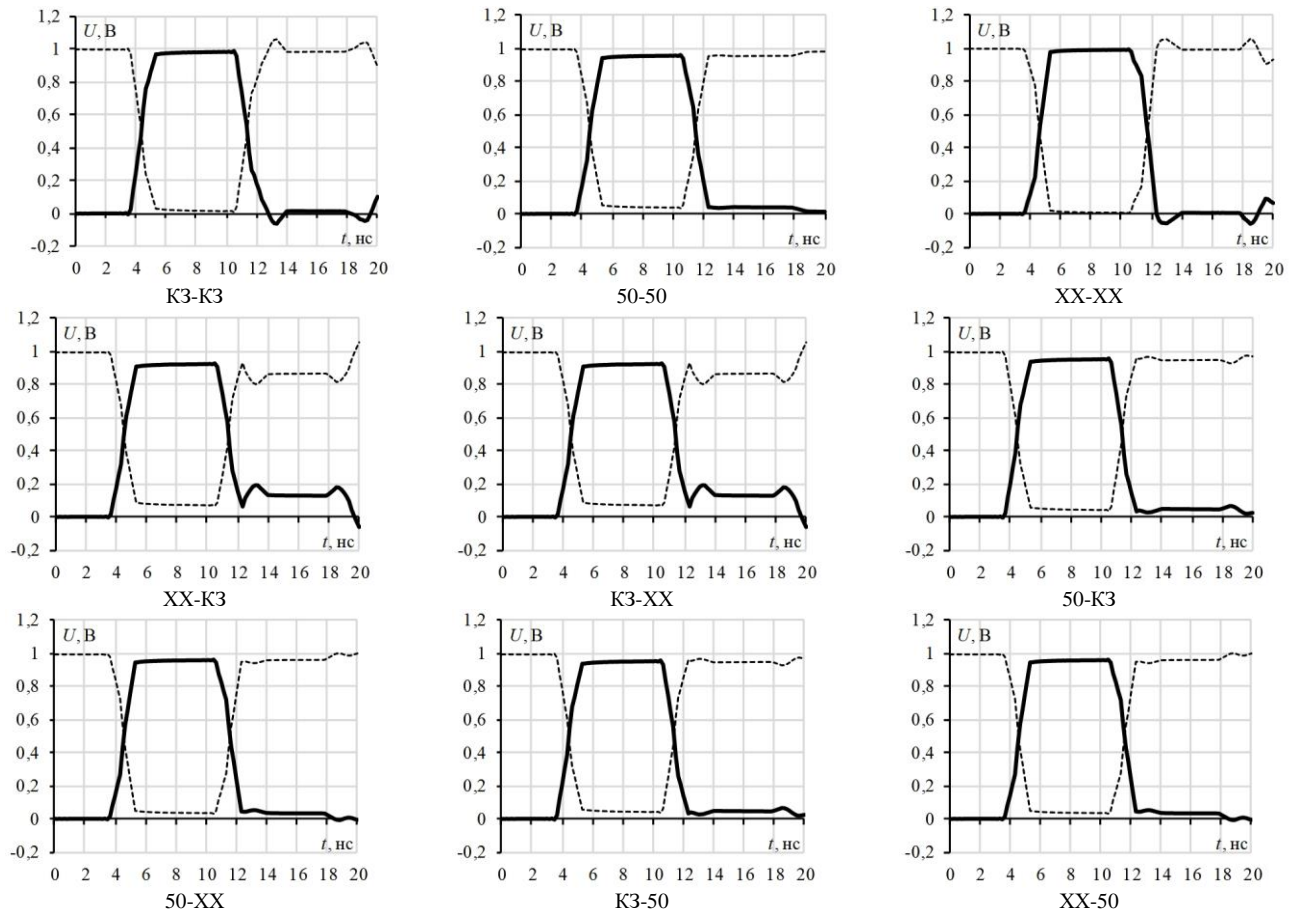


Рис. 5. Формы напряжения одиночного импульса ПСБП на выходе активной линии при различных оконечных нагрузках на концах пассивной линии

4,85 нс и 0,836 В, соответственно. Абсолютные отклонения от эталонных значений составили 0,15 нс и 0,164 мВ, соответственно. Четко прослеживается переход между логическими уровнями. Следовательно, вероятность возникновения битовых ошибок низка. Неплохой результат показывают конфигурации со слабым рассогласованием на концах МФ. Несмотря на уменьшение w_j и h_j , «глаз» остается открытым. Четко прослеживается переход между логическими уровнями. Следовательно, вероятность возникновения битовых ошибок низка. В конфигурации КЗ-XX ширина w_j и высота h_j «глаз» составили 4,1 нс и 0,138 В, соответственно. Абсолютное отклонение от эталонных значений составляет 0,9 нс и 0,862 мВ, соответственно. Переход от одного логического уровня к другому не прослеживается. Следовательно, вероятность возникновения битовых ошибок высока. К примеру, в конфигурации 50-50 и 50-XX в интервале от 14,5 до 19,5 нс вероятность возникновения битовых ошибок стремится к 0. При этом в конфигурации КЗ-XX высокая вероятность возникновения битовых ошибок в диапазонах от 14,5 до 15 нс и от 19,2 до 19,5 нс.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере связанной двухпроводной МПЛ с сильными модальными искажениями исследовано влияние согласования на целостность полезного сигнала. Проведен анализ рассогласования пассивного проводника двухпроводного МФ на вероятность появления битовых ошибок, вызванных межсимвольными помехами в системе передачи данных за счет изменения конечных нагрузок на ближнем и дальнем концах пассивного проводника. Исследуемые конфигурации МФ обладают свойствами фильтров нижних частот или гребенчатых фильтров и позволяют защитить критичное радиоэлектронное оборудование от кондуктивных помех малой длительности. По построенным глазковым диаграммам видно, что в согласованной конфигурации четко прослеживается переход от одного логического уровня к другому. В то время как в рассогласованной конфигурации переход слабо различим. Необходимо отметить, что глазковая диаграмма позволяет качественно определить целостность сигнала. Для количественного определения целостности сигнала необходимо построение контрольных диаграмм вероятности возникновения битовых ошибок. Однако даже по глазковым диаграммам можно заключить, что рассогласование пассивного проводника с обоих

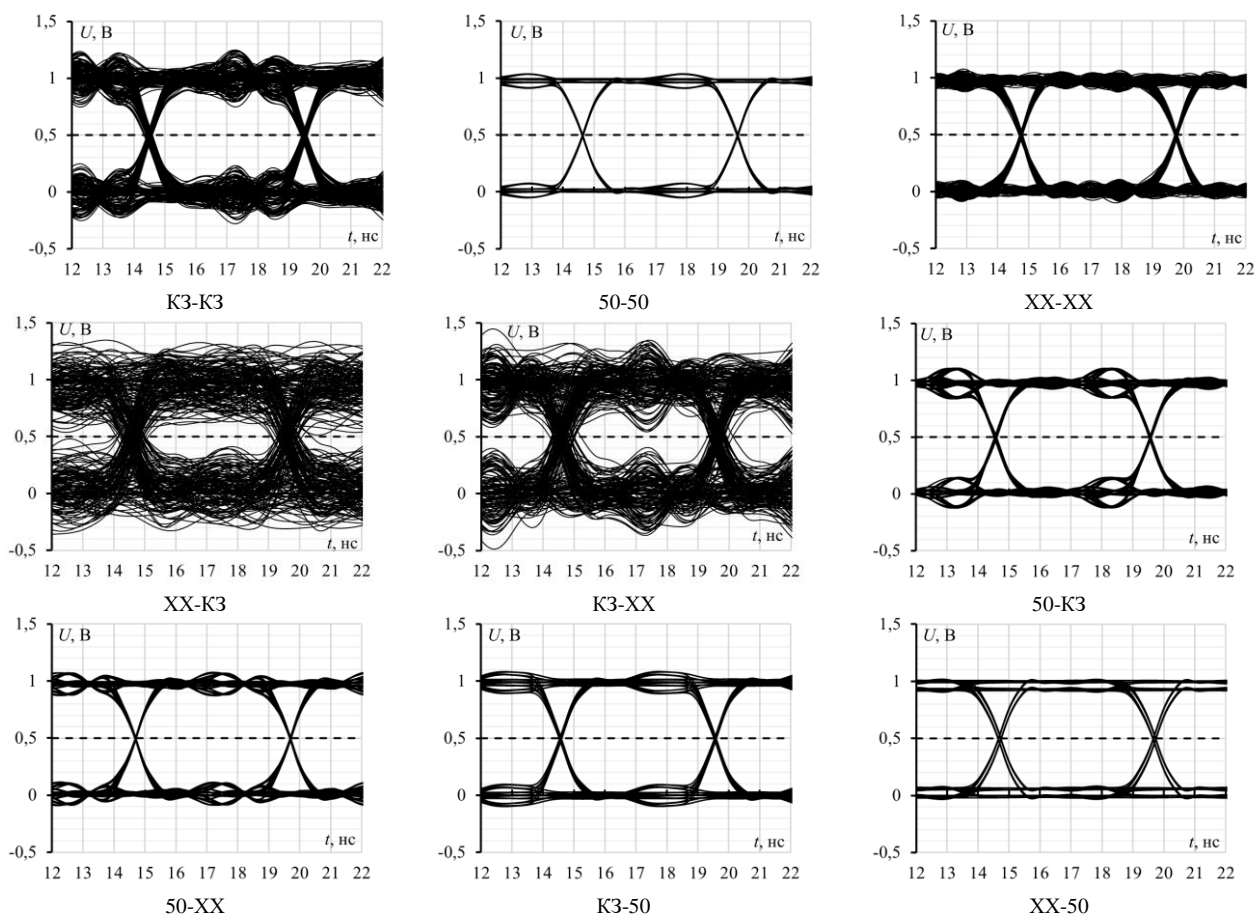


Рис. 6. Фазовые и амплитудные отклонения при различных оконечных нагрузках на концах пассивной линии

концов приводит к значительному увеличению вероятности возникновения битовых ошибок. Одним из возможных способов минимизации фазовых и амплитудных отклонений в линии передачи может быть согласование одного из концов пассивного проводника. Отраженные волны будут рассеиваться на резисторе, уменьшая при этом коэффициент стоячей волны. Таким образом, впервые представлен анализ влияния рассогласования пассивного проводника двухпроводного МФ на целостность полезного сигнала. В дальнейшем планируется провести экспериментальное исследование.

ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Medina V., Paton S., Hernandez L. Clock Jitter Analysis of Continuous-Time $\Sigma\Delta$ Modulators Based on a Relative Time-Base Projection //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2018. – Т. 66. – №. 3. – С. 920-929.
- [2] Hall S. H., Heck H. L. Advanced signal integrity for high-speed digital designs. – John Wiley & Sons, 2011.
- [3] IEEE Standard for Jitter and Phase Noise. — DOI: 10.1109/ieeestd.2021.9364950. — URL: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2021.9364950>.
- [4] Kim G., Kam D. G., Lee S. J., Kim J., Ha M., Koo K., Pak J. S., Kim J. Modeling of eye-diagram distortion and data-dependent jitter in meander delay lines on high-speed printed circuit boards (PCBs) based on a time-domain even-mode and odd-mode analysis //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2008. – Т. 56. – №. 8. – С. 1962-1972.
- [5] Wu Y. An efficient eye diagram generation method for jitter analysis in high speed links //2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – IEEE, 2014. – С. 412-417.
- [6] C. Sui, S. Bai, T. Zhu, C. Cheng, D. G. Beetner. New methods to characterize deterministic jitter and crosstalk-induced jitter from measurements //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – Т. 57. – №. 4. – С. 877-884.
- [7] Resso M., Bogatin E. Signal integrity characterization techniques. – Intl. Engineering Consortiu, 2009.
- [8] Karri S. H., Surovtsev R. S., Nosov A. V. Propagation of pulse signals in the turn of a meander microstrip delay line //2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – С. 0254-0257.
- [9] Lehr J., Ron P. Foundations of pulsed power technology. – John Wiley & Sons, 2017.
- [10] C. L. Alley and K. W. Atwood, Electronic engineering. Wiley, 1973.
- [11] Weber T., Krzikalla R., ter Haseborg J. L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Т. 46. – №. 3. – С. 423-430.
- [12] Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters //Complexity. – 2018. – Т. 2018.
- [13] Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Т. 59. – №. 6. – С. 1864-1871.
- [14] Zhechev Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter //2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2019. – С. 108-112.
- [15] Belousov A. O. Experimental confirmation of the modal filtration in four- and five-conductor microstrip lines / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Russia, Altai, June 29–July 3, 2017. – P. 46–49, DOI: 10.1109/EDM.2017.7981705.
- [16] Gazizov A. T., Zabolotsky A. M. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions //2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2015. – С. 1-3.

The Influence of the Mismatch in the Structure with Strong Modal Distortions on Signal Integrity

Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk

zhechev75@gmail.com

Abstract — In this paper, the authors investigate the effect the structure matching has on the integrity of a useful signal on the example of a two-conductor coupled microstrip line with strong modal distortions. The transmission coefficients, data-dependent phases, and amplitude jitters of the structure were simulated in the matched configuration, as well as in the line with weak and strong mismatch, using electrodynamic approach. The influence of passive conductor mismatch of the

two-conductor modal filter was analyzed on the probability of bit errors caused by inter-symbol interference in the data transmission system, which resulted from the changes in the termination loads at the near and far ends of the passive conductor. The investigated modal filter configurations have the properties of low-pass filters and provide the protection of critical radio-electronic equipment from conducted interference of short duration. The eye diagrams show that

the matched configuration clearly shows the transition from one logic level to another. The transition is poorly distinguishable in the mismatched configuration. It should be noted that the eye diagram allows for the qualitative determination of signal integrity. Based on the results of calculating the probability of bit errors for all the configurations, we can conclude that the mismatch of the passive conductor leads to a significant increase in bit error rate, i.e. adversely affects useful signal integrity. One possible way to minimize phase and amplitude deviations in the transmission line could be matching one end of the passive conductor. The reflected waves will dissipate on the resistor, hence reducing the standing wave coefficient. Thus, for the first time, the effect of the passive conductor mismatch in a two-conductor modal filter is analyzed with respect to useful signal integrity. An experimental study is planned for the future.

Keywords — microstrip transmission line, useful signal, data-dependent jitter, bit error rate, modal distortion, modal filter.

REFERENCES

- [1] Medina V., Paton S., Hernandez L. Clock Jitter Analysis of Continuous-Time $\Sigma\Delta$ Modulators Based on a Relative Time-Base Projection //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2018. – T. 66. – №. 3. – C. 920-929.
- [2] Hall S. H., Heck H. L. Advanced signal integrity for high-speed digital designs. – John Wiley & Sons, 2011.
- [3] IEEE Standard for Jitter and Phase Noise. DOI: 10.1109/ieeestd.2021.9364950. URL: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2021.9364950>.
- [4] Kim G., Kam D. G., Lee S. J., Kim J., Ha M., Koo K., Pak J. S., Kim J. Modeling of eye-diagram distortion and data-dependent jitter in meander delay lines on high-speed printed circuit boards (PCBs) based on a time-domain even-mode and odd-mode analysis //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2008. – T. 56. – №. 8. – C. 1962-1972.
- [5] Wu Y. An efficient eye diagram generation method for jitter analysis in high speed links //2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – IEEE, 2014. – C. 412-417.
- [6] C. Sui, S. Bai, T. Zhu, C. Cheng, D. G. Beetner. New methods to characterize deterministic jitter and crosstalk-induced jitter from measurements //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – T. 57. – №. 4. – C. 877-884.
- [7] Resso M., Bogatin E. Signal integrity characterization techniques. – Intl. Engineering Consortiu, 2009.
- [8] Karri S. H., Surovtsev R. S., Nosov A. V. Propagation of pulse signals in the turn of a meander microstrip delay line //2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – C. 0254-0257.
- [9] Lehr J., Ron P. Foundations of pulsed power technology. – John Wiley & Sons, 2017.
- [10] C. L. Alley and K. W. Atwood, Electronic engineering. Wiley, 1973.
- [11] Weber T., Krzikalla R., ter Haseborg J. L. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – T. 46. – №. 3. – C. 423-430.
- [12] Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters //Complexity. – 2018. – T. 2018.
- [13] Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – T. 59. – №. 6. – C. 1864-1871.
- [14] Zhechev Y. S., Chernikova E. B., Belousov A. O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter //2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2019. – C. 108-112.
- [15] Belousov A. O. Experimental confirmation of the modal filtration in four- and five-conductor microstrip lines / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Russia, Altai, June 29–July 3, 2017. – P. 46–49, DOI: 10.1109/EDM.2017.7981705.
- [16] Gazizov A. T., Zabolotsky A. M. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions //2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2015. – C. 1-3.