# УДК 621.391.825

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

# Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов

Предложено совершенствование защиты от сверхкоротких импульсов за счет добавления к связанной микрополосковой линии дополнительных проводников. Получены трех-, четырехи пятипроводная микрополосковые линии, в которых максимальные амплитуды импульсов разложения в 3; 3,6 и 4,5 раза соответственно меньше уровня сигнала в начале линии. Результаты показывают перспективы исследования многопроводных модальных фильтров. Ключевые слова: многопроводная микрополосковая линия, устройство защиты, модальная

фильтрация.

Современная электронная аппаратура, основанная на микроэлектронных и микропроцессорных компонентах, имеет широкие функциональные возможности, но повышенную восприимчивость к электромагнитным помехам. Особо опасными представляются кондуктивные помехи, которые могут подаваться и проникать в аппаратуру непосредственно по проводникам. В качестве источников электромагнитных помех активно исследуются сверхкороткие импульсы (СКИ) [1], которые способны вывести аппаратуру из строя.

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощного СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод [2, 3]. Практическая реализация модальной фильтрации представляется возможной на разных структурных уровнях аппаратуры, например: с помощью кабелей [4], в виде отдельных блоков, а также компонентов [5], в том числе печатных [6]. Например, представлены общие подходы к созданию печатного модального фильтра в виде связанной линии передачи [7, 8]. Однако в известных исследованиях рассмотрены модальные фильтры, в основном, из двух связанных линий. Модальная фильтрация в многопроводных структурах исследована очень мало. Известны результаты моделирования микрополосковой линии (МПЛ) из двух, трех и четырех проводников, демонстрирующие разложение исходного импульса, возбуждаемого в начале активного проводника, на 2, 3 и 4 импульса в его конце и уменьшение максимальной амплитуды импульса [5]. Между тем предельные возможности уменьшения амплитуды не выявлены, но это актуально. Предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет зеркального добавления к существующей структуре дополнительных слоев диэлектрика и проводников, так что получается четырехпроводная зеркально-симметричная структура, в которой исходный импульс разлагается на 4 одинаковых импульса в 4 раза меньшей амплитуды [9]. Однако такая структура довольно сложна. Таким образом, целесообразно исследование предельных возможностей использования многопроводных МПЛ для модальной фильтрации. Цель работы – выполнить такое исследование. При многократных изменениях в диапазоне параметров целесообразно использовать моделирование. Для этого необходимо построить геометрическую модель поперечного сечения МПЛ, вычислить матрицы погонных коэффициентов электростатической (С) и электромагнитной (L) индукций, составить схему для моделирования, задать нагрузки и воздействие, вычислить временной отклик на импульсное воздействие в диапазоне параметров, а также выполнить оптимизацию параметров МПЛ. Указанное представляется целесообразным выполнить для МПЛ, имеющей 2, 3, 4 и 5 проводников.

Вычисление параметров и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [10]. Допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяются только квази-Т-волны. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Двухпроводная МПЛ показана на рис. 1, *a*, схема и формы сигнала на входе и выходе данной линии показаны на рис. 2. Данная линия обеспечивает разность погонных задержек мод 0,34 нс/м при следующих параметрах: расстояние между проводниками s = 500 мкм, ширина проводников w = 290 мкм, толщина проводников t = 105 мкм и толщина диэлектрика h = 190 мкм (стандартный материал), относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r = 5$ . Значение w оптимизировалось для

обеспечения волнового сопротивления одиночной линии 50 Ом и не менялось, как и значения t, h и  $\varepsilon_r$ . Значения  $s_i$  для каждой линии различны, поскольку они оптимизировались по критерию минимизации максимальной амплитуды импульсов на выходе активного проводника МПЛ. Многопроводные МПЛ, имеющие 3, 4 и 5 проводников соответственно, представлены на рис. 1,  $\delta$ –c.



Рис. 1. Поперечные сечения двух- (а), трех- (б), четырех- (в) и пяти- (г) проводной линий



Рис. 2. Схема и формы сигнала в начале (- - -) и конце (----) проводника 1 для двухпроводной линии

В трех-, четырех- и пятипроводной линиях распространяются соответственно, 3, 4 и 5 мод с соответствующими им характеристиками. Вычислены матрицы С и L для трехпроводной линии при s1 = 400 мкм, s2 = 540 мкм:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1,19e-010 & -7,43e-012 & -9,74e-013 \\ -7,44e-012 & 1,19e-010 & -4,99e-012 \\ -9,66e-013 & -4,97e-012 & 1,18e-010 \end{pmatrix}, \Phi/\mathrm{M};$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 2,92e-007 & 3,97e-008 & 9,00e-009 \\ 3,97e-008 & 2,91e-007 & 2,81e-008 \\ 9,01e-009 & 2,81e-008 & 2,93e-007 \end{pmatrix}, \Gamma\mathrm{H/M};$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1,18e-010 & -5,61e-012 & -7,79e-013 & -3,34e-013 \\ -5,61e-012 & 1,18e-010 & -3,62e-012 & -6,83e-013 \\ -7,76e-013 & -3,62e-012 & 1,18e-010 & -3,91e-012 \\ -3,33e-013 & -6,81e-013 & -3,91e-012 & 1,18e-010 \end{pmatrix}, \Phi/\mathrm{M};$$
(1)
$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1,18e-010 & -5,61e-012 & -7,79e-013 & -3,34e-013 \\ -5,61e-012 & 1,18e-010 & -3,62e-012 & -6,83e-013 \\ -7,76e-013 & -3,62e-012 & 1,18e-010 & -3,91e-012 \\ -3,33e-013 & -6,81e-013 & -3,91e-012 & 1,18e-010 \end{pmatrix}, \Phi/\mathrm{M};$$
(2)

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 2,92e - 007 & 3,10e - 008 & 6,60e - 009 & 2,75e - 009 \\ 3,10e - 008 & 2,92e - 007 & 2,11e - 008 & 5,55e - 009 \\ 6,61e - 009 & 2,11e - 008 & 2,93e - 007 & 2,23e - 008 \\ 2,75e - 009 & 5,55e - 009 & 2,23e - 008 & 2,93e - 007 \end{pmatrix}, \Gamma_{\text{H/M}};$$

для пятипроводной линии при *s*1 = 367 мкм, *s*2 = 447 мкм, *s*3 = 500 мкм, *s*4 = 685 мкм:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1,19e-010 & -8,21e-012 & -1,02e-012 & -4,27e-013 & -2,29e-013 \\ -8,22e-012 & 1,20e-010 & -6,28e-012 & -8,77e-013 & -3,45e-013 \\ -1,02e-012 & -6,27e-012 & 1,19e-010 & -5,49e-012 & -7,50e-013 \\ -4,25e-013 & -8,68e-013 & -5,48e-012 & 1,18e-010 & -3,59e-012 \\ -2,26e-013 & -3,39e-013 & -7,41e-013 & -3,59e-012 & 1,18e-010 \end{pmatrix}, \Phi/\mathrm{M};$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 2,91e-007 & 4,33e-008 & 1,07e-008 & 4,20e-009 & 1,97e-009 \\ 4,33e-008 & 2,90e-007 & 3,47e-008 & 8,71e-009 & 3,14e-009 \\ 1,07e-008 & 3,47e-008 & 2,91e-007 & 3,07e-008 & 6,47e-009 \\ 4,20e-009 & 8,71e-009 & 3,07e-008 & 2,92e-007 & 2,07e-008 \\ 1,97e-009 & 3,14e-009 & 6,47e-009 & 2,07e-008 & 2,93e-007 \end{pmatrix}, \Gamma\mathrm{H/M};$$

Затем из (1)–(3) вычислены векторы погонных задержек мод ( $\tau$ ), матрицы характеристического импеданса ( $Z_C$ ) и собственных векторов ( $S_V$ ) произведения матриц L и C для этих линий:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} 6,14\\5,61\\5,82 \end{pmatrix}, \text{ Hc/M}; \qquad \mathbf{Z}_{C} = \begin{pmatrix} 49,66 & 4,94 & 1,01\\4,94 & 49,51 & 3,44\\1,01 & 3,44 & 49,84 \end{pmatrix}, \text{ OM}; \qquad \mathbf{S}_{v} = \begin{pmatrix} -0,5 & 0,5 & 0,5\\-0,6 & -0,7 & 0,07\\-0,4 & 0,3 & -0,8 \end{pmatrix}; \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} 6,12\\ 5,66\\ 5,93\\ 5,75 \end{pmatrix}, \text{ Hc/M}; \qquad \boldsymbol{Z}_{c} = \begin{pmatrix} 49,80 & 3,82 & 0,75 & 0,31\\ 3,82 & 49,72 & 2,56 & 0,63\\ 0,75 & 2,56 & 49,82 & 2,73\\ 0,31 & 0,63 & 2,73 & 49,91 \end{pmatrix}, \text{ Om}; \qquad \boldsymbol{S}_{v} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & -0,5 & 0,4\\ 0,6 & -0,7 & -0,3 & -0,2\\ 0,5 & 0,4 & 0,4 & -0,6\\ 0,3 & -0,2 & 0,6 & 0,6 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{\tau} = \begin{pmatrix} 6,24\\ 5,98\\ 5,56\\ 5,82\\ 5,68 \end{pmatrix}, \text{ hc/m}; \ \mathbf{Z}_{c} = \begin{pmatrix} 49,58 & 5,39 & 1,19 & 0,46 & 0,22\\ 5,40 & 49,33 & 4,27 & 0,96 & 0,34\\ 1,19 & 4,27 & 49,53 & 3,77 & 0,73\\ 0,46 & 0,96 & 3,77 & 49,72 & 2,53\\ 0,22 & 0,34 & 0,73 & 2,52 & 49,92 \end{pmatrix}, \text{ Om}; \ \mathbf{S}_{v} = \begin{pmatrix} 0,4 & -0,5 & -0,5 & -0,4 & -0,4\\ 0,6 & -0,3 & 0,7 & -0,04 & 0,2\\ 0,5 & 0,1 & -0,5 & 0,5 & 0,4\\ 0,4 & 0,5 & 0,2 & 0,2 & -0,6\\ 0,2 & 0,5 & -0,04 & -0,7 & 0,3 \end{pmatrix}.$$
(6)

Из вектора  $\tau$  для каждой из трех линий видно, что погонные задержки мод различны. Также из  $S_{\nu}$  видно, что значения напряжений мод в проводниках не равны по модулю.

Для оценки возможности модального разложения необходимо вычислить максимальную разность погонных задержек мод и амплитуды импульсов разложения в конце активного проводника с помощью выражения [7]

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}_{\nu} \operatorname{diag}(\mathbf{V}_m),\tag{7}$$

где  $V_m = 0,5 \cdot S_v^{-1} \cdot E$ ;  $S_v$  – матрица размера  $N \times N$ , содержащая собственные векторы матрицы LC; E – вектор размера  $N \times 1$ , состоящий из значений амплитуд источников напряжения, где N – количество проводников.

Значения амплитуд импульсов разложения в конце активного проводника, вычисленные аналитически и моделированием при условиях, что источник ЭДС амплитудой 5 В подключался между проводником *I* (активным) и опорным, приведены в таблице.

эначения амплитуд импульсов разложения, в												
Результат	N = 3			N=4				N = 5				
Аналитика	0,84	0,97	0,67	0,61	0,74	0,64	0,44	0,52	0,66	0,60	0,44	0,23
Моделирование	0,84	0,83	0,83	0,70	0,49	0,70	0,60	0,56	0,47	0,39	0,56	0,49

Значения амплитуд импульсов разложения, В

Из векторов **т** следует, что максимальное значение разности погонных задержек мод равно для трех-, четырех- и пятипроводной линий 0,53, 0,45 и 0,67 нс/м соответственно. Следовательно, полное разложение импульсного сигнала длительностью  $t_{\Sigma}$  в отрезке линии передачи длиной *l* возможно при условии  $t_{\Sigma}/l < 0,53$  нс/м для N = 3,  $t_{\Sigma}/l < 0,45$  нс/м для N = 4 и  $t_{\Sigma}/l < 0,67$  нс/м для N = 5. Кроме того, согласно таблице, максимальные амплитуды импульсов разложения в 3, 3,6 и 4,5 раза соответственно меньше уровня сигнала в начале линии. Можно предположить, что эти амплитуды не изменяются значительно при нагрузках на концах проводников, равных диагональному значению  $\mathbf{Z}_c$ . Для подтверждения вычислены формы сигнала в начале и конце активного проводника для схем из рис. 3–5 с резисторами 50 Ом. Вычисленные формы сигналов в начале (*V*1) и конце проводника *l* (*V*5) для трехпроводной линии, (*V*6) для четырехпроводной линии и (*V*7) для пятипроводной линии при *l* = 4 м представлены на рис. 3–5, где источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС (длительности фронта, спада и плоской вершины выбраны равными по 50 пс, так что  $t_{\Sigma} = 150$  пс, а амплитуда – 5 В). Из рис. 3–5 видно, что к концу проводника *l* приходят 3, 4 и 5

импульсов с максимальными амплитудами 0,84; 0,70 и 0,56 В, что в 3; 3,6 и 4,5 раза соответственно меньше уровня сигнала в начале линии.



Рис. 3. Схема и формы сигнала в начале (- - -) и конце (----) проводника 1 для трехпроводной линии



Рис. 4. Схема и формы сигнала в начале (---) и конце (---) проводника *1* для четырехпроводной линии



Рис. 5. Схема и формы сигнала в начале (- - -) и конце (----) проводника 1 для пятипроводной линии

В итоге предложено совершенствование защиты от сверхкоротких импульсов за счет добавления к существующей структуре дополнительных проводников. (Полагается, что спектр полезного сигнала не ослабляется модальным фильтром.) Используя подобный подход, в дальнейшем могут быть исследованы другие структуры. Результаты показали перспективы исследования многопроводных модальных фильтров, поскольку при добавлении к двухпроводной структуре дополнительных проводников, при одинаковых параметрах, значительно (почти до 5 раз) уменьшается амплитуда на выходе линии. Отметим, что косвенное экспериментальное подтверждение полученного результата содержится в работе [3], где показано повышенное ослабление модального фильтра при уплотнении его витков.

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

### Литература

1. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев, В.А. Туркин, А.Н. Корнев, С.Н. Долбня, А.В. Певнев // Технологии ЭМС. – 2006. – №3 (18). – С. 36–45.

2. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – Т. 11, № 11. – С. 18–22.

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

4. Gazizov T.R. Experimental results on ultra wide band pulse propagation in three-conductor power cables of flat and circular cross sections / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2009). Russia, Tomsk. March 27–28, 2009. – Tomsk, 2009. – P. 264–269.

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

6. Gazizov T.R. New approach to EMC protection / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of the 18-th International Zurich Symposium on EMC. Germany, Munich. September 24–28 2007. – Munich, 2007. – P. 273–276.

7. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС. – М., 2010. – № 4(35). – С. 31–34.

8. Design of printed modal filters for computer network protection / T.R. Gazizov, I.E. Samotin, A.M. Zabolotsky, A.O. Melkozerov // Proceedings of 30-th International Conference on lightning protection, Cagliary, Italy. September 13–17, 2010. – P. 1246-1–1246-3.

9. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 41–44.

10. 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 управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

#### Белоусов Антон Олегович

Магистрант, каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа Тел.: 8-923-440-86-02 Эл. почта: antllafleur@gmail.com

## Газизов Тальгат Рашитович

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. каф. ТУ ТУСУРа Тел.: 8-913-826-07-24 Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

#### Заболоцкий Александр Михайлович

Ст. науч. сотрудник, каф. ТУ ТУСУРа Тел.: 8 (382-2) 90-01-45 Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

#### Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Multiconductor microstrip line as a modal filter for protection against ultrashort pulses

The addition of extra conductors to the coupled microstrip line is suggested to improve the protection against ultrashort pulses. Microstrip lines with three, four and five conductors were obtained with the maximal amplitude of decomposed pulses of 3, 3.6 and 4.5 times less, than the signal level at the beginning of the line. The results show prospects for research in the field of multiconductor modal filters. **Keywords:** multiconductor microstrip line, protection devices, modal filtering.