

УДК 621.391.825

А.О. Белоусов, А.М. Заблоцкий, Т.Р. Газизов

Экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводной микрополосковой линии

Выполнено экспериментальное подтверждение возможности реализации модальной фильтрации на основе многопроводной микрополосковой линии. Разработаны двух- и трехпроводные макеты модальных фильтров, в которых максимальные амплитуды импульсов разложения меньше в 11,5 и 13,7 раза по сравнению с исходным сигналом.

Ключевые слова: многопроводная микрополосковая линия, устройство защиты, модальная фильтрация, натурный эксперимент.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-51-54

Связанные линии передачи исследуются давно и интенсивно продолжают исследоваться. Между тем искажения сигнала в активной линии уделяется мало внимания: они показаны в реальном примере трёх связанных микрополосковых линий [1]; незначительные искажения видны из примера двух связанных линий при наличии существенных отражений сигналов [2]; в работах [3, 4] показано, что искажения могут происходить вследствие влияния потерь в земле. Однако эти искажения можно использовать, в частности, для защиты.

Известен импульсный расщепитель на связанных линиях, содержащий отрезок связанных линий передачи с диэлектрическим заполнением [5]. Для защиты радиозлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов (СКИ) [6] предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод [7]. Представлены результаты моделирования микрополосковой линии (МПЛ) из двух, трех, четырех и пяти проводников, демонстрирующие разложение исходного импульса в конце активного проводника на 2–5 импульсов, максимальные амплитуды разложения которых в 3, 3,6 и 4,5 раза меньше уровня сигнала в начале линии [8]. Путём оптимизации показано, что выравнивание разностей задержек между импульсами разложения позволяет увеличить длительность импульса, который будет разлагаться в этих структурах полностью [9]. Кроме того, выполнена оптимизация многопроводного модального фильтра (МФ) по критериям минимизации максимальной амплитуды выходного сигнала и максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения [10]. Между тем экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводных микрополосковых линиях ранее не выполнялось.

Цель данной работы – восполнить этот пробел, изготовив макеты многопроводного МФ и выполнив эксперимент.

Макеты многопроводных МФ

Изготовление макетов многопроводных МФ основано на структурах и результатах, приведенных в работах [8–10]. Однако для изготовления печатной

платы необходимо выполнить моделирование и оптимизацию с учетом технологических параметров: минимальные значения ширины проводника и расстояния между проводниками (w , s), равные 0,2 мм, при толщине фольги (t), равной 18 мкм и 0,25 мм при $t = 35$ мкм; толщина диэлектрика $h = 0,5$; 1; 1,5 мм.

Моделирование и оптимизация выполнялись в программном продукте TALGAT [11]. При этом допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяются только квази-Т-волны. Учитывались потери в проводниках и диэлектриках. В качестве исходного импульса использовался оцифрованный сигнал осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, измеренный на нагрузке 50 Ом, с амплитудой 0,657 В. Длительность фронта – 27 пс, спада – 29 пс и плоской вершины – 9 пс, так что общая длительность – 65 пс. (Длительности измерены по уровням 0,1–0,9).

В результате получены следующие параметры печатной платы для изготовления макета многопроводных МФ: $w = 1000$ мкм, $t = 18$ мкм и $h = 500$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость равна $\epsilon_r = 4,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,017$, измеренные на частоте $f = 1$ МГц. Значение w оптимизировалось для обеспечения волнового сопротивления одиночной линии 50 Ом и не менялось для остальных структур, как и значения t , h и ϵ_r . Значения s_i для линий различны, поскольку они оптимизировались по критерию минимизации максимальной амплитуды импульсов на выходе активного проводника МФ [8]. Для двухпроводной МПЛ $s = 320$ мкм, а для трехпроводной – 200 и 685 мкм соответственно.

Макеты МПЛ представлены на рис. 1 (для сравнения изготовлен макет и одиночной МПЛ). Длины каждой из представленных МПЛ равны $l = 60$ см. На концах пассивных проводников для $N = 2$ и 3 установлены резисторы с сопротивлением 50 Ом. Для соединения макетов с измерительным трактом установлены SMA соединители.

Описание эксперимента и его результатов

Для проведения эксперимента использовалась схема, представленная на рис. 2. Перед проведением эксперимента была выполнена программная калибровка канала. Поэтому погрешности измерения вре-

мени составляют не более $\pm 1\%$, а напряжений – $\pm 7\%$. Для соединения макетов с генератором и стробоскопическим преобразователем прибора С9-11 использовались дополнительно два коаксиальных

переходника ПК2-20-03Р-13 и один коаксиальный переходник 2.236.482, которые дают дополнительные задержки около 116 и 104 пс соответственно, так что суммарная задержка равна 336 пс.

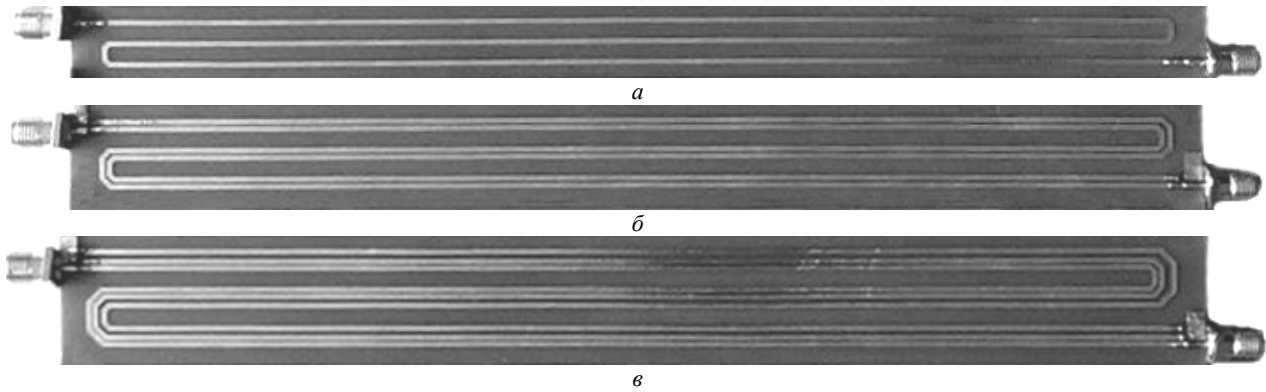


Рис. 1. Макеты с одно- (а), двух- (б) и трехпроводной (в) МПЛ



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Максимальные значения амплитуд импульсов

N	U, В		
	Без учета потерь	С учетом потерь	Результаты эксперимента
1	0,33	0,103	0,099
2	0,164	0,053	0,057
3	0,125	0,04	0,048

Измеренные формы сигнала на входе и выходе одно-, двух- и трехпроводной МПЛ представлены на рис. 3, а–в. Значения максимальных амплитуд импульсов в 6,6; 11,5; 13,7 раза меньше амплитуды исходного сигнала (таблица). При моделировании (см. рис. 3, а–в) получено, что с учетом потерь значения максимальных амплитуд в 6,4; 12,4; 16,4 раза меньше амплитуды исходного сигнала (см. таблицу). Расхождение результатов моделирования может быть связано с неточным вычислением матриц потерь для проводников и диэлектриков, а также с неучетом влияния частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости материала печатной платы. Таким образом, результаты эксперимента подтверждают возможность разложения исходного импульса в конце активного проводника МПЛ, что раньше было показано только при моделировании (см. рис. 3, а–в).

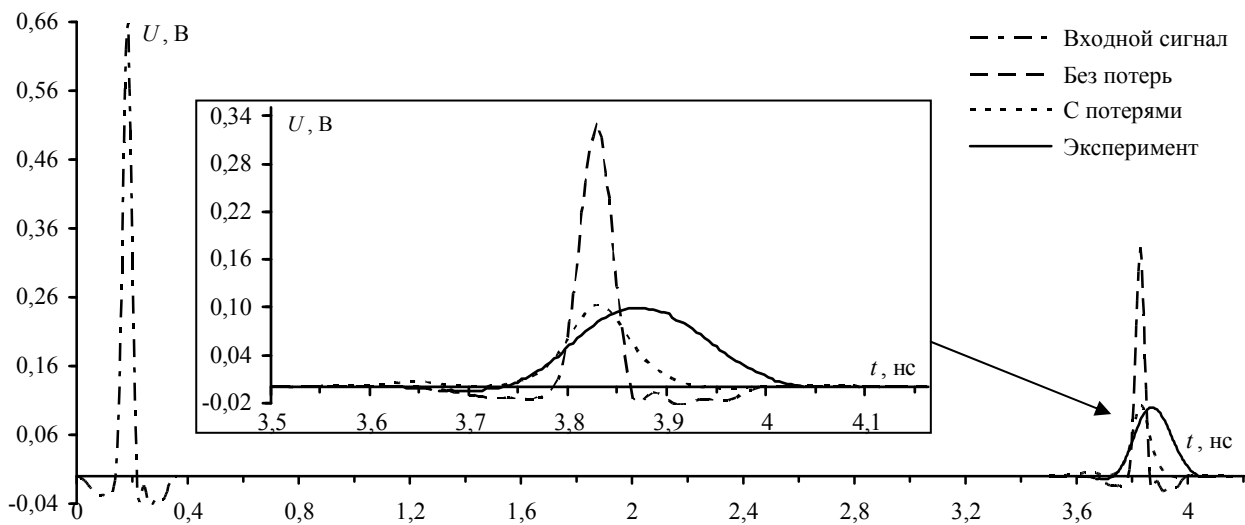


Рис. 3 (начало)

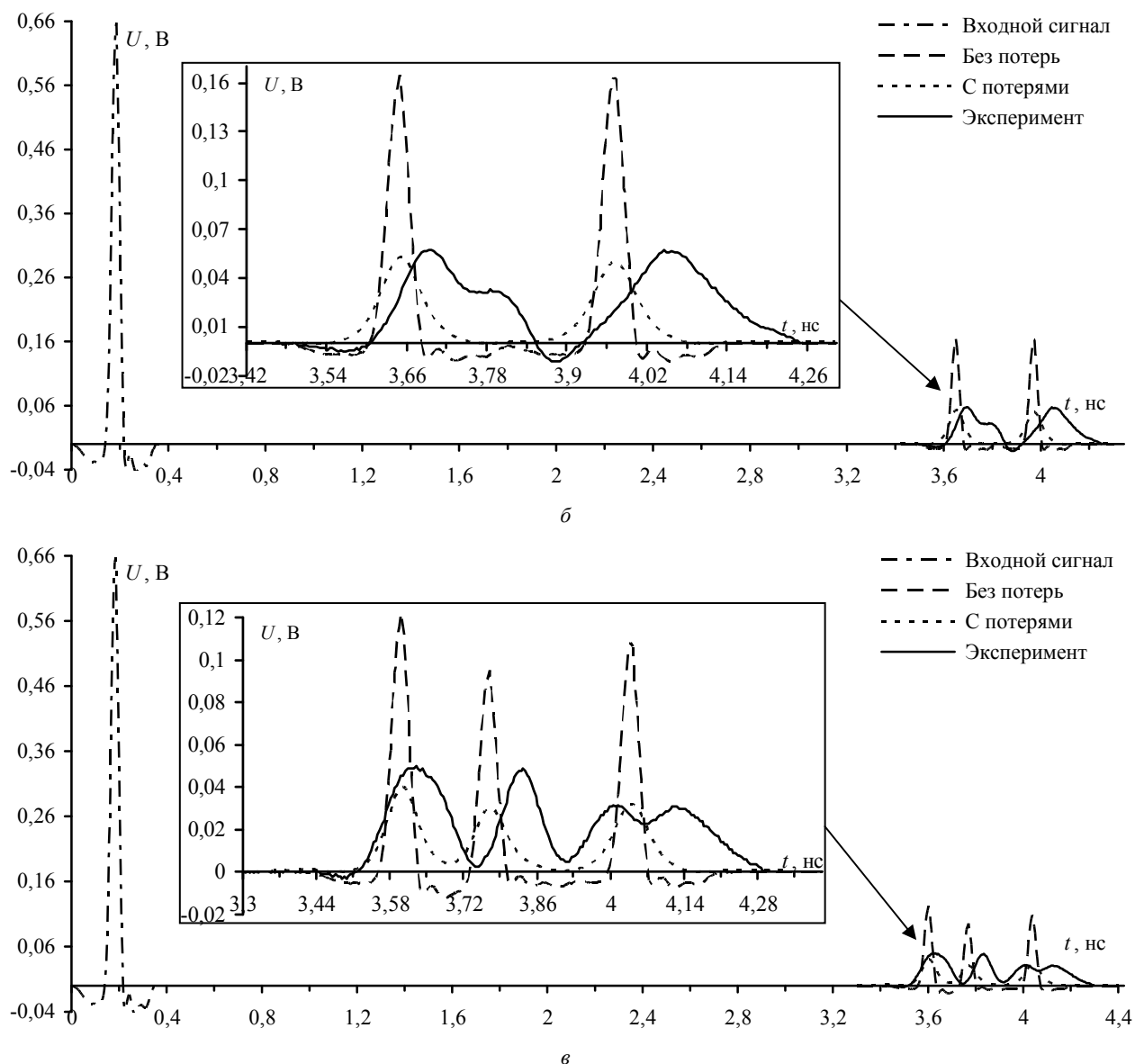


Рис. 3 (окончание). Формы сигналов на входе (---) и выходе (с их увеличенными фрагментами) одно- (а), двух- (б) и трехпроводной (в) МПЛ, полученные при моделировании без учета (---) и с учетом (····) потерь и экспериментально (—)

Заключение

Разработаны три макета на основе МПЛ. Получено, что в двух- и трехпроводных структурах МФ исходный сигнал раскладывается на два и на три импульса. При этом максимальные значения амплитуд, в 11,5 и 13,7 раза меньше амплитуды исходного сигнала. В результате полученные экспериментальные данные подтверждают результаты моделирования и идею совершенствования защиты от СКИ за счет добавления к существующей структуре дополнительных проводников. (Полагается, что спектр полезного сигнала не ослабляется МФ.)

Таким образом, результаты показали перспективы исследования многопроводных МФ, поскольку при добавлении к исходной структуре дополнительных проводников уменьшается амплитуда исходного сигнала в конце активного проводника.

Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках выполнения проектной части государственного задания Минобрнауки РФ, оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

Литература

1. Chang F.Y. Transient analysis of lossless coupled transmission lines in a nonhomogeneous dielectric medium // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – Sept. 1980. – Vol. 18. – P. 616–626.
2. Красноперкин В.М. Импульсные сигналы в связанных линиях передачи / В.М. Красноперкин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 7 (355). – С. 3–8.

3. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

4. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

5. Пат. 2 501 159 РФ, МПК Н 03 К 5/156. Импульсный расщепитель на связанных линиях / А.Н. Сычев (РФ), В.А. Шестаков (РФ), С.М. Стручков (РФ), В.Н. Путилов (РФ), М.А. Чекалин (РФ). – № 2 012 111 828 / 07; заявл. 27.03.12; опубл. 10.12.13. Бюл. № 34. – 7 с.

6. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – Note 41. – 8 July, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eceresearch.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf>, свободный (дата обращения: 16.09.2016).

7. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

8. Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 124–138.

9. Belousov A.O. Maximization of duration of ultrashort pulse that is completely decomposed in multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2016). – Russia, Moscow. – May 12–14, 2016. – P. 1–4.

10. Belousov A.O. Optimization of parameters of multiconductor modal filters for protection against ultrashort pulses / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Altai, Russia, June 30 – July 4, 2016. – P. 67–70.

11. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V. Lezhnin // Advances in Intelligent Systems Research (ISSN 1951-6851). Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). – Phuket, Thailand, August 23–24, 2015. – P. 293–301.

Белоусов Антон Олегович

Магистрант, каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа

Тел.: 8-923-440-86-02

Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

Заболоцкий Александр Михайлович

Канд. техн. наук., доцент каф. ТУ

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. каф. ТУ

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

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

Experimental confirmation of modal filtering in multiconductor microstrip line

Feasibility of modal filtering based on a multiconductor microstrip line is experimentally confirmed. Prototypes of modal filters with two and three conductors have been developed. The maximal amplitude of decomposed pulses of these prototypes is 11,5 and 13,7 times less than amplitude of the original signal.

Keywords: multiconductor microstrip line, protection devices, modal filtering, natural experiment.