

## **Передача импульсного сигнала по витку меандровой линии без искажения ближней перекрестной наводкой**

**Суровцев Р.С.\***, **Заболоцкий А.М.\*\***, **Газизов Т.Р.\*\*\***

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
ТУСУР, проспект Ленина, 40, Томск, 634050, Россия*

*\*e-mail: [surovtsevrs@gmail.com](mailto:surovtsevrs@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [zabolotsky\\_am@mail.ru](mailto:zabolotsky_am@mail.ru)*

*\*\*\*e-mail: [talgat@tu.tusur.ru](mailto:talgat@tu.tusur.ru)*

### **Аннотация**

Показана возможность передачи импульсного сигнала по витку меандровой линии без искажения его формы ближней перекрестной наводкой. Для этого сформулировано условие такой передачи, выполнена оптимизация параметров витка меандровой линии в соответствии с этим условием и для согласования линии с измерительным трактом. По результатам оптимизации из стеклотекстолита марки FR-4 изготовлена печатная плата с макетами и выполнено экспериментальное исследование. На примере импульса с длительностью 280 пс и линии длиной 151 мм, обеспечивающей задержку 1 нс, показано, что форма ближней перекрестной наводки не оказывает влияния на форму основного импульса и составляет менее 10% от его амплитуды.

**Ключевые слова:** виток меандровой линии, погонные задержки, четная и нечетная моды.

Меандровые линии задержки являются традиционными элементами печатных плат и служат для синхронизации импульсов, когда невозможно из разных участков платы протянуть линии передачи одинаковой длины к точке приема из-за сложности или плотности трассировки печатной платы [1]. Исследованию меандровых линий посвящено большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых. Тематика этих работ, в основном, посвящена исследованию физических причин возникновения и борьбе с нежелательными искажениями формы сигналов в меандровых линиях на печатной плате [2–10]. Среди полученных результатов этих работ примечательна выявленная линейная зависимость задержки в меандровой линии от количества витков, что позволяет упростить процесс проектирования [10]. Среди результатов отечественных работ примечательна показанная возможность коррекции фронта импульсного сигнала в одном витке меандровой линии, необходимость в которой вызвана характерным для реальных межсоединений затягиванием фронта из-за потерь и дисперсии [11]. Также, нельзя не упомянуть ряд классических работ, посвященных исследованию одновитковых меандровых линий, так называемых С-секций, применяющихся в микроволновой технике с целью фазовой коррекции сигнала [12–14].

Говоря об искажениях в меандровых линиях, следует пояснить физическую природу их возникновения. Они возникают из-за наводок, инициируемых фронтом и спадом импульсного сигнала, которые могут вносить неконтролируемые искажения формы сигнала, изменяя его характеристики. Влияние наводок нарушает целостность сигналов в печатных платах и становится все критичнее для цифровой электроники, в особенности авиационной и ракетно-космической, из-за роста

тактовых частот используемых сигналов [15]. Обеспечение целостности сигналов печатных плат является актуальной задачей электромагнитной совместимости, которая решается с помощью тщательного моделирования распространения электрических сигналов, например, в бортовой кабельной сети самолета [16]. В частности, с помощью средств моделирования решается актуальная задача оценки воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета [17].

Известны исследования, где показана возможность задержки импульсного сигнала в витке меандровой линии без искажений. Такая возможность показана на примере симметричной полосковой линии, в которой значения погонных задержек мод всегда совпадают [18]. Показана возможность задержки сигнала без искажений в микрополосковой линии с покрывающим диэлектрическим слоем [19]. Поскольку такая линия имеет неоднородное диэлектрическое заполнение, то необходимо минимизировать разность погонных задержек мод линии и модальные искажения, вызванные этой разностью, за счет оптимального выбора параметров поперечного сечения. Помимо выравнивания значений погонных задержек также необходимо обеспечить задержку в линии большую, чем длительность сигнала. Тогда основной сигнал пройдет по линии без искажений, но перед ним и после него будут наблюдаться импульсы положительной и отрицательной полярности соответственно. По существу, эти импульсы являются перекрестной наводкой на ближнем конце линии от фронта и спада сигнала (в терминологии связанных линий). Чтобы исключить возможность ложного срабатывания логических элементов из-за наблюдаемых импульсов, необходимо, чтобы амплитуда положительного импульса

была не более 10% от амплитуды основного сигнала. Таким образом, при оптимальном выборе параметров линии возможна передача сигнала без искажений его формы. Однако такая возможность показана лишь на примере моделирования, причем, идеализированных структур, без учета потерь и дисперсии, а также идеализированных воздействий.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности передачи импульсного сигнала по витку меандровой линии без искажения перекрестной наводкой на ближнем конце. Для этого сначала необходимо выбрать оптимальные параметры поперечного сечения линии для согласования линии с измерительным трактом и прохождения сигнала без искажений перекрестными наводками. После необходимо спроектировать и изготовить печатную плату с набором макетов меандровых линий. Завершающим шагом является проведение натурного эксперимента.

Поскольку измерительная установка (рис. 1) основана на базе комбинированного осциллографа С9-11 (состоит из анализатора сигналов, индикатора, генератора, стробоскопического преобразователя и формирователя импульсов), тракт которого имеет внутреннее сопротивление 50 Ом, то при оптимизации обеспечивалось равенство коэффициентов на главной диагонали матрицы характеристических импедансов линии 50 Ом. Вторым критерием выбора параметров линии является задержка в линии большая длительности импульса, подаваемого с формирователя для прохождения сигнала без искажения перекрестной наводкой.



Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Для изготовления печатной платы выбран типовой материал – двухсторонне фольгированный стеклотекстолит марки FR-4. Толщины основы и фольги выбранного материала составляют  $h=2000$  мкм и  $t=35$  мкм соответственно. Диэлектрическая проницаемость материала принята равной 5.4. Поперечное сечение каждого из макетов меандровых линий соответствует связанной микрополосковой линии (рис. 2).

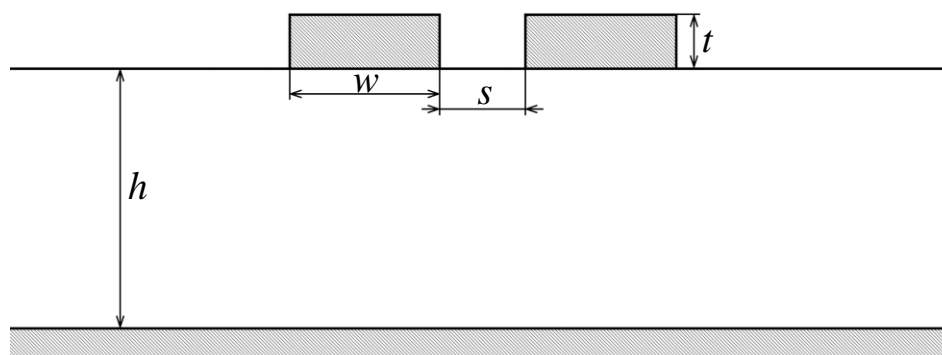


Рис. 2. Поперечное сечение меандровой микрополосковой линии

Так как часть параметров поперечного сечения линии имеет типовые значения, то выполнена оптимизация только двух параметров – ширины сигнальных проводников  $w$  и разнеса между ними  $s$ . После оптимизации ширина проводника принята равной  $w=3280$  мкм, а разнос между проводниками первого макета  $s=1640$  мкм. Вычисленные в системе компьютерного моделирования TALGAT [20]

матрицы вторичных параметров (погонных задержек и характеристических импедансов) получились следующими:

$$\tau = \begin{bmatrix} 6,21 & 0 \\ 0 & 6,82 \end{bmatrix} \text{ нс/м}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 49,31 & 7,47 \\ 7,47 & 49,31 \end{bmatrix} \text{ Ом.}$$

На рис. 3 приведена схема соединений витка линии. Она состоит из двух параллельных проводников длиной  $l$ , соединенных между собой на одном конце. Один из проводников линии соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . Другой проводник линии соединен с приёмным устройством, которое представлено на схеме сопротивлением  $R2$ . Значения  $R1$  и  $R2$  при моделировании приняты равными 50 Ом.

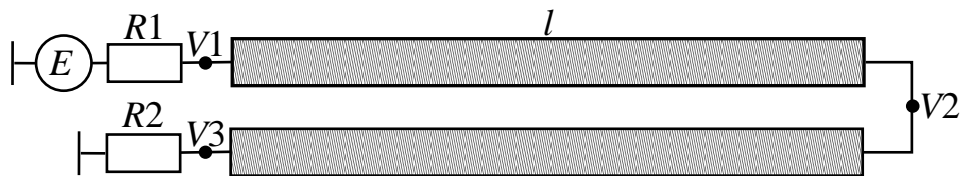


Рис. 3. Схема соединений витка меандровой линии

Следующим шагом является выбор значения  $l$ , которое обеспечит прохождение импульсного сигнала без наложения на его фронт и спад импульсов перекрестной наводки. Для этого необходимо обеспечить выполнение условия

$$2 \cdot l \cdot \tau_{min} \geq t_r + t_d + t_f, \quad (1)$$

где  $\tau_{min}$  – наименьшее из значений погонных задержек четной и нечетной мод линии, а  $t_r$ ,  $t_d$  и  $t_f$  – длительности фронта, плоской вершины и спада импульса соответственно.



Рис. 4. Фрагмент печатной платы с макетами витков меандровых линий

Для защиты стробоскопического преобразователя при снятии осциллограмм к его входу подключался аттенюатор 20 дБ. Для минимизации погрешностей измерений, вносимых измерительной аппаратурой, перед проведением экспериментальных исследований выполнена программная калибровка канала. Поэтому погрешность измерений временных характеристик сигнала не превышает  $\pm 1\%$ , а амплитудных –  $\pm 7\%$ .

Сначала с выхода генератора на вход комбинированного осциллографа через аттенюатор 20 дБ подавался импульс с длительностью 440 пс по уровню половины от пикового значения амплитуды (720 мВ). Осциллограмма сигнала на выходе генератора приведена на рис. 5а. Для проведения натурального эксперимента выбрана линия общей длиной 151 мм, обеспечивающая задержку сигнала 1 нс. Выбранная линия включалась в измерительный тракт между выходом генератора и входом

осциллографа. Осциллограмма сигнала на выходе линии приведена на рис. 5б. Из нее видно, что в начале фронта сигнала наблюдается ступенька, амплитудой 53 мВ. Она является импульсом ближней перекрестной наводки от фронта сигнала. Необходимо отметить, что на спад сигнала также накладывается импульс (перекрестной наводки от спада) отрицательной полярности, однако этот импульс искажен из-за наложения на его форму отражений от конца линии. Поскольку выявлено наложение на фронт и спад сигнала импульсов перекрестной наводки, то можно сделать вывод, что выбранной длины линии недостаточно для обеспечения задержки сигнала из рис. 5а без искажений.

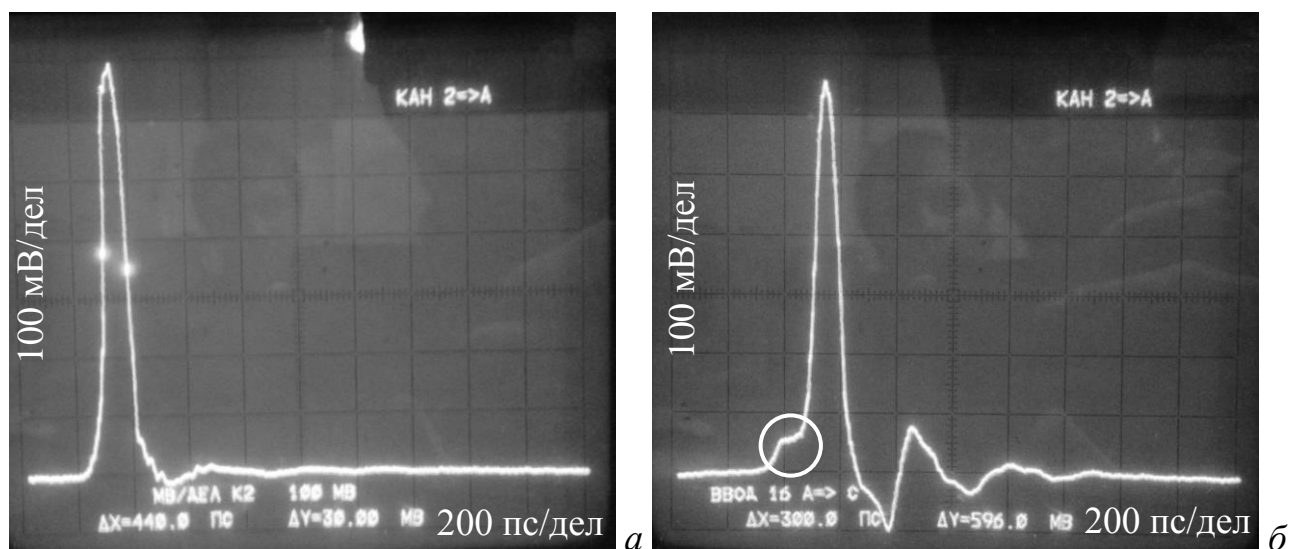


Рис. 5. Осциллограммы на выходе генератора (а) и исследуемой линии (б) при длительности импульса 440 пс

В следующем эксперименте длительность воздействующего импульса была уменьшена до 280 пс. Осциллограммы воздействующего и выходного сигналов представлены на рис. 6. Видно, что от фронта основного сигнала отделился импульс амплитудой 52 мВ, который является импульсом перекрестной наводки от фронта. Поскольку амплитуда импульса наводки не превышает 10% от амплитуды основного



сигнала (603 мВ), то это приемлемо. На спаде сигнала наблюдается аналогичная ситуация – импульс отрицательной полярности отделяется от спада сигнала. После этого к концу линии приходят отражения. Таким образом, проведенный натурный эксперимент доказывает возможность задержки импульсного сигнала без искажения его формы ближней перекрестной наводкой. Отметим, что в эксперименте не было исключено влияние дальней перекрестной наводки, поскольку не обеспечено равенство погонных задержек четной и нечетной мод. Оно может быть обеспечено в симметричной полосковой линии, а также в микрополосковой линии с покрывающим диэлектрическим слоем (например, паяльной маски или влагозащитного покрытия) при оптимальном выборе его параметров.

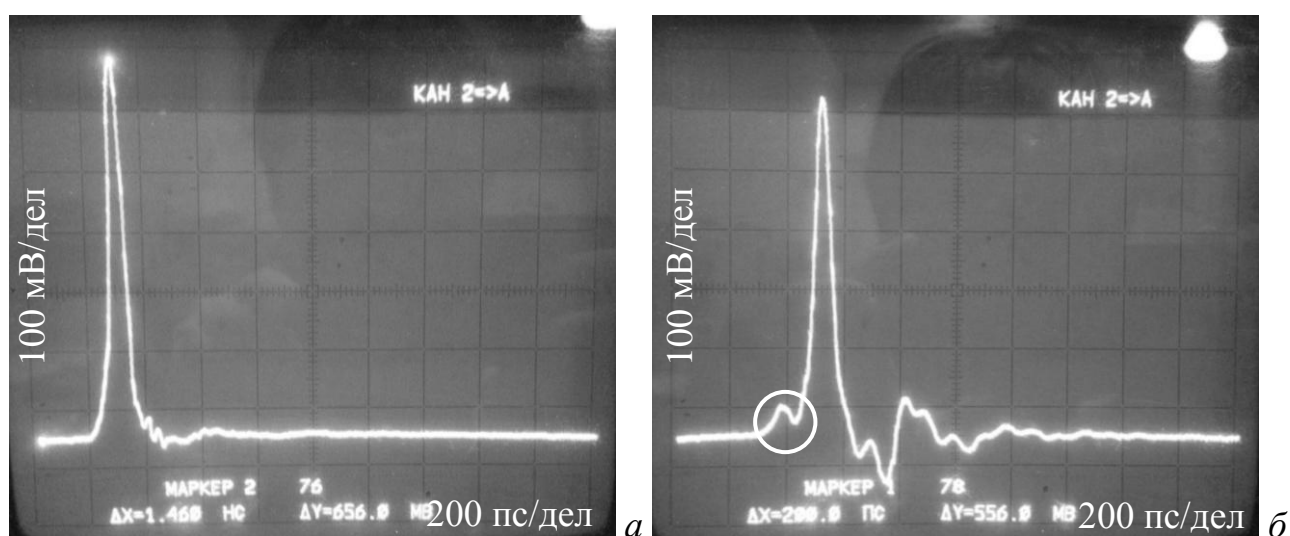


Рис. 6. Осциллограммы на выходе генератора (а) и исследуемой линии (б) при длительности импульса 280 пс

Рассмотренный пример одновитковой меандровой линии является простым из-за наличия перекрестных наводок только между двумя проводниками. Однако его рассмотрение важно для последующего анализа более сложных структур (многопроводных, когда одновременно в линии распространяется  $N$  мод по

количеству сигнальных проводников). Эти исследования позволят оценить возможность проектирования сложных меандровых линий с аналогичными свойствами.

*Обзор выполнен в рамках проекта №8.9562.2017/БЧ Минобрнауки РФ.*

*Разработка макетов выполнена за счет средств гранта №14-19-01232*

*Российского научного фонда в ТУСУРе.*

*Оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.*

### **Библиографический список**

1. Лысенко А.А., Лячек Ю.Т., Полубасов О.Б. Автоматическое формирование линий задержки в топологии печатного монтажа // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. 2011. № 9. С. 61–65.
2. Rubin B.J., Singh B. Study of meander line delay in circuit boards // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48. Pp. 1452–1460.
3. Ramahi O.M., Archambeault B. Full-wave analysis of delay lines // Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, February 2001. Pp. 537–539.
4. Bhobe A.U., Lolloway C., Picket-May M. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2001. Vol. 2. Pp. 805–810.
5. Archambeault B., Roden A., Ramahi O. Using PEEC and FDTD to Solve the Challenge Delay Line Problem // IEEE EMC International Symposium. Montreal, Canada. 2001. Vol. 2. Pp. 1–4.

6. Wu R.-B., Chao F.-L. Laddering Wave in Serpentine Delay Line // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: part B, advanced packaging. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1995. Vol. 18. № 4. Pp. 644–650.

7. Wu R.-B. Flat Spiral Delay Line Design with Minimum Crosstalk Penalty // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: part B, advanced packaging. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1995. Vol. 19. № 2. Pp. 397–402.

8. Kim G., Kam D.G., Kim J. TDR/TDT Analysis by Crosstalk in Single and Differential Meander Delay Lines for High Speed PCB application // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Portland, USA, 2006. Vol. 3. Pp. 657–662.

9. Sudo T., Kudo J., Ko Y., Ito K. Experimental Characterization and Numerical Modeling Approach of Meander Delay Lines // IEEE EMC International Symposium, Minneapolis, 2002. Vol. 2. Pp. 711–715.

10. Kabiri A., He Q., Kermani M.H., Ramahi O.M. Design of a Controllable Delay Line // IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010. Vol. 33. № 4. Pp. 1080–1087.

11. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Исследование искажений импульсного сигнала в меандровых линиях печатных плат // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 3. С. 21–24.

12. Jones E.M.T., Bolljahn J.T. Coupled-Strip-Transmission-Line and Directional Couplers // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1956. Vol. 4. № 2. Pp. 75–81.

13. Schiffman B.M. A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1958. Vol. 6. № 2. Pp. 232–237.

14. Zysman G.I., Johnson A.K. Coupled Transmission Line Networks in an Inhomogeneous Dielectric Medium // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1969. Vol. 17. № 10. Pp. 232–237.

15. Wu T.L., Buesink F., Canavero F. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. Vol. 55. № 4. Pp. 624–638.

16. Клыков А.В., Кириллов В.Ю. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых кабельных сетей самолетов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30760>

17. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46938>

18. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Искажения импульсного сигнала в простых меандровых линиях // Инфокоммуникационные технологии. 2006. Т. 4. № 3. С. 34–38.

19. Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Орлов П.Е. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками // Доклады

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.  
2014. № 4(34). С. 34–38.

20. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. №2(36). С. 45–50.