

УДК 621.372.2.052.3.018.78

Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов

## Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками

Сформулированы условия распространения импульса в витке меандровой линии задержки без искажений его формы перекрестными наводками. Выполнено квазистатическое моделирование меандровой линии с покрывающим диэлектрическим слоем. Продемонстрированы возможные искажения и причины их возникновения при невыполнении одного из условий.

**Ключевые слова:** меандровая линия, диэлектрическое заполнение, погонные задержки, четная и нечетная моды.

При проектировании печатных плат (ПП) высокоскоростной цифровой электроники необходимо решать задачу синхронизации импульсов в точках приема. Важно, чтобы все трассы, подведенные к этим точкам, обеспечивали одинаковые задержки сигналов. Отметим, например, что трассы на внешних слоях типовой ПП по сравнению с трассами на внутренних слоях имеют, как правило, меньшую погонную задержку. Поэтому, часто для синхронизации сигналов используется меандровая линия. Изменяя параметры ее витков, достигают необходимой задержки. Однако, из-за ограничения в площади, занимаемой меандровой линией, приходится сжимать витки меандра, что приводит к появлению наводок, инициируемых фронтом и спадом импульса на концах полувитков меандра. Эти наводки вносят неконтролируемые искажения формы сигнала, изменяя его характеристики [1]. Влияние наводок нарушает целостность сигналов ПП и становится критичнее для цифровой электроники из-за роста тактовых частот используемых сигналов [2]. Поэтому, актуальны исследования искажений коротких импульсов в меандровых линиях, а также путей уменьшения этих искажений.

Для моделирования меандровых линий, как правило, используют электродинамический (учитывающий все типы волн) или квазистатический (учитывающий только поперечную волну) анализ. Первый дает более точные результаты моделирования, но необходимые для этого вычислительные затраты обычно высоки даже для относительно простых структур. Примечательно, что второй может давать довольно точные результаты, сопоставимые с результатами, полученными первым [3]. Поэтому, благодаря малым затратам и приемлемой точности, предпочтительным для моделирования простых структур является квазистатический анализ. Также приемлемую сходимостью результатов показало исследование влияния перекрестных наводок на импульс в меандровой линии с однородным диэлектрическим заполнением посредством этих подходов, аналитических формул и эксперимента [4].

Выполнено исследование, в результате которого выявлена линейная зависимость задержки в меандровой микрополосковой линии от количества витков [5]. Таким образом, для проектирования многовитковых линий достаточно моделирование линии из нескольких витков для определения значения задержки на один виток и применение результата к линии с произвольным числом витков. Представлены результаты электродинамического моделирования перекрестных наводок в одном витке меандровой линии на основе симметричной полосковой линии, а также предложены несколько новых конструкций меандровых линий [6]. Приведены результаты квазистатического моделирования распространения импульса в одном и двух витках меандровой линии с аналогичным поперечным сечением и выявлены причины появления искажений [7]. Также показана возможность получения меандровой линии из одного витка, неискажающей форму сигнала, при общей длительности импульса меньше его задержки в витке. При этом на выходе меандровой линии ближняя перекрестная наводка заканчивается раньше прихода импульса, тем самым не искажая его. Однако для этого случая не было выполнено моделирование линии с неоднородным диэлектрическим заполнением. Поэтому актуально исследовать возможности получения такой линии и при неоднородном диэлектрическом заполнении.

Цель работы – показать возможность распространения импульса без искажений его формы перекрестными наводками в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением. Для этого надо сформулировать условия распространения импульса в витке меандровой линии задержки без искажений его формы перекрестными наводками; выполнить квазистатическое моделирование меандровой линии с покрывающим диэлектрическим слоем; продемонстрировать возможные искажения и причины их возникновения при невыполнении одного из условий.

Значительный вклад в искажения формы импульса вносят перекрестные наводки от его фронта и спада. Поэтому для прохождения сигнала по линии без искажений перекрестными наводками необходимо уменьшить или компенсировать их влияние.

Известно исследование компенсации перекрестной наводки на дальнем конце за счет оптимизации диэлектрического заполнения линии [8]. Условие такой компенсации – равенство погонных задержек четной ( $\tau_e$ ) и нечетной мод ( $\tau_o$ ) (важно отметить, что в работе [7] оно выполняется за счет однородности диэлектрического заполнения)

$$\tau_e = \tau_o. \tag{1}$$

Выполнение условия (1) в линии с неоднородным диэлектрическим заполнением, для случая ПП, возможно за счет оптимизации параметров покрывающих диэлектрических слоёв (например, паяльной маски или влагозащитного покрытия), так как параметры подложек и препрегов имеют близкие значения. В итоге, выбором оптимальных параметров покрывающих слоев можно компенсировать дальнюю перекрестную наводку.

Для исключения влияния наводки на ближнем конце на форму сигнала необходимо выбором длины полувитка ( $l$ ) обеспечить значение задержки в линии большее или равное сумме длительностей фронта ( $t_f$ ), плоской вершины ( $t_d$ ) и спада импульса ( $t_r$ ) [7]:

$$2\tau \cdot l \geq t_r + t_d + t_f, \tag{2}$$

где  $\tau = \tau_e = \tau_o$  при условии (1).

Для демонстрации возможности получения линии задержки, не искажающей импульс перекрестными наводками, рассмотрим один виток меандровой линии, поперечное сечение которого представлено на рис. 1, а. Параметры линии: ширина проводников  $w = 120$  мкм, толщина проводников  $t = 30$  мкм, расстояние между проводниками  $s = 120$  мкм, расстояние от края структуры до проводника  $d = 3w$ , толщина диэлектрической подложки  $h_1 = 100$  мкм, толщина покрывающего диэлектрического слоя  $h_2 = 50$  мкм; относительные диэлектрические проницаемости подложки и покрывающего слоя ( $\epsilon_{r1} = 4,49$ ,  $\epsilon_{r2} = 4,9$ ) выбраны так, чтобы выполнялось условие (1).

Моделируемая электрическая схема представлена на рис. 1, б. Линия состоит из двух параллельных проводников в диэлектрическом заполнении, соединенных между собой на дальнем конце. Один из проводников на ближнем конце соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме источником э.д.с. с внутренним сопротивлением  $R1$ . Другой проводник линии соединен с приёмным устройством, представленным на схеме сопротивлением  $R2$ . Воздействующий импульс имеет вид трапеции с параметрами: амплитуда 1 В, длительности фронта, плоской вершины и спада импульса по 0,1 нс каждая. Значения  $R1$  и  $R2$  приняты равными соответствующим диагональным элементам матрицы характеристического импеданса.

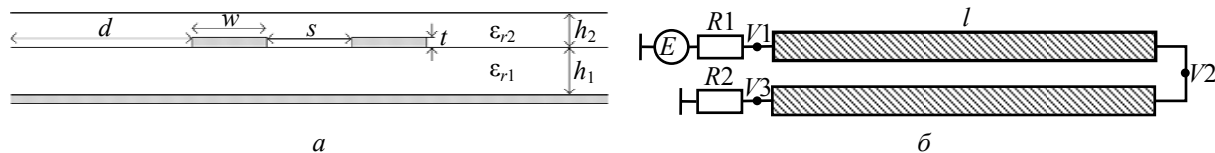


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) меандровой линии из одного витка

Для структуры на рис. 1, а, используя метод моментов [9], получим матрицы  $C$  и  $L$  (погонных коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции) и матрицу  $Z$  (характеристических импедансов):

$$C = \begin{bmatrix} 112,38 & -23,20 \\ -23,20 & 112,38 \end{bmatrix} \text{ пФ/м}, \quad L = \begin{bmatrix} 339,52 & 69,93 \\ 69,93 & 339,52 \end{bmatrix} \text{ нГн/м}, \quad Z = \begin{bmatrix} 56,17 & 11,58 \\ 11,58 & 56,17 \end{bmatrix}, \text{ Ом}.$$

Взяв квадратный корень из собственных значений произведения матриц  $L$  и  $C$ , получим погонные задержки четной и нечетной мод  $\tau_e = 6,042$  нс/м,  $\tau_o = 6,046$  нс/м. Аналогичное вычисление можно выполнить по аналитической формуле [10]:

$$\tau_{e,o} = \sqrt{(L_{11} \cdot C_{11} + L_{12} \cdot C_{12}) \pm (L_{12} \cdot C_{11} + L_{11} \cdot C_{12})}, \quad (3)$$

где  $C_{11}$  и  $C_{12}$  – соответствующие коэффициенты матрицы  $\mathbf{C}$ , а  $L_{11}$  и  $L_{12}$  – матрицы  $\mathbf{L}$ .

При условии (1) второе слагаемое из (3) равно нулю, тогда (3) принимает вид

$$\tau_{e,o} = \sqrt{L_{11} \cdot C_{11} + L_{12} \cdot C_{12}}. \quad (4)$$

По формуле (4) для структуры на рис. 1, а получаем  $\tau_{e,o} = 6,044$  нс/м. Таким образом, результаты численного и аналитического вычислений погонных задержек четной и нечетной мод совпадают, а условие (1) выполняется с хорошей точностью. Несовпадение результатов численного и аналитического вычисления можно объяснить погрешностями вычислений.

Для подтверждения того, что при выполнении условия (2) импульс не будет искажаться перекрестной помехой на ближнем конце, вычислен временной отклик схемы рис. 1, б. На рис. 2, а приведены формы сигналов в начале ( $V1$ ) и конце ( $V3$ ) линии при  $l = 12,5; 25; 50$  мм (импульсы в узле  $V1$  при разных  $l$  накладываются друг на друга).

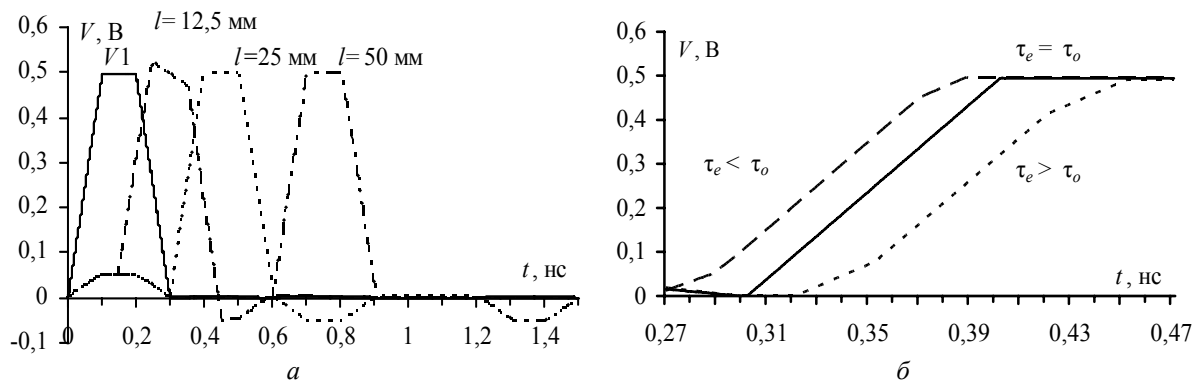


Рис. 2. Формы сигналов в начале и конце линии при разных  $l$  (а) и соотношениях погонных задержек четной и нечетной мод сигнала (б)

Из рис. 2, а видно, что при  $l = 25; 50$  мм форма импульса не искажается (так как при длительности импульса 0,3 нс условие (2) выполняется при  $l \geq 24,8$  мм). Однако появляются импульсы в виде трапеции (перед импульсом сигнала – положительной полярности, а после – отрицательной). Эти импульсы являются наводками на ближнем конце и не искажают форму импульса. Однако для уменьшения вероятности ложного срабатывания логических элементов, необходимо, чтобы уровень наводки не превышал 10% от уровня импульса в линии [11]. Это условие будет выполняться при

$$K_{NE} < 0,1, \quad (5)$$

где  $K_{NE} = 0,25(K_C + K_L)$ , где [12]

$$K_C = \frac{-C_{12}}{C_{11}}, \quad K_L = \frac{L_{12}}{L_{11}}. \quad (6)$$

Для рассмотренной линии, подставив значения элементов матриц  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{L}$ , из (6) получим  $K_C = 0,206$ ,  $K_L = 0,205$ , а по (5)  $K_{NE} = 0,103$ , следовательно, уровень наводки на ближнем конце составляет 10,3% от уровня импульса. Уровень наводки из графика рис. 2, а составляет 10%. Как видно, аналитические оценки согласуются с оценками из отклика.

Форма сигнала при  $l = 12,5$  мм искажена, наводки накладываются на фронт и спад сигнала. Из-за этого фронт сигнала поднимается (в начале появляется положительная ступенька, а в конце – выброс), а спад опускается (в начале появляется провал, а в конце – отрицательная ступенька). В результате создается эффект уменьшения задержки импульса.

На рис. 2, б приведены расширенные фрагменты формы сигнала в конце линии ( $V3$ ) для случая из рис. 2, а ( $l = 25$  мм), когда исключено влияние перекрестной помехи на ближнем конце на фронт импульса, но при разных соотношениях погонных задержек четной и нечетной мод сигнала, которые достигались изменением диэлектрической проницаемости покрывающего слоя. Для получения  $\tau_e < \tau_o$  выбрано  $\epsilon_{r2} = 2,1$  ( $\tau_e = 5,40$  нс/м и  $\tau_o = 5,77$  нс/м), а для  $\tau_e > \tau_o$  выбрано  $\epsilon_{r2} = 10,2$  ( $\tau_e = 7,06$  нс/м,  $\tau_o = 6,42$  нс/м). Из рис. 2, б видно, что только при выполнении условия (1) фронт импульса не искажается. В обоих других случаях, из-за разности погонных задержек четной и нечетной мод, на нижней и верхней частях фронта появляются искажения в виде пологих участков. Таким образом, для

прохождения импульса по меандру без искажений перекрестными наводками обязательно выполнение одновременно условий (1) и (2).

Приведенный пример одновитковой меандровой линии является простым из-за наличия перекрестных наводок только между двумя полувитками. Однако его рассмотрение важно для последующего анализа более сложных многовитковых структур. В дальнейшем полезными являются исследования возможности уменьшения или увеличения задержки в линии только за счет диэлектрических свойств покрывающего слоя на примере простых линий из одного витка. Такие исследования позволят оценить возможность проектирования сложных меандровых линий с аналогичными свойствами.

Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания № 8.1802.2014/К Минобрнауки России. Вычисление матриц погонных параметров связанных линий выполнено при поддержке РФФИ по проекту 14-19-01232 в ТУСУРе.

#### *Литература*

1. Wu R.B. Laddering Wave in Serpentine Delay Line / R.B. Wu, F.L. Chao // IEEE Trans. on Compon., Packag., and Manuf. Techn. – 1995. – Vol. 18, № 4, pt. B. – P. 644–650.
2. Wu T.L. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress / T.L. Wu, F. Buesink, F. Canavero // IEEE Trans. on EMC. – 2013. – Vol. 55, № 4. – P. 624–638.
3. Bhohe A.U. Meander delay line challenge problem: a comparison using FDTD, FEM and MoM / A.U. Bhohe, C.L. Holloway, M. Piket-May // Proc. IEEE Int. Symp. on EMC. – 2001. – Vol. 2. – P. 805–810.
4. Rubin B.J. Study of meander line delay in circuit boards / B.J. Rubin, B. Singh // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn. – 2000. – Vol. 48, № 9. – P. 1452–1460.
5. Kabiri A. Design of a Controllable Delay Line / A. Kabiri, Q. He, M.H. Kermani, O.M. Ramahi // IEEE Trans. on Advanced Packaging. – 2010. – Vol. 33, Is. 4. – P. 1080–1087.
6. Ramahi O.M. Analysis of Conventional and Novel Delay Lines: A Numerical Study / Applied Computational Electromagnetics Society journal. – 2003. – № 3. – P. 181–190.
7. Газизов Т.Р. Искажения импульсного сигнала в простых меандровых линиях // Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – Т. 4, № 3. – С. 34–38.
8. Gazizov T.R. Far-end crosstalk reduction in double-layered dielectric interconnects / IEEE Trans. on EMC. Special issue on recent advances in EMC of printed circuit boards. – 2001. – Vol. 43, № 4. – P. 566–572.
9. Gazizov T.R. Analytic expressions for Mom calculation of capacitance matrix of two dimensional system of conductors and dielectrics having arbitrary oriented boundaries / Proc. of the 2001 IEEE EMC Symposium. – Montreal, Canada, 2001. – Vol. 1. – P. 151–155.
10. Maio I. Efficient Transient Analysis of Nonlinearly Loaded Low-Loss Multiconductor Interconnects / I. Maio, S. Pignari, F. Canavero // An International Journal: Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 1994. – Vol. 5, № 1. – P. 7–19.
11. Ramahi O.M. Full-Wave Analysis of Delay Lines / O.M. Ramahi, B. Archambeault // Proc. of 14th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Exhibition on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, Switzerland, 2001. – P. 537–539.
12. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1(31). – С. 39–50.

---

#### **Суровцев Роман Сергеевич**

Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: surovtservers@gmail.com

#### **Заболоцкий Александр Михайлович**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник каф. телевидения и управления ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: Zabolotsky\_am@mail.ru

**Газизов Тальгат Рашитович**

Д-р. техн. наук, ст. науч. сотрудник, проф. каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

**Орлов Павел Евгеньевич**

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: praetorian281@gmail.com

Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Orlov P.E.

**Pulse signal propagation in the meander line with nonhomogeneous dielectric filling without distortions of its waveform by crosstalk**

Conditions of pulse signal propagation in a turn of meander delay line without distortions of its waveform by crosstalk are formulated. Quasi-static simulation of meander line with covering dielectric layer is performed. Possible distortions and the reasons of their occurrence without one of the conditions are demonstrated.

**Keywords:** meander line, dielectric filling, per unit lengths delay, even and odd modes.

---