

УДК 621.391.825

Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга

Иванцов И. А.

Постановка задачи: мощные сверхширокополосные (СШП) импульсы наносекундного и суб-наносекундного диапазонов могут проникать в различные узлы, блоки и цепи радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Результатом такого воздействия может быть повреждение интегральных схем и выгорание компонентов, что приводит к частичному или полному отказу РЭА. Существуют решения для защиты при воздействии СШП помех, в числе которых фильтры. Ряд работ посвящен фильтрам СШП-помех на основе микрополосковых структур, к которым относятся и модальные фильтры (МФ). Недостатком МФ является необходимость трассировки или компоновки проводников в непосредственной близости друг к другу, что повышает вероятность их одновременного механического или теплового повреждения. Однако при удалении проводников друг от друга пропадает помехозащитность, обусловленная модальными искажениями. Таким образом, важно выявить пути предотвращения одновременного повреждения обоих сигнальных проводников, при сохранении помехозащитности, обеспечиваемой модальной фильтрацией. **Цель работы** – сохранение эффекта модальной фильтрации помехи при удалении сигнальных проводников друг от друга. **Используемые методы:** выполняется квазистатическое моделирование временного отклика в частотной области, с использованием метода моментов для вычисления матриц погонных параметров. Предлагается добавление дополнительного, связывающего проводника над сигнальными, покрывающего их по всей ширине, что позволит поддерживать электромагнитную связь между сигнальными проводниками, в том числе при удалении их друг от друга. **Новизна:** представлены новые способы реализации цепей с модальным резервированием (МР), для повышения электромагнитной связи между проводниками линии передачи, из двух заявок на изобретение. **Результат:** использование представленного решения позволяет повысить надежность при сохранении помехоподавляющих свойств, обеспечиваемых модальным разложением помехового сигнала. **Практическая значимость:** представленный способ открывает новые возможности применения МФ в разработке печатных плат с МР, а именно, позволяет удалить друг от друга резервируемые проводники в критичных системах, например, беспилотных летательных аппаратах.

Ключевые слова: модальное резервирование, электромагнитная совместимость, сверхширокополосные помехи, функциональная безопасность, зеркально-симметричная структура, межсоединения, линия передачи.

Введение

Современный уровень развития радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ее повсеместное использование ставят на повестку дня вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС). Разработчики повышают тактовые частоты и снижают рабочие напряжения РЭА, что приводит к повышению восприимчивости к слу-

Библиографическая ссылка на статью:

Иванцов И. А. Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 124-133. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-124-133

Reference for citation:

Ivantsov I. A. Modal decomposition of interference in a coupled microstrip line when the signal conductors are distant from each other. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 124-133 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-124-133

чайным или преднамеренным электромагнитным воздействиям [1, 2]. Из последних серьезную опасность представляют мощные сверхширокополосные (СШП) генераторы помех, которые способны выводить из строя современную РЭА [3, 4]. Поэтому разработчики должны учитывать требования ЭМС еще на ранних стадиях проектирования [5]. Известно, что СШП-помехи относятся к опасным [6]. Значительная часть мощности СШП-помех находится в области высоких частот, что позволяет им беспрепятственно проникать во многие цепи и узлы РЭА и выводить из строя наиболее уязвимые.

Много работ посвящено устройствам защиты от СШП-помех на основе микрополосковых структур. Среди описанных устройств: планарные фильтры, фильтры на основе резонаторов и цепей с распределенными параметрами различной конфигурации. К основным их достоинствам можно отнести высокую долговечность в виду отсутствия активных и даже пассивных радиокомпонентов, широкую полосу заграждения, в виду малого влияния паразитных параметров. Кроме того, существует класс защитных устройств на основе полосковых структур, принцип работы которых основан на модальных искажениях [7-9], обеспечивающих разложение сигнала на моды, из-за различной фазовой скорости их распространения. Использование модальных искажений для снижения восприимчивости к сверхширокополосным кондуктивным эмиссиям называется модальной фильтрацией, а защитные устройства, построенные на данном принципе – модальными фильтрами (МФ). В данной работе рассматриваются способы, которые объединяют в себе классическое холодное резервирование и МФ и называются модальным резервированием (МР). Кратность МР определяется количеством резервных проводников.

Одним из недостатков МФ является низкая надежность из-за близкого расположения сигнальных проводников друг к другу, при котором опасное механическое воздействие (особенно, если вероятности его и других отказов сопоставимы) может повредить одновременно не только резервируемый, но и резервные проводники. При этом, если удалять проводники друг от друга, то эффект фильтрации, вызываемый модальными искажениями, пропадает. Таким образом, цель работы – сохранение эффекта модальной фильтрации помехи при удалении сигнальных проводников друг от друга.

Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием

На рис. 1 приведены принципиальная схема и поперечное сечение структуры с однократным МР [10], которая выбрана как прототип для заявки [11]. Структура (рис. 1а) состоит из трех проводников. Первый проводник – активный, резервируемый, на одном конце соединен с источником, который представлен на схеме как идеальный источник э.д.с. E с внутренним сопротивлением $R1$, а на другом – с нагрузкой, представленной сопротивлением $R2$. Второй – пассивный, резервный, на ближнем конце подключен к схемной земле через резистор $R3$, а на дальнем – $R4$. Третий проводник – опорный, представляет собой общую схемную землю. Номиналы резисторов выбраны равными 50 Ом. Структура имеет

следующие параметры поперечного сечения (рис. 1б): $d=w=0,3$ мм, $s=0,1$ мм, $h=0,51$ мм, $t=0,065$ мм. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r=10$, длина $l=1$ м.

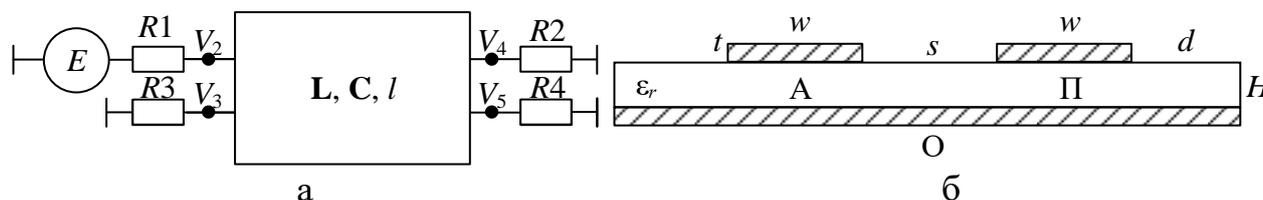


Рис. 1. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) для прототипа с однократным МР

Для получения временных откликов на воздействие СШП-импульса с длительностями нарастания, плоской вершины и спада по 100 пс, применяется квазистатическое моделирование в системе компьютерного моделирования электромагнитной совместимости TALGAT [12]. Результаты моделирования при воздействии на активный проводник приведены на рис. 2, где формы напряжений на входе активного проводника (U_{BX}) обозначены пунктиром, на выходе ($U_{ВЫХ}$) – сплошной линией, полужирными линиями – при $s=0,1$ мм, а тонкими – при $s=10$ мм.

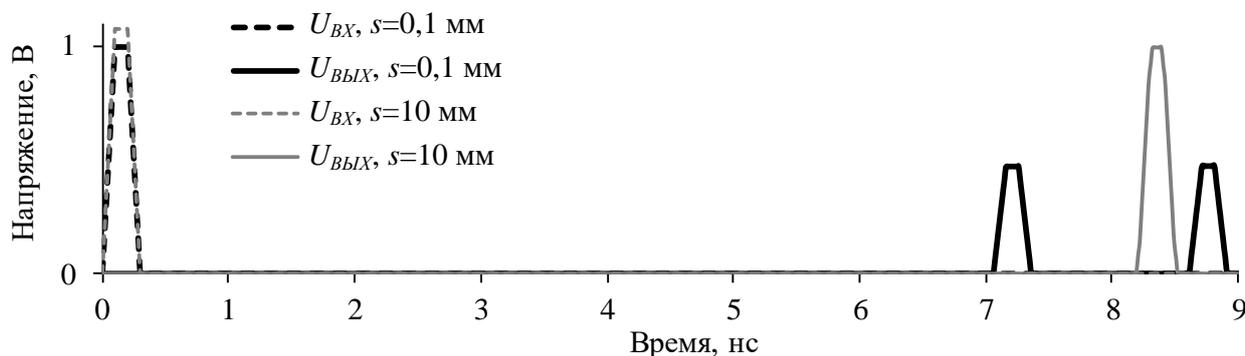


Рис. 2. Формы напряжения на входе и выходе для прототипа с однократным МР

Погонные задержки мод при $s=0,1$ мм составили 7,06 и 8,58 нс/м, а при $s=10$ мм – 8,18 и 8,20 нс/м, так что их разность уменьшилась с 1,52 до 0,02 нс/м. В первом случае на выходе наблюдаются два импульса разложения с разницей задержек около 1,5 нс и амплитудами 0,5 В, а во втором – только один импульс с амплитудой 1 В. Таким образом, при $s=10$ мм между резервируемым и резервным проводниками, модального разложения СШП-помехи нет.

На рис. 3 приведены принципиальная схема и поперечное сечение структуры для заявленного способа с однократным МР [11]. В отличие от прототипа, структура имеет дополнительный, связывающий проводник, который располагается над резервируемым и резервным и соединен с обоих концов со схемной землей. Геометрические параметры поперечного сечения: $w_2=10,6$ мм, $h_2=0,51$ мм

(остальные значения как у прототипа). На рис. 4 представлены результаты моделирования для заявленного способа при $s=0,1$ и 10 мм.

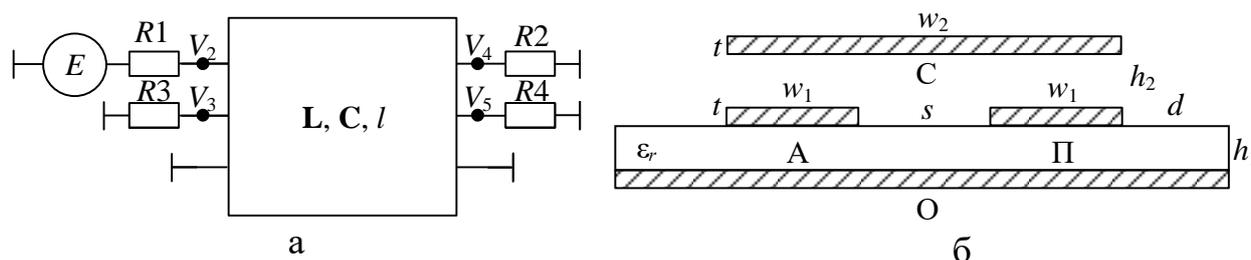


Рис. 3. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) для заявленного способа с однократным МР

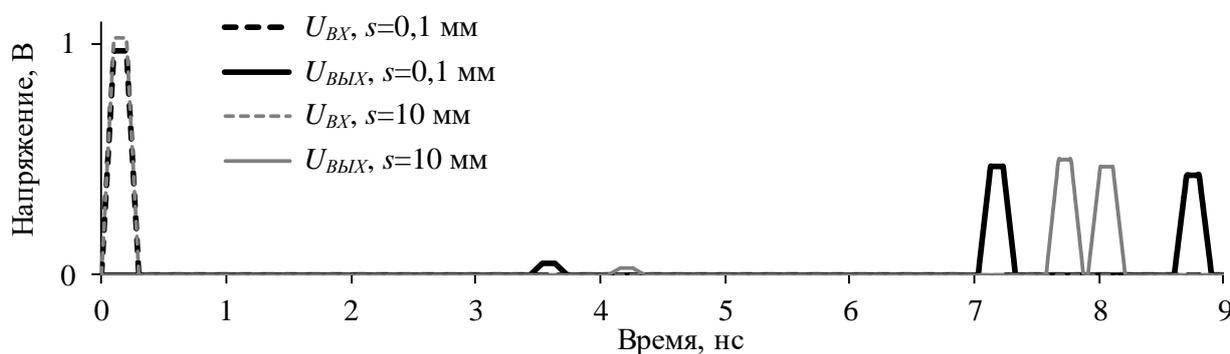


Рис. 4. Формы напряжения на входе и выходе для заявленного способа с однократным МР

При $s=0,1$ мм на выходе наблюдаются 3 импульса разложения с задержками 3,42, 7,03, 8,57 нс/м и амплитудами 50, 470, 435 мВ, а при $s=10$ мм – 4,04, 7,57, 7,89 нс/м и 31, 500, 465 мВ. Как видно, модальное разложение помехового импульса, с уменьшением амплитуды примерно в 2 раза, для заявленного способа выполняется. Следовательно, уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям сохраняется даже при удалении сигнальных проводников друг от друга, в результате чего исключается опасность одновременного механического или теплового повреждения обоих проводников. Кроме того, дополнительный проводник может физически защищать сигнальные проводники от опасности механического повреждения. Таким образом, повышается надежность при сохранении помехозащищенности, обеспечиваемой модальным разложением. Примечательно появление импульса с минимальной задержкой и амплитудой. Стоит отметить, что существует исследование [13], в котором опубликовано похожее решение. Но в нем дополнительный проводник со свободным потенциалом использован для выравнивания фазовых скоростей в структуре направленного ответвителя.

Способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным модальным резервированием

Структура (рис. 5) [14] состоит из 6 проводников. Первый проводник – активный (А), резервируемый, на одном конце соединен с источником, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E и внутренним сопротивлением $R1$, а на другом – с нагрузкой, представленной сопротивлением $R2$. Второй, третий и четвертый проводники – пассивные (П), резервные, подключены к схемной земле на ближних концах через резисторы $R3, R5, R7$, а на дальних – $R4, R6$ и $R8$. Пятый и шестой проводники – опорные (О), представляют собой общую схемную землю. Номиналы резисторов выбраны равными 50 Ом. Геометрические параметры для прототипа с трехкратным МР: $w=w_1=1$ мм, $s=0,7$ мм, $H=0,922$ мм, $h=0,51$ мм, $t=0,035$ мм, $d=5$ мм, $\epsilon_r=4,5$, $l=1$ м. На рис. 6 представлены результаты квазистатического моделирования для прототипа при $s=0,1$ и 10 мм.

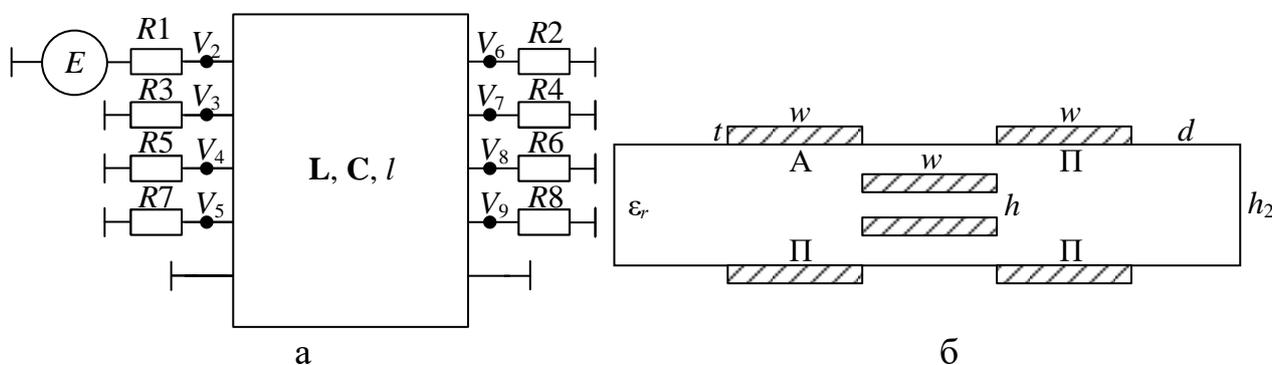


Рис. 5. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) для прототипа с трехкратным МР

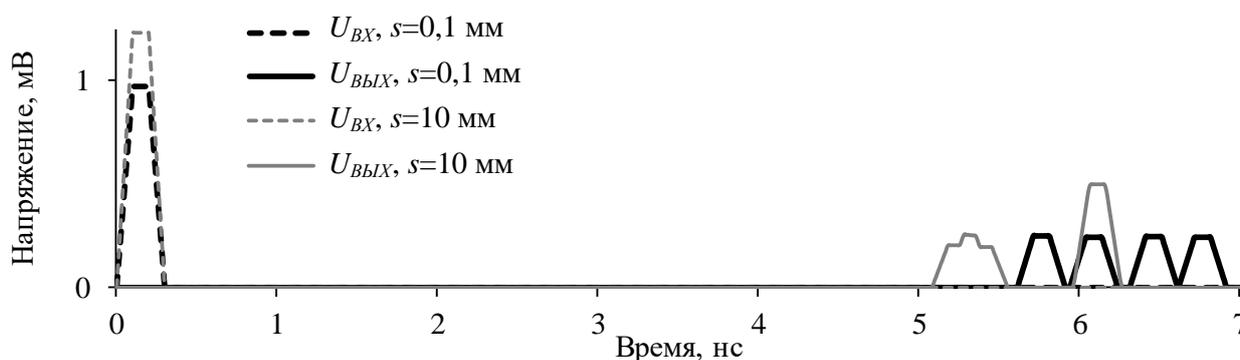


Рис. 6. Формы напряжения на входе и выходе для прототипа с трехкратным МР

При $s=0,7$ мм на выходе наблюдаются 4 импульса разложения с задержками около 5,3, 6, 6,3, 6,6 нс и амплитудами по 250 мВ, в то время как при $s=10$ мм – только 2 импульса с амплитудами около 300 и 500 мВ. Таким образом, при $s=10$ мм модальное разложение СШП-помехи выполняется неполностью.

На рис. 7 приведены принципиальная схема и поперечное сечение структуры для заявленного способа с трехкратным МР [15]. В отличие от прототипа,

структура имеет два дополнительных, связывающих (С) проводника, которые соединены с обоих концов со схемной землей. Геометрические параметры: $w_2=9$ мм, $w_3=12$ мм, $h_1=0,51$ мм, $h_2=1,24$ мм, $h_3=0,75$ мм (значения параметров, совпадающих с прототипом, такие же). На рис. 8 представлены результаты квазистатического моделирования для прототипа, при $s=0,1$ и 10 мм.

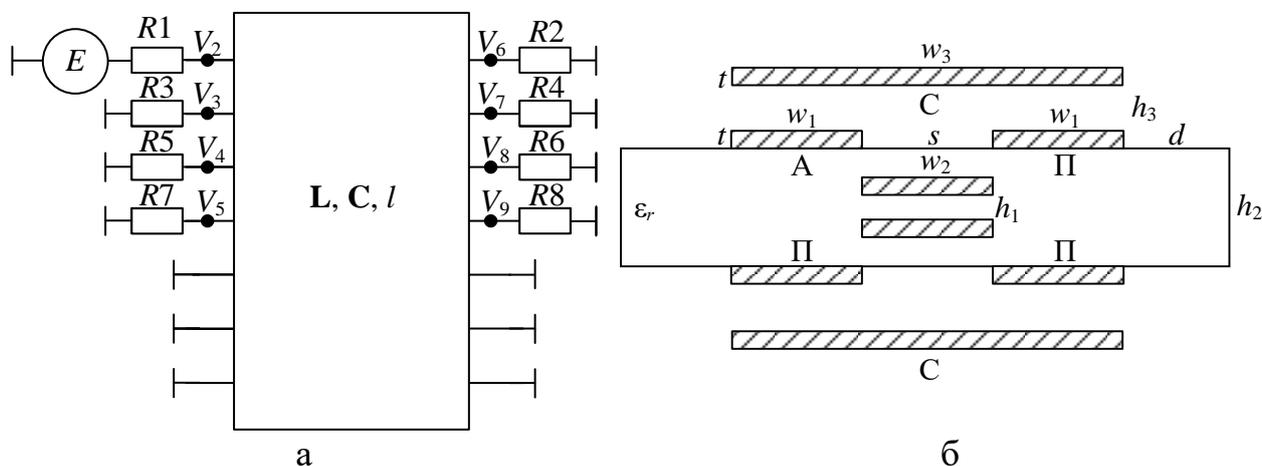


Рис. 7. Эквивалентная схема включения (а) и поперечное сечение (б) для заявленного способа с трехкратным МР

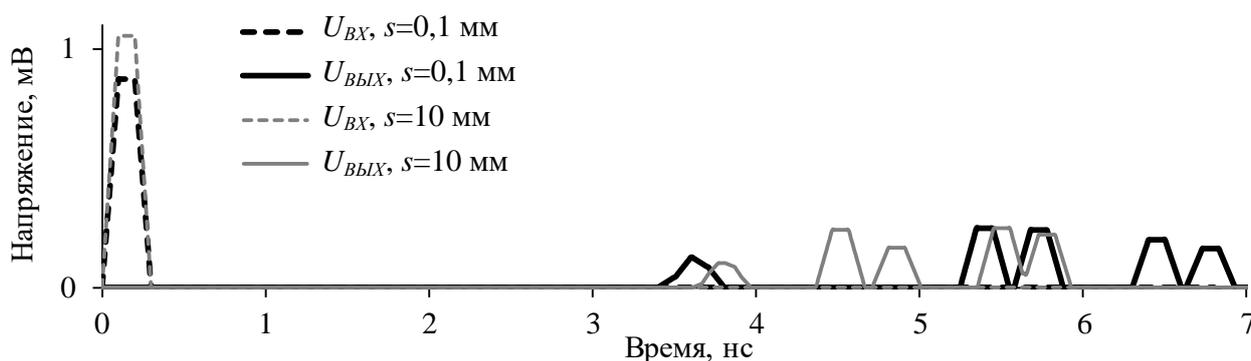


Рис. 8. Формы напряжения на входе и выходе для заявленного способа с трехкратным МР

При $s=0,7$ мм на выходе наблюдаются 5 импульсов разложения с амплитудами около 125, 250, 249, 200 и 160 мВ, а при $s=10$ мм – 100, 250, 160, 250 и 210 мВ. Как видно, сохраняется модальное разложение с уменьшением амплитуды примерно в 4 раза. Следовательно, уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям сохраняется даже при удалении проводников друг от друга, в результате чего исключается опасность одновременного механического или теплового повреждения обоих проводников. Кроме того, дополнительный проводник может физически защищать сигнальные проводники от опасности механического повреждения. Таким образом, повышается надежность при сохранении помехозащищенности, обеспечиваемой модальным разложением. Стоит отметить, что в данной структуре также наблюдается дополнительный импульс с минимальной задержкой, но его амплитуда сопоставима с другими.

Заключение

Представлен технический результат, который заключается в повышении надежности, при сохранении помехозащищенности за счет модального разложения. Для структуры с однократным МР, он достигается за счет введения, над резервным и резервируемым проводниками одноименных цепей, связывающего их проводника так, что он имеет обеспечивающую модальное разложение электромагнитную связь с этими проводниками и соединяется на концах с опорным. Для структуры с трехкратным МР, технический результат достигается за счет введения двух связывающих проводников. Один проводник располагается над резервируемым и резервными проводниками одноименных цепей, а второй – зеркально-симметрично первому, связывая два оставшихся резервных проводника. Связывающие проводники обеспечивают физическую защиту резервируемого и резервных проводников одноименных цепей от опасности механического повреждения, а удаление резервного и резервируемых проводников друг от друга уменьшает угрозу одновременного механического или теплового повреждения всех проводников. Выявлено появление импульсов с минимальной задержкой, которое обусловлено дополнительной модой, распространяющейся преимущественно в воздухе.

В рамках дальнейших исследований планируются более детальное исследование новых структур с удаленной трассировкой и компоновкой проводников, их параметрическая оптимизация и разработка макетов для проведения измерений. В поперечном сечении новых структур планируется использовать материалы с другими диэлектрическими параметрами, для усиления модальных искажений. Также планируется оценить снижение излучаемых эмиссий и восприимчивость к эмиссиям структур с МР при добавлении связывающего проводника.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00446, <https://rscf.ru/project/20-19-00446/> в ТУСУРе

Литература

1. Patel M. R. *Spacecraft power systems*. – Boca Raton, CRC Press, 2005. – 691 p.
2. Meany T. Functional safety and Industrie 4.0 // 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). 2017. P. 1-7.
3. Huang T., Fu S., Li J., Chen L. R., Tang M., Shum P., Liu D. Reconfigurable UWB pulse generator based on pulse shaping in a nonlinear optical loop mirror and differential detection // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. № 5. P. 6401-6408.
4. Moreno V., Rius M., Mora J., Muriel M. A., Capmany J. UWB Monocycle Generator Based on the Non-Linear Effects of an SOA-Integrated Structure // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. Vol. 26. № 7. P. 690-693.
5. Rodrigues E., Godina R., Pouresmaeil E. Industrial applications of power electronics // *Electronics*. 2020. № 9. P. 1-5.
6. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources // *System Design and Assessment Notes*. 2014. P. 1-43.

7. Жечев Е. С., Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162-179.

8. Самойличенко М. А., Газизов Т. Р. Модифицированная микрополосковая линия, защищающая от сверхкороткого импульса // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 203-214.

9. Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 130-141.

10. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Патент на изобретение RU 2603850 С1, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.

11. Газизов Т. Р., Иванцов И. А. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием // Заявка № 2022131709. Приоритет изобретения 06.12.2022.

12. Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.

13. Веселов Г. И., Егоров Е. Н., Алехин Ю. Н., Воронина Г. Г., Романюк В. А., Разевиг В. Д., Чаплин А. Ф., Шеремет М. В. Микроэлектронные устройства СВЧ: Учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 250 с.

14. Жечев Е. С., Белоусов А. О., Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Черникова Е. Б. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием // Патент на изобретение RU 2751672 С1, опубл. 15.07.2021, бюл. № 20.

15. Газизов Т. Р., Иванцов И. А. Способ удаленной компоновки печатных проводников цепей с трехкратным модальным резервированием // Заявка № 2022132011. Приоритет изобретения 08.12.2022.

References

1. Patel M. R. *Spacecraft power systems*. Boca Raton, CRC Press, 2005. 691 p.
2. Meany T. *Functional safety and Industrie 4.0 28th Irish Signals and Systems Conference*, Killarney, Ireland, 2017, pp. 1-7.
3. Huang T., Fu S., Li J., Chen L. R., Tang M., Shum P., Liu D. Reconfigurable UWB pulse generator based on pulse shaping in a nonlinear optical loop mirror and differential detection. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 5, pp. 6401-6408.
4. Moreno V., Rius M., Mora J., Muriel M. A., Capmany J. UWB Monocycle Generator Based on the Non-Linear Effects of an SOA-Integrated Structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 7, pp. 690-693.
5. Rodrigues E., Godina R., Pouresmaeil E. Industrial applications of power electronics. *Electronics*, 2020, no. 9, pp. 1-5.

6. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. *System Design and Assessment Notes*, 2014, pp. 1-43.

7. Zhechev E. S., Chernilova E. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162-179 (in Russian).

8. Samoilenko M. A., Gazizov T. R. Modified microstrip line protecting against ultra-short pulse. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 203-214 (in Russian).

9. Kosteletsky V. P., Zabolotsky A. M. Stripe structure that protects against ultrashort pulses in differential and common mode. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 130-141 (in Russian).

10. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharavytdinov V. R., Kuznetsova-Tadjibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob trassirovki pechatnykh provodnikov tsepey s rezervirovaniyem* [Method for tracing printed circuit conductors with redundancy]. Invention Patent, RU 2603850 C1, 10.12.2016, no. 34.

11. Gazizov T. R., Ivantsov I. A. *Sposob udalenoй trassirovki pechatnykh provodnikov tsepey s odnokratnym modal'nyy rezervirovaniyem* [Method for remote tracing of printed circuit conductors with single modal redundancy]. Application, no. 2022131709, invention priority 06.12.2022.

12. Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. *Vremennoy otklik mnogoprovodnykh liniy peredachi* [Time response of multiconductor transmission lines]. Tomsk, Tomsk State University, 2007, 152 p.

13. Veselov G. I., Egorov E. N., Alekhin Yu. N., Voronina G. G., Romanyuk V. A., Razevig V. D., Chaplin A. F., Sheremet M. V. *Mikroelektronnyye ustroystva SVCH: Uchebnoye posobiye dlya radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov* [Microwave microelectronic devices: Textbook for radio engineering specialties of universities]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988. 250 p.

14. Zhechev E. S., Belousov A. O., Gazizov T. R., Zabolotsky A. M., Chernikova E. B. *Sposob komponovki pechatnykh provodnikov dlya tsepey s modal'nyy rezervirovaniyem* [Method of arrangement of printed conductors for circuits with modal redundancy]. Invention Patent, RU 2751672 C1, 15.07.2021, no. 20.

15. Gazizov T. R., Ivantsov I. A. *Sposob udalenoй komponovki pechatnykh provodnikov tsepey s trekhkratnym modal'nyy rezervirovaniyem* [Method of remote arrangement of printed conductors of circuits with threefold modal redundancy]. Application, no. 2022131709, invention priority 06.12.2022.

Статья поступила 21 марта 2023 г.

Информация об авторе

Иванцов Илья Александрович – аспирант кафедры телевидения и управления, инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость. E-mail: wertygo123@outlook.com

Адрес: 634000, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Modal decomposition of interference in a coupled microstrip line when the signal conductors are distant from each other

I. A. Ivantsov

The problem: Powerful ultra-wideband (UWB) pulses of nanosecond and subnanosecond range can penetrate into various nodes, blocks and circuits of radioelectronic equipment (REA). This can result in damage to integrated circuits and burnout of components, resulting in partial or complete failure of the equipment. There are solutions for protection under the impact of UWB interference, including filters. A number of works are devoted to UWB interference filters on the basis of microstrip structures, which include modal filters (MF). A disadvantage of MFs is the need to trace or arrange conductors in proximity to each other, which increases the likelihood of simultaneous mechanical or thermal damage. However, when conductors are separated from each other, the interference immunity due to modal distortions disappears. Thus, it is important to identify ways to prevent simultaneous damage to both signal conductors, while preserving the noise immunity provided by modal filtering. **The aim** of the work is to preserve the effect of modal filtering of interference when the signal conductors are removed from each other. **The methods:** Quasi-static simulation of the time response in the frequency domain is performed, using the method of moments to calculate the matrices of the running parameters. It is proposed to add another bonding conductor over the signal conductors, covering their full width, which will allow maintaining electromagnetic connection between signal conductors, including at their distance from each other. **The novelty:** There are presented new ways of realization of chains with modal redundancy (MR), to increase electromagnetic coupling between transmission line conductors, from two applications for the invention. **The result:** The use of the presented solution allows increasing reliability while preserving the interference-suppressing properties provided by the modal decomposition of the interfering signal. **Practical significance:** The presented method opens up new opportunities for application of MF in development of printed circuit boards with MR, namely, it allows removing the redundant conductors from each other in critical systems, such as unmanned aerial vehicles.

Key words: modal redundancy, electromagnetic compatibility, ultra-wideband interference, functional safety, mirror-symmetric structure, interconnections, transmission line.

Information about Author

Ilya Alexandrovich Ivantsov – graduate student at the Department of Television and Control, engineer of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities». Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility. E-mail: wertygo123@outlook.com

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.