

6. Filatov P.E. Increasing the efficiency of energydeficient multi-channel communication systems using coordinated signal conversion. *Materialy konferencii «Prikladnaia elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy-2016»* [Proc. Conf. «Applied electrodynamics, photonics and alive systems-2016»]. Kazan, 2016, pp. 143-148. (In Russian)
7. Kuznetsov I.V., Voronkov G.S., Sultanov A.Kh., Antonov V.V. Razrabotka differentsialnogo OFDM-preobrazovatelia s koordinirovannym predskazaniem signalov dlia energodeficitnykh sistem svyazi [Differential OFDM-converter for energy deficient communication system based on coordinated signal predictor design]. *Radiotekhnika*, 2016, no. 12, pp. 59-63.
8. Ziuko A.G., Klovskaia D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. *Teoriia elektricheskoi svyazi: uchebnik dlia vuzov* [Theory of electrical communication: a textbook for high schools]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1998. 432 p.
9. Iserman R. *Digital Control Systems*. Springer, Berlin, 1981. (Russ. ed.: S.P. Zabrodin, A.I. Titkov, A.V. Shalashov. *Tsifrovye sistemy upravleniia*. Moscow, Mir Publ., 1984. 541 p.).
10. Voronkov G.S. Modelirovanie differentsial'nogo preobrazovaniia signalov OFDM dlja peredachi izobrazhenij [Modeling OFDM differential signal transformation for image transmission]. *Materialy konferencii «Prikladnaia elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy-2017»* [Proc. Conf. «Applied electrodynamics, photonics and alive systems-2017»]. Kazan, 2017, pp.17-20.

Received 15.06.2017

УДК 621.3

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОГО ВИТКА МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ С ЛИЦЕВОЙ СВЯЗЬЮ

Носов А.В., Суровцев Р.С., Газизов Т.Т.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ

E-mail: timurtsk@gmail.com

Выполнен детальный обзор исследований меандровых линий задержки как устройств защиты от сверхкоротких импульсов. В рамках обзора рассмотрены линии с боковой и лицевой связью. Выполнена оценка влияния параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью на разность погонных задержек четной и нечетной мод линии и среднее геометрическое их волновых сопротивлений. По результатам оценки и оптимизации выбран такой набор параметров поперечного сечения для изготовления макетов меандровой линии, при котором обеспечивается согласование линии с трактом 50 Ом с целью минимизации отражений в измерительном тракте при проведении экспериментальных исследований. Вычислена длина линии, позволяющая разложить сверхкороткий импульс длительностью 100 пс.

Ключевые слова: меандровая линия, лицевая связь, оптимизация, волновое сопротивление, погонная задержка, сверхкороткий импульс

Введение

В настоящее время основную часть элементов современных цифровых устройств составляют микропроцессоры и системы, построенные на их основе. Их активное развитие в последние несколько десятилетий привело к значительному увеличению быстродействия современных устройств, а также к росту их рабочих частот и уменьшению напряжений используемых сигналов. В связи с увеличивающимся уровнем мощности и расширяющимся диапазоном частот электромагнитных воздействий, а также с растущим числом их источников разной природы проявляется необходимость повышения стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры

(РЭА) к воздействию электромагнитного излучения. Все реальнее становится угроза преднамеренного электромагнитного воздействия с целью выведения из строя важных объектов инфраструктуры общества в террористических целях, о чем свидетельствует ряд зарегистрированных случаев такого воздействия [1].

Наиболее опасны импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, которые могут проникать внутрь РЭА. Традиционно для защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) применяются электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки, ограничители помех. Однако эти устройства имеют ряд недостатков, наиболее существенными из которых

являются недостаточное быстрдействие, малая мощность, а также наличие паразитных параметров, затрудняющих защиту РЭА от мощных СКИ.

Кроме того, реализация такой защиты требует обязательного введения в состав защищаемого устройства дополнительных компонентов, а защита РЭА от воздействий в широком диапазоне требует построения сложных многоступенчатых устройств, что неизбежно ведет к росту массогабаритных показателей устройства в целом. Между тем на практике требуются простые и дешевые устройства защиты от СКИ. Поэтому актуален поиск новых технических решений.

В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в простой печатной структуре – витке меандровой линии задержки [2-4]. Достоинством подхода является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии, прямое назначение которых – задержка сигнала на печатной плате для тактирования импульсных сигналов в точках приема.

Защита от СКИ с помощью предложенного подхода достигается ослаблением его амплитуды за счет разложения сигнала на последовательность импульсов с меньшей (относительно исходной) амплитудой. Для этого необходимо выполнить ряд условий, связывающих параметры меандровой линии и длительность СКИ. Так, для линии с однородным диэлектрическим заполнением необходимо, чтобы импульс основного сигнала пришел к концу линии по окончании импульса перекрестной наводки на ближнем конце линии (в терминологии связанных линий) за счет обеспечения нескольких простых условий [5-6].

Основным из них является значение задержки в линии большее, чем длительность СКИ. Тогда за счет оптимизации связи между сигнальными проводниками линии могут быть обеспечены минимизация и равенство амплитуд импульсов наводки и основного сигнала на выходе линии [2]. В линии с неоднородным заполнением могут различаться скорости распространения мод, что может быть использовано для разложения основного сигнала на несколько импульсов. Для этого необходимо, чтобы значение удвоенного произведения модуля разности погонных задержек мод сигнала на длину линии было больше длительности СКИ. Обеспечение этого позволяет дополнительно ослабить амплитуду СКИ в 1,5 раза в линии с боковой связью [3]. Указанная воз-

можность разложения СКИ в витке меандровой микрополосковой линии доказана экспериментально и продемонстрировано ослабление СКИ в 6,3 раза [7-8].

Также доказана экспериментально возможность разложения СКИ в С-секции с лицевой связью, на выходе которой максимальный уровень сигнала составил 24% от уровня сигнала на ее входе [9]. Однако совершенно неосвещенными остались результаты предварительного моделирования, которое является важным этапом перед проведением экспериментальных исследований и позволило уменьшить затраты на изготовление конечного устройства, а также получить физически реализуемые по обычной технологии печатных плат значения параметров поперечного сечения исследуемой структуры. На практике в межсоединениях печатных плат существуют потери, дисперсия, отражения от неоднородностей и множество других факторов, которые зачастую сложно учесть при проектировании.

Кроме того, корректность функционирования реальных устройств РЭА в определенной степени зависит от качества изготовления печатной платы. Зачастую технологические ограничения, которые накладываются предприятием-изготовителем, не позволяют реализовать некоторые идеи и подходы на практике. Тогда разработчики прибегают к средствам параметрической оптимизации для отыскания наиболее приемлемого набора параметров с учетом технологических возможностей предприятия-изготовителя и требований решаемой задачи. Поэтому цель данной работы – представить результаты предварительного моделирования и оптимизации параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью с учетом типовых параметров материалов для изготовления печатных плат.

Исходные данные для моделирования

Поперечное сечение и схема соединений исследуемой линии представлены на рис. 1. Все проводники линии имеют одинаковую ширину w и толщину t , буквенные символы «О» и «А» введены для обозначения опорного и сигнального (активного) проводников (см. рис. 1а). Линия 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 рис. 1б идеальным источником ЭДС E и внутренним сопротивлением R_1 . Другой проводник линии соединен с приемным устройством, представленным на схеме сопротивлением R_2 .

Оптимизация параметров линии выполнялась в системе TALGAT [10].

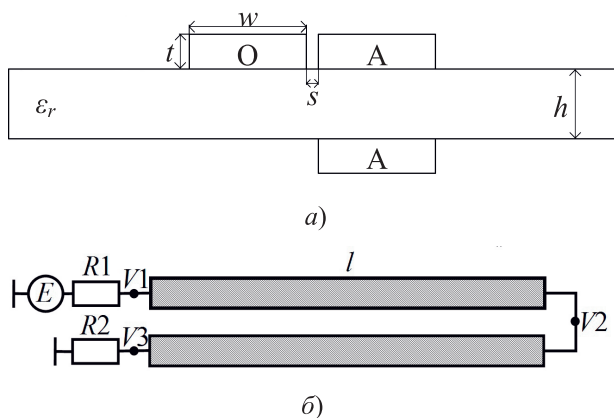


Рис. 1. Виток меандровой линии с лицевой связью: а) поперечное сечение; б) схема соединений

Поскольку натуральный эксперимент предполагалось проводить на базе комбинированного осциллографа С9-11 (с внутренним сопротивлением 50 Ом и полосой рабочих частот 17,8 ГГц), то известна минимальная длительность импульса (около 100 пс), которая может быть обеспечена его генератором. Для разложения такого импульса нужно, чтобы значение удвоенного произведения модуля разности погонных задержек мод линии на ее длину было больше 100 пс. Еще одним важным условием является минимизация отражений в измерительном тракте осциллографа. Для этого необходимо согласование характеристического импеданса исследуемой линии с трактом. Это может быть обеспечено равенством среднего геометрического волновых сопротивлений мод сопротивлению измерительного тракта 50 Ом.

В качестве материала основы выбран материал FR-4. В соответствии с технической документацией изготовителя печатных плат, на частоте 1 МГц диэлектрическая проницаемость материала может варьироваться в диапазоне от 3,5 до 4,1 [11]. Поэтому при моделировании принято среднее значение диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 3,8$. Типовыми фиксированными геометрическими параметрами, которые изменяются дискретно, для выбранного материала являются толщина слоя основы ($h = 500; 1000; 1500$ и 2000 мкм) и толщина фольги ($t = 18$ и 35 мкм). Варьируемыми параметрами являются ширина сигнального проводника w и расстояние между сигнальным и опорным проводниками s .

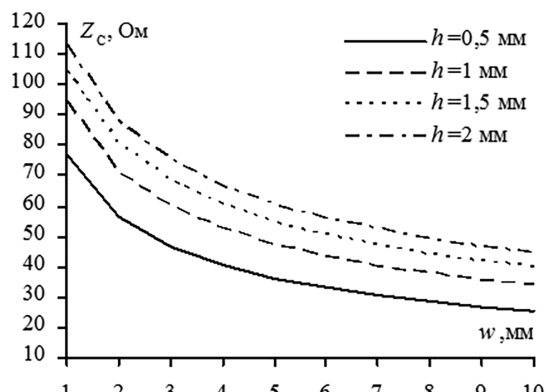
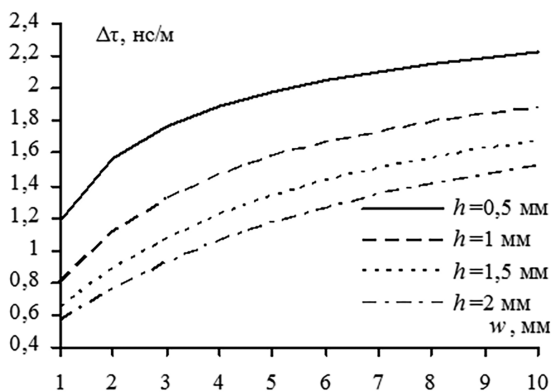
Результаты оптимизации

Выполнены оценки влияния параметров поперечного сечения исследуемой линии на изменение разности погонных задержек мод $\Delta\tau$ и среднее геометрическое их волновых сопротивлений Z_c . В результате исследований выявлено, что результаты расчета $\Delta\tau$ и Z_c для разных значений толщины фольги отличаются незначительно (максимальное отклонение для $\Delta\tau$ составляет 2%, а для Z_c – 1,3%), поэтому целесообразно привести результаты только для одного значения, например для $t = 18$ мкм. На рис. 2-3 приведены зависимости $\Delta\tau$ при изменении w и s для разных h , а на рис. 4-5 – зависимости Z_c при тех же параметрах. При этом значение w изменялось в диапазоне от 1 до 10 мм с шагом 1 мм (при фиксированных $s = 0,2$ и 1 мм), а значение s – от 0,2 до 1 мм с шагом 0,1 мм (при фиксированных $w = 1$ и 10 мм).

Из рис. 2 видна нелинейная зависимость $\Delta\tau$ от w . При $s = 0,2$ мм и $h = 0,5$ мм $\Delta\tau$ имеет наибольшие значения, изменяющиеся от 1,2 до 2,2 нс/м при увеличении w от 1 до 10 мм. При $s=1$ мм наблюдается аналогичное поведение зависимостей, однако значения $\Delta\tau$ сдвигаются выше и изменяются от 1,6 до 2,6 нс/м при увеличении w от 1 до 10 мм. При увеличении h график зависимости $\Delta\tau$ сдвигается ниже. Минимальные значения $\Delta\tau$ соответствуют $h = 2$ мм и составляют около 0,56 нс/м и 1,59 нс/м при $s = 0,2$ и 1 мм соответственно.

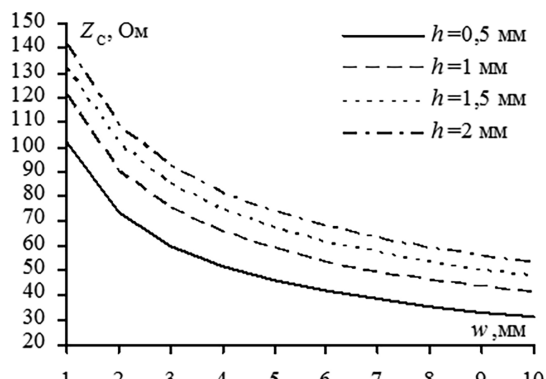
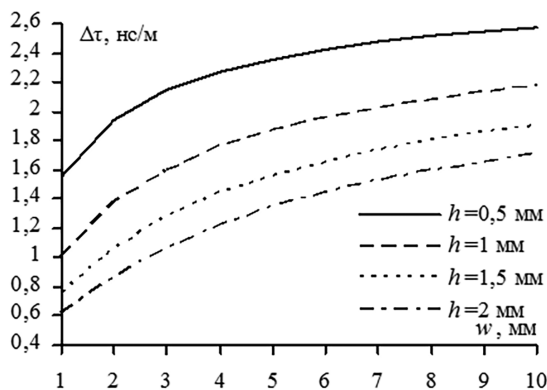
Поэтому с точки зрения максимизации длительности СКИ, который может быть разложен в линии с фиксированной длиной l , предпочтительнее в качестве основы печатной платы выбрать материал с $h = 0,5$ мм при наибольшем w . Аналогичное поведение наблюдается для зависимостей $\Delta\tau$ от s , приведенных на рис. 3. Однако при $w = 1$ мм, $h = 1,5$ и 2 мм в зависимостях появляется слабо выраженный минимум, $\Delta\tau$ изменяется слабо, а ее среднее значение составляет около 0,69 и 0,58 нс/м соответственно.

Из рис. 4 видна нелинейная зависимость Z_c от w . При увеличении h график зависимости Z_c сдвигается вверх по оси ординат. По мере увеличения w значение Z_c уменьшается. Из зависимостей также видно, что при всех значениях h существует такое значение w , при котором $Z_c = 50$ Ом. Так, при $s = 0,2$ мм среднее геометрическое волновых сопротивлений мод линии составляет 50 Ом при $w = 2,8; 4,7; 6$ и $7,9$ мм для $h = 0,5; 1; 1,5$ и 2 мм



a

a

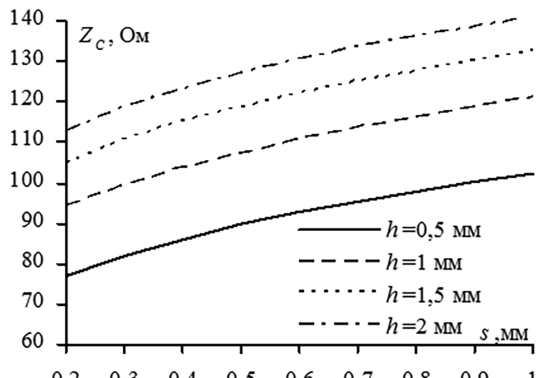
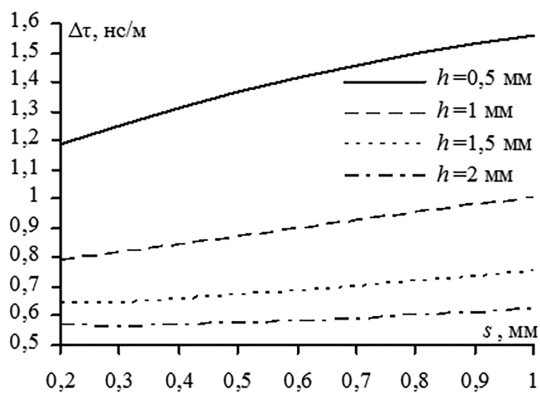


б

б

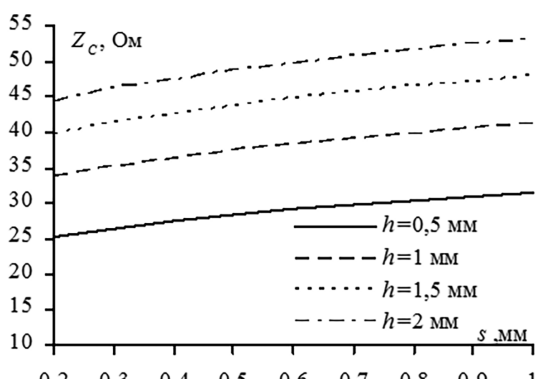
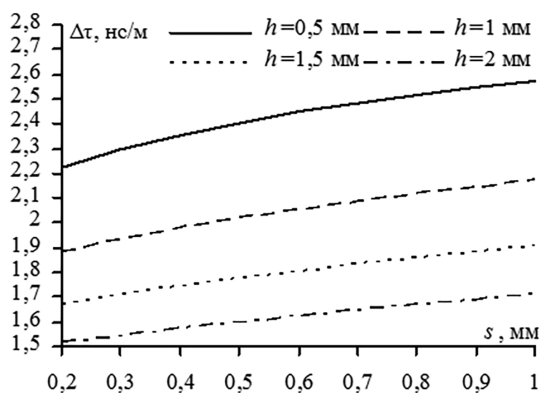
Рис. 2. Зависимости Δt от w для разных h при $s = 0,2$ (a) и 1 мм (б)

Рис. 4. Зависимости Z_c от w для разных h при $s = 0,2$ (a) и 1 мм (б)



a

a



б

б

Рис. 3. Зависимости Δt от s для разных h при $w = 1$ (a) и 10 мм (б)

Рис. 5. Зависимости Z_c от s для разных h при $w = 1$ (a) и 10 мм (б)

соответственно, а при $s = 1$ мм – при $w = 4,6$; 7; 9 и 10,5 мм для $h = 0,5$; 1; 1,5 и 2 мм соответственно. Противоположное поведение наблюдается для зависимостей Z_C от s – по мере увеличения s значение Z_C увеличивается (см. рис. 5). Наименьшее значение Z_C при $w = 1$ мм соответствует $s = 0,2$ мм для $h = 0,5$ мм и составляет 76,96 Ом, а при $w = 10$ мм оно составляет 25,26 Ом.

С учетом проведенных исследований выполнена оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью. После оптимизации получены следующие параметры поперечного сечения (см. рис. 1а): $t = 18$ мкм, $s = 0,2$ мм, $h = 1,5$ мм, $w = 6$ мм. При данных значениях параметров обеспечиваются значения $Z_C = 50,36$ Ом и $\Delta\tau = 1,43$ нс/м. Из последнего следует, что для разложения импульса с длительностью 100 пс длина линии должна быть не менее 35 мм.

Заключение

В статье представлены результаты оценки влияния изменения параметров поперечного сечения витка меандровой линии с лицевой связью на значение разности погонных мод и среднего геометрического их волновых сопротивлений, а также выполнена оптимизация параметров поперечного сечения. В результате исследований выбраны значения параметров поперечного сечения для изготовления макетов меандровой линии, при которых обеспечивается согласование линии с измерительным трактом, а также вычислена длина линии, позволяющая разложить СКИ с длительностью 100 пс.

При данном наборе физически реализуемых по обычной технологии печатных плат значений параметров поперечного сечения исследуемой структуры достижимы значения Z_C не только 50 Ом (СВЧ-тракт), но и 75 Ом (телевизионный тракт), 100 Ом (Ethernet) и др. (см. рис. 4-5), что показывает возможность более широкого использования результатов работы. Важна и возможность получения довольно высоких значений $\Delta\tau$, достигающих 2,6 нс/м (см. рис. 2) на обычном стеклотекстолите. Из полученных графиков легко оценить чувствительность характеристик к отклонениям соответствующих параметров, что важно для практики. Обзор выполнен в рамках проекта №8.9562.2017/БЧ Минобрнауки РФ, вычислительный эксперимент выполнен за счет гранта РНФ 14-19-01232 в ТУСУР.

Литература

1. Петкау О., Тарабцев А., Дерябин А., Ларионов С., Чванов В. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия // Безопасность объектов ТЭК. № 2 (6), 2014. – С. 74-76.
2. Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses // Proc. of Siberian Conference on Control and., Omsk, Russian Federation, 2015. – P. 1-7. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147227.
3. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. Proc. of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk, Russian Federation, 2015. – P. 1-3. doi: 10.1109/EDM.2015.7184519.
4. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 58, No. 4, 2016. – P. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
5. 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 ТУСУР. № 4 (34), 2014. – С. 36-40.
6. Патент RU 2556438. Линия задержки, неискажающая импульс. Заявл. 30.12.2013; опубл. 16.06.2015, бюл. №19.
7. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости. Дис. к.т.н. Томск, 2016. – 248 с.
8. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. // Proc. of X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines». Omsk, Russian Federation, 2016. – P. 151-154. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819093.
9. Носов А.В., Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой

- связью // Доклады ТУСУР. №3 (19), 2016. – С. 47-50.
10. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Р. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT // Доклады ТУСУР. № 2 (36), 2015. – С. 45-50.
11. Производство печатных плат. Монтаж печатных плат. ООО «МАЗТранс» // URL: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru> (д.о. 01.03.2017).

Получено 10.03.2017

Носов Александр Вячеславович, магистрант Кафедры телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Тел. (8-382) 241-34-39. E-mail: alexns2094@gmail.com

Суровцев Роман Сергеевич, к.т.н., доцент Кафедры ТУ ТУСУР. Тел. (8-382) 241-34-39. E-mail: surovsevrs@gmail.com

Газизов Тимур Тальгатович, к.т.н., с.н.с. Кафедры ТУ ТУСУР. Тел. (8-382) 241-34-39. E-mail: timurtsk@gmail.com

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF PROTECTIVE TURN OF MEANDER LINE WITH BROADSIDE COUPLING

Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T.

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

E-mail: timurtsk@gmail.com

A detailed review of research studies on the subject of using meander delay lines as protective devices against ultrashort pulses was carried out in the paper. The study was focused on the lines with edge and broadside coupling. The influence of cross section parameters of meander line turn with broadside coupling on the difference of per-unit delays of even and odd modes of the line and on geometric mean of their impedances was estimated. Based on evaluation and optimization results, cross section parameters were selected for prototyping of meander lines with impedance matching at 50 Ohm, which allow minimizing reflections in the measuring tract during experiments. The length of the line was calculated at which ultrashort pulses with duration of 100 ps can be successfully decomposed.

Keywords: meander line, broadside coupling, even and odd modes, ultrashort pulse

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.3.11

Nosov Alexander Viacheslavovich, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation; graduate student of the Department of Television and Control. Tel.: +73822413439. E-mail: alexns2094@gmail.com.

Surovtsev Roman Sergeevich, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Television and Control, PhD in Technical Science. Tel.: +73822413439. E-mail: surovsevrs@gmail.com.

Gazizov Timur Talgatovich, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russian Federation; Senior Researcher of the Department of Television and Control. Tel.: +73822413439. E-mail: timurtsk@gmail.com.

References

1. Pektau O., Tarabartsev A., Deryabtsev A., Larionov S., Chvanov V. Zashhita ob'ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa ot ugroz elektromagnitnogo vozdejstviya [Protection of the fuel & energy sector of threats of electromagnetic influence]. *Bezopasnost' obektov TEK*, 2014, no. 2, pp. 74–76.
2. Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zaboloysky A.M. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses. *Proc. of Siberian Conference on Control and Communications*, Omsk, Russian Federation, 2015, pp. 1-7. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147227.

3. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *Proc. of 16-th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Novosibirsk, Russian Federation, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/EDM.2015.7184519.
4. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
5. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Orlov P.E. Rasprostranenie impul'sa v meandrovoj linii s neodnorodnym dijelektricheskim zapolnieniem bez iskazhenij ego formy perekrestnymi navodkami [Signal propagation in the meander line with nonhomogeneous dielectric filling without distortions of its waveform by crosstalk]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2014, no. 4, pp. 36–40.
6. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Liniya zaderzhki, neiskazhayushhaya impul's* [Non-jamming delay line]. Patent RF, no. 2556438, 2013.
7. Surovtsev R.S. *Vychislitel'nye algoritmy, metodiki i rekomendacii dlja proektirovanija bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskogo apparata s uchetom jelektromagnitnoj sovmestimosti*. Dis. kand. techn. nauk [Numerical algorithms, methods and recommendations for the designing of on-board electronics of the spacecraft based on electromagnetic compatibility. PhD of Engineer. sci. diss.]. Tomsk, 2016. 248 p.
8. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. *Proc. of X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines»*, Omsk, Russian Federation, 2016, pp. 151–154. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819093.
9. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Jeksperimental'noe podtverzhdenie vozmozhnosti zashhity radioelektronnoj apparatury ot sverhkorotkogo impul'sa za schet ego razlozhenija v S-sekcii s licevoj svjaz'ju [Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2016, no. 3, pp. 47–50.
10. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozzerov A.O., Gazizov T.R. Novye vozmozhnosti sistemy modelirovanija jelektromagnitnoj sovmestimosti TALGAT [New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2015, no. 2, pp. 45–50.
11. Proizvodstvo pechatnyh plat. Montazh pechatnyh plat. ООО «MAZhtrans» [PCB production. PCB Assembly. LLC «MAZhtrans»] Available at: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru>, (accessed 01.03.2017).

Received 10.03.2017

УДК 621.391.03

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ OFDM В СЕТЯХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ

Султанов А.Х., Меишков И.К., Меишкова А.Г., Иванов В.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ

E-mail: mik.ivan@bk.ru

Рассматривается способ обработки цифровой информации, позволяющий снизить уровень внеполосного излучения относительно отведенной спектральной маски частот, ширину спектральной плотности мощности группового сигнала в пределах маски и снизить уровень межсимвольных искажений за счет плавного перехода между защитным интервалом и полезной частью символа, выражающийся в искажении спектральных составляющих группового сигнала, вызванном переходным процессом. Показана эффективность предложенных методов и проведена оценка на основе предложенных критериев, сделаны выводы. Полученные результаты можно использовать в сетях цифрового телерадиовещания для повышения эффективности функционирования.