УДК 621.391.825

А.М. Заболоцкий

Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации

Предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет зеркального добавления к существующей структуре дополнительных слоев диэлектрика и проводников. Рассмотрена четырехпроводная зеркально-симметричная структура, в которой амплитуды импульсов разложения одинаковы и в 8 раз меньше амплитуды источника ЭДС. Кроме того, длина одиночного отрезка четырехпроводной структуры короче, чем общая длина двухкаскадной двухпроводной структуры, в 1,2 раза при одинаковых амплитудах на выходе.

Ключевые слова: связанная линия, модальный фильтр, устройства защиты.

Для защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощного сверхкороткого импульса (СКИ) [1] предложена технология модальной фильтрации [2, 3], основанная на использовании явления модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод. При создании модального фильтра как средства защиты аппаратуры от СКИ необходимо выбрать структуры поперечных сечений многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением, обладающие эффектом модального разложения [4]. Практическая реализация модальной фильтрации представляется возможной на разных структурных уровнях аппаратуры, например с помощью кабелей [5–7], в виде отдельных блоков, а также компонентов [8], в том числе печатных [9]. Общие подходы к созданию печатного модального фильтра в виде связанной линии передачи представлены в [10–12]. Однако на данный момент не исследовались многопроводные зеркально-симметричные структуры для реализации модальной фильтрации. Цель работы – восполнить этот пробел.

При выполнении исследования за основу взята структура печатного модального фильтра [11], в которой печатные проводники расположены на двух сторонах подложки из стеклотекстолита (рис. 1, *а*, далее структура 1). Данная структура обеспечивает разность погонных задержек мод 1 нс/м при следующих параметрах: расстояние между проводниками s = 0,4 мм, ширина проводников w = 0,3 мм, толщина проводников t = 105 мкм, толщина диэлектрика h = 0,5 мм, относительная диэлектрическая проницаемость ε_r = 5 [11]. Зеркально-симметричная структура относительно плоскости α, которая проходит через проводник *3*, представлена на рис. 1, *б* (далее структура 2). Она отличается от структуры 1 (рис. 1, *а*) тем, что напротив проводников *1* и *2* добавлены проводники *1** и *2**, увеличена толщина диэлектрика $h_1 = 2h + t$ и проводник *3* расположен в диэлектрике.

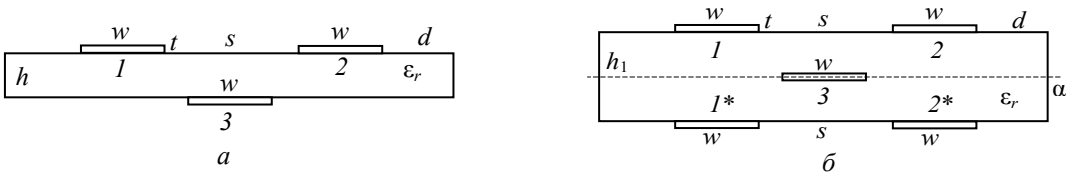

Рис. 1. Поперечные сечения структур 1 (*а*) и 2 (*б*)

Вычисление параметров и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [13] при допущении, что в рассматриваемых структурах распространяются только квази-Т-волны. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

В общем случае структура 2 рассматривается как четырехпроводная линия передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении. Следовательно, в данной структуре распространяются четыре моды с соответствующими им характеристиками. Для выполнения анализа вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукций при s = 0,4 мм, w = 0,3 мм, t = 105 мкм, h_1 = 1,105 мм, ε_r = 5:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 75 & -11{,}4 & -18{,}6 & -2{,}4 \\ -11{,}4 & 75 & -2{,}4 & -18{,}6 \\ -18{,}6 & -2{,}4 & 75 & -11{,}4 \\ -2{,}4 & -18{,}6 & -11{,}4 & 75 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 580{,}3 & 247{,}5 & 206{,}2 & 168{,}2 \\ 247{,}5 & 580{,}3 & 168{,}2 & 206{,}2 \\ 206{,}2 & 168{,}2 & 580{,}3 & 247{,}5 \\ 168{,}2 & 206{,}2 & 247{,}5 & 580{,}3 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}. \quad (1)$$

Затем из (1) вычислены вектор погонных задержек мод, матрицы характеристического импеданса и собственных векторов произведения матриц **L** и **C**:

$$\boldsymbol{\tau}=\begin{bmatrix}7{,}2\\5{,}1\\5{,}5\\6{,}2\end{bmatrix},\ \text{нс/м};\quad \mathbf{Z}_C=\begin{bmatrix}92&29&28{,}5&19\\29&92&19&28{,}5\\28{,}5&19&92&29\\19&28{,}5&29&92\end{bmatrix},\ \text{Ом};\quad \mathbf{S}_V=\begin{bmatrix}0{,}5&0{,}5&-0{,}5&0{,}5\\0{,}5&-0{,}5&0{,}5&0{,}5\\0{,}5&0{,}5&0{,}5&-0{,}5\\0{,}5&-0{,}5&-0{,}5&-0{,}5\end{bmatrix}. \tag{2}$$

Из вектора $\boldsymbol{\tau}$ видно, что погонные задержки мод различны. Однако из $\mathbf{S}_V$ видно, что значения напряжений мод в проводниках равны по модулю. Кроме того, выявлено, что изменения параметров структуры 2 изменяют значения погонных задержек, но не влияют на элементы $\mathbf{S}_V$. Учет этого может быть полезен при оптимизации.

Для оценки возможности модального разложения необходимо вычислить минимальную разность погонных задержек мод и амплитуды импульсов разложения в конце активного проводника [8]. Матрица амплитуд импульсов разложения в конце активного проводника, вычисленная при условиях, что источник ЭДС амплитудой 1 В подключался между проводниками *1* (активный) и *3* (опорный) и согласования каждой моды отрезка линии передачи:

$$\mathbf{V}=\begin{bmatrix}0{,}125&0{,}125&-0{,}125&0{,}125\\0{,}125&-0{,}125&0{,}125&0{,}125\\0{,}125&0{,}125&0{,}125&-0{,}125\\0{,}125&-0{,}125&-0{,}125&-0{,}125\end{bmatrix},\ \text{В}. \tag{3}$$

Из вектора $\boldsymbol{\tau}$ следует, что минимальное значение разности погонных задержек мод равно 0,4 нс/м. Следовательно, полное разложение импульсного сигнала длительностью t_Σ в отрезке линии передачи длиной l возможно при условии $t_\Sigma/l < 0{,}4$ нс/м. Кроме того, согласно (3) амплитуды импульсов разложения одинаковы и в 8 раз меньше амплитуды источника ЭДС. 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 (проводник 1, рис. 1, *б*).

При вычислении форм сигнала в структуре 2 использовалась схема из рис. 2. Она содержит восемь резисторов с сопротивлением 92 Ом и источник сигналов, который подключался между проводниками *1* (активный, верхний на схеме) и *3* (опорный, представленный обозначением схемной земли). Вычисленные формы сигналов в начале ($V1$) и конце ($V6$) проводника *1* при $l = t_\Sigma/0{,}4$ нс/м = = 0,3 нс/0,4 нс/м = 0,75 м представлены на рис. 2, где источник импульсных сигналов представлен идеальным источником ЭДС (длительности фронта, спада и плоской вершины выбраны равными по 0,1 нс, так что $t_\Sigma = 0{,}3$ нс, а амплитуда – 1 В).

Из рис. 2 видно, что в конце проводника *1* четыре импульса с амплитудами: 0,123; 0,117; 0,123 и 0,114 В. Они несколько отличаются от 0,125 В из (3) из-за рассогласования каждой моды. В итоге результаты моделирования подтверждают возможность разложения импульсного сигнала на четыре импульса с одинаковыми амплитудами в 8 раз меньше, чем ЭДС.

Показательно сравнить результаты для структур 1 [8, 12] и *2*. Для структуры 1 разложение сигнала возможно при условии $t_\Sigma/l < 1$ нс/м и для уменьшения амплитуды разложенных импульсов в 8 раз относительно ЭДС необходимо использовать двухкаскадное соединение отрезков (рис. 3). При этом длина структуры 2 будет в 1,2 раза больше длины структуры 1. Например, при $t_\Sigma = 0{,}3$ нс общая длина для структуры 1 будет равна $l_1 + l_2 = 0{,}3 + 0{,}6 = 0{,}9$ м (длины двух отрезков линий передачи), а длина для структуры 2 равна $l = 0{,}75$ м (длина одного отрезка линии передачи). Для сравнения также вычислены частотные отклики при гармоническом воздействии ЭДС амплитудой 1 В (рис. 4). Видно, что полоса пропускания структуры 2 примерно в 1,5 раза меньше, чем у структуры 1 (рис. 4, *а*).

Таким образом, исследована зеркально-симметричная структура для реализации модальной фильтрации. Получено, что минимальная разность погонных задержек мод в ней в 2,5 раза меньше, чем в исходной структуре. Однако амплитуды импульсов разложения в одном отрезке линии передачи одинаковы и в 8 раз меньше источника ЭДС. Кроме того, длина одиночного отрезка четырехпроводной структуры в 1,2 раза меньше, чем общая длина двухкаскадной двухпроводной структуры при одинаковых амплитудах на выходе.

В итоге предложен новый подход совершенствования структуры модального фильтра за счет зеркального добавления к существующей структуре дополнительных слоев диэлектрика и проводников. Используя подобный подход, в дальнейшем могут быть исследованы другие структуры.

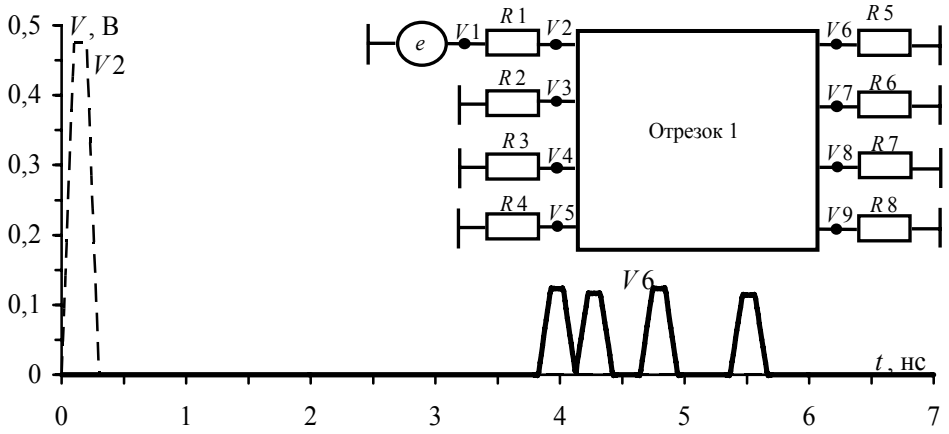

Рис. 2. Схема и формы сигнала в начале и конце проводника *1* для структуры *2*

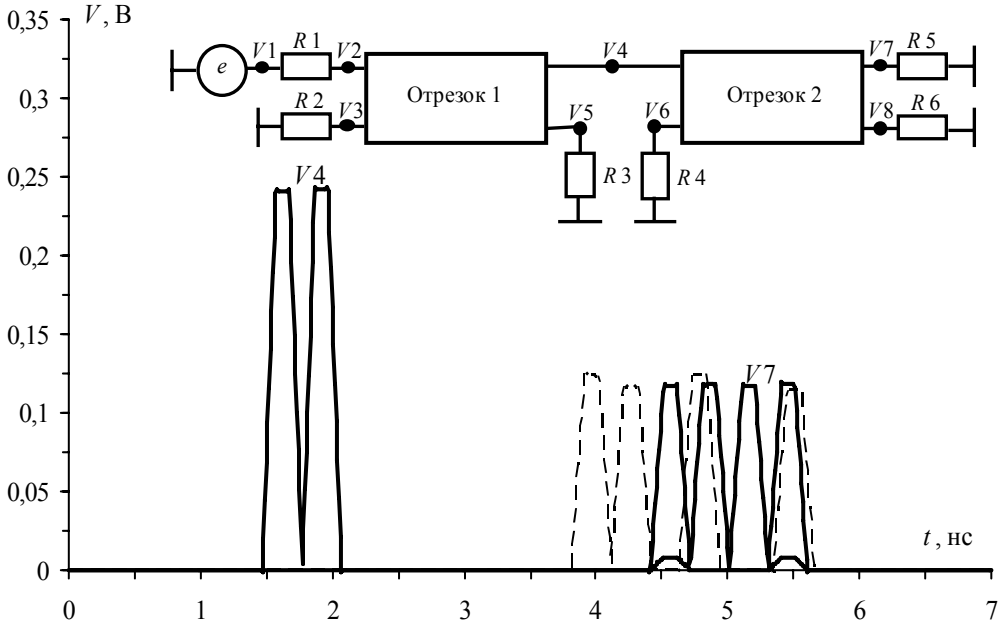

Рис. 3. Формы сигнала в конце активного проводника для структур *1* [8, 12] (——) и *2* (– – –)

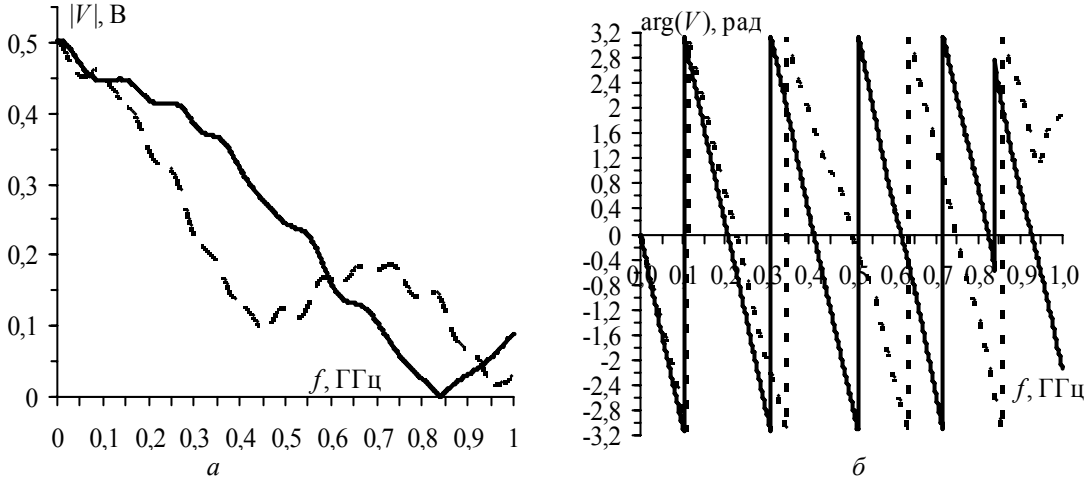

Рис. 4. Модуль (*а*) и фаза (*б*) частотного отклика для структуры *1* (——) и *2* (- - - -)

Совершенствование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны 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. Теоретические основы модальной фильтрации / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Техника радиосвязи. – 2014. – №3. – С. 79–83.
4. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС. – 2006. – №4 (19). – С. 40–44.
5. Заболоцкий А.М. Модальная фильтрация в отрезках кабелей силового питания / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин //15-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф., Казань, 9–10 ноября 2007 г. – Казань, 2008. – С. 189–191.
6. Заболоцкий А.М. Защита от короткого импульса в линиях передачи с различными граничными условиями / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин //16-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф., Казань, 28–29 мая 2008 г. – Казань, 2008. – С. 243–245.
7. 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. – P. 264–269.
8. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Том. гос. ун-т, 2007. – 152 с.
9. 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. – P. 273–276.
10. Самотин И.Е. Условие выравнивания амплитуд импульсов на выходе модального фильтра // Технологии ЭМС. – М., 2010. – № 4(35). – С. 31–34.
11. Самотин И.Е. Подходы к созданию модального фильтра для защиты от сверхкороткого импульса // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч. техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полюс», Томск, 22–23 апреля 2010 г. – Томск, 2010. – С. 263–266.
12. Gazizov T.R. 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.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614365. TALGAT 2013 / Т.Р. Газизов, А.О. Мелкозеров, Т.Т. Газизов и др. – Заяв. №2015611288, дата поступления 3 марта 2015 г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.

Заболоцкий Александр Михайлович
Ст. науч. сотрудник каф. телевидения и управления ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 90-01-45
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Zabolotsky A.M.

Application of reflective symmetry for modal filtration improvement

The article proposes a new approach to modal filtration improvement, which is symmetrical adjunction of additional dielectric and conductor layers to the given structure. The article describes four-conductor reflection symmetric structure; amplitudes of decomposition pulses of this structure are equal and 8 times lower than EMF source amplitude. Besides, the length of a single segment of four-conductor structure is 1.2 times shorter than the total length of two-stage two-conductor structure, while output amplitudes are equal.
Keywords: coupled line, modal filter, protective devices.