

УДК 621.37

В.А. Сирица, Р.С. Суровцев, А.В. Носов

Разложение сверхкороткого импульса в каскадно соединенных 5-проводном микрополосковом модальном фильтре и витке меандровой микрополосковой линии

Продемонстрирована возможность разложения сверхкороткого импульса (СКИ) в каскадно соединенных 5-проводном модальном фильтре и меандровой микрополосковой линии. Для этого сформулированы условия полного разложения СКИ и выполнена оптимизация геометрических параметров устройства по критериям выполнения каждого из условий. В результате ослабление СКИ на выходе устройства составило 26,6 раза.

Ключевые слова: меандровая линия, модальный фильтр, сверхкороткий импульс, защита.

Неуклонный рост и развитие радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ее внедрение практически во все сферы жизнедеятельности человека заставляют разработчиков уделять особое внимание обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Так, наблюдается уменьшение рабочих напряжений РЭА, увеличение ее рабочих частот и плотности монтажа печатных плат (ПП) в составе РЭА, что приводит к повышению восприимчивости РЭА к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ). К тому же ежегодный рост количества РЭА и степени ее интеграции увеличивает риск ее повреждения от импульсного [1] и непрерывного [2] воздействий, даже с малой амплитудой напряженности поля. Одной из задач ЭМС является защита от кондуктивных воздействий, которые представляют собой ЭМВ, проникающие в аппаратуру непосредственно по проводникам [3]. Опасным ЭМВ является мощный сверхкороткий импульс (СКИ), способный проникать внутрь РЭА и выводить ее из строя за счет широкого спектра и высокой мощности [4, 5]. Для защиты РЭА от ЭМВ используются различные схемотехнические и конструктивные решения, например: ограничители напряжения, варисторы, пассивные RC- и LC-фильтры, имеющие ряд недостатков, основными из которых являются малые мощность и быстродействие, а также низкая радиационная стойкость и как следствие малый срок службы [3]. В этой связи традиционные средства защиты зачастую не могут обеспечить должной защиты РЭА от СКИ [6], поэтому необходимы поиск и исследование новых путей эффективной защиты.

Исследованы различные устройства на основе полосковых линий для защиты от СКИ и фильтрации сигналов в частотной области [7–12]. Для защиты от СКИ предложены модальные фильтры (МФ), основанные на технологии модального разложения [13], которые лишены указанных недостатков, а также имеют ряд преимуществ (отсутствие полупроводниковых компонентов, большой срок службы, работа при высоких напряжениях и малая стоимость). Выполнен ряд исследований по использованию многопроводных МФ. Так, представлено системное исследование многопроводных МФ [14], в котором выполнен их анализ и рассмотрена возмож-

ность оптимизации по разным критериям, а также сформирована гибридная модель оптимизации, включающая эвристический поиск и генетический алгоритм. В дополнение выполнено экспериментальное подтверждение модальной фильтрации на основе многопроводных микрополосковых линий (МПЛ). Так, для двух- и трехпроводной МПЛ получено ослабление 11,5 и 13,7 раза. Другим подходом на основе разложения сигнала на моды является подход к защите от СКИ, основанный на его разложении в витке меандровой МПЛ на последовательность импульсов меньшей амплитуды [15]. Выбором параметров линии обеспечиваются несколько простых условий, за счет чего осуществляется разложение СКИ на три основных импульса с меньшей амплитудой относительно исходной. Первый импульс является перекрестной наводкой на ближнем конце линии, которая приходит к концу витка в момент появления в линии основного сигнала. Второй и третий импульсы (для простоты изложения будем называть их импульсами четной и нечетной мод) являются результатом различия погонных задержек этих мод. Есть исследование разложения СКИ на последовательность из девяти основных импульсов в меандровой МПЛ, состоящей из двух витков, соединенных каскадно [16], в котором получены новые условия, позволяющие получить такое разложение и увеличенное ослабление СКИ.

Примечательно исследование совместного применения 3-проводного МФ и меандровой МПЛ для ослабления СКИ [17]. Так, за счет их каскадного соединения и выполнения сформулированных условий разложения СКИ сначала в МФ, а затем в меандровой МПЛ получено ослабление 9,8 раза. Таким образом, каскадное соединение МФ и меандровой МПЛ позволяет увеличить ослабление СКИ при сравнительно небольшом увеличении массогабаритных показателей конечного устройства. Тогда при увеличении количества проводников в МФ возможно увеличить ослабление СКИ. Поэтому цель данной работы – исследовать возможность разложения СКИ в гибридном устройстве защиты на основе каскадного соединения 5-проводного микрополоскового модального фильтра (далее – МФ) и витка меандровой МПЛ. Для ее достижения необходимо: вы-

полнить предварительный анализ разложения СКИ и определить количество основных импульсов разложения в конце устройства; сформулировать условия, позволяющие разложить СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды; выполнить оптимизацию параметров поперечных сечений 5-проводного МФ и меандровой МПЛ эвристическим поиском по критериям выполнения сформулированных условий; выполнить анализ полученных результатов.

Исходные данные

Поперечные сечения 5-проводного МФ и меандровой МПЛ представлены на рис. 1, 2 соответственно, где $w_{мф}$ и $w_{мл}$ – ширина проводников МФ и меандровой МПЛ соответственно, $t_{мф}$ и $t_{мл}$ – толщина проводников МФ и меандровой МПЛ соответственно, $s_{1мф}–s_{4мф}$ и $s_{мл}$ – расстояния между проводниками МФ и меандровой МПЛ соответственно, $h_{мф}$ и $h_{мл}$ – толщины основы печатной платы МФ и меандровой МПЛ соответственно, а $\epsilon_{мф}$ и $\epsilon_{мл}$ – диэлектрические проницаемости подложки МФ и меандровой МПЛ соответственно.

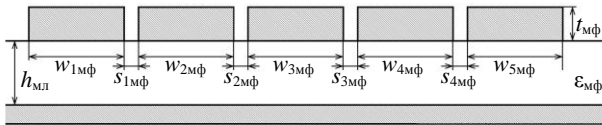


Рис. 1. Поперечное сечение 5-проводного МФ

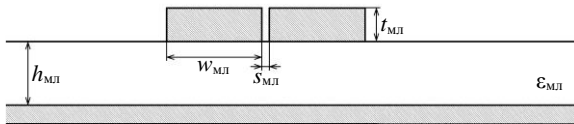


Рис. 2. Поперечное сечение меандровой МПЛ

На рис. 3 приведена схема соединений исследуемого устройства. Она представляет собой 5-проводный МФ, соединенный каскадно с меандровой МПЛ. МФ состоит из пяти параллельных проводников длиной $l_{мф}$, один из которых соединен на одном конце с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС E и внутренним сопротивлением $R1$, а на другом конце – с началом витка меандровой МПЛ. Четыре других проводника соединены на концах с резисторами ($R2–R9$) на землю. Меандровая МПЛ состоит из двух параллельных проводников длиной $l_{мл}$, соединенных между собой на одном конце. Выход линии соединен с приёмным устройством, которое представлено на схеме сопротивлением $R6$. Все сопротивления $R1–R10$ равны 50 Ом.

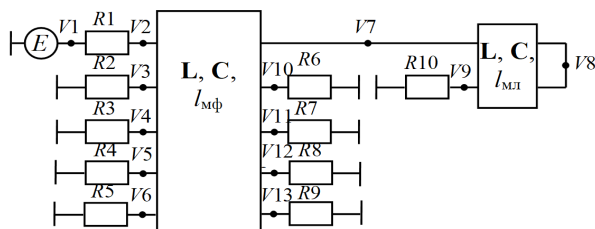


Рис. 3. Схема соединений 5-проводного МФ и меандровой МПЛ

В качестве тестового воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс аналогично работе [17].

Предварительный анализ

Известно [14], что при определенных параметрах поперечного сечения МФ количество импульсов разложения на выходе равно количеству проводников МФ, а при их увеличении уменьшается амплитуда этих импульсов. При оптимальных параметрах поперечных сечений 5-проводного МФ и меандровой МПЛ в составе одного устройства (при их совместном использовании) на выходе можно наблюдать 15 основных импульсов разложения ($I1–I15$), поскольку каждый из 5 импульсов с выхода 5-проводного МФ будет раскладываться еще на три импульса в меандровой МПЛ. Однако для обеспечения такого разложения необходимо сформулировать соответствующие условия.

Количество мод, распространяющихся в многопроводной линии передачи, равно количеству ее проводников (не считая опорного), при этом каждая мода имеет определенную погонную задержку [14]. Так, в 5-проводном МФ распространяются 5 мод, каждая со своей погонной задержкой ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$), а в витке меандровой МПЛ – только нечетная (τ_o) и четная (τ_e) моды. Важно отметить, что в меандровой МПЛ также имеется перекрестная наводка на ближнем конце, которая приходит без задержки. Тогда, зная погонные задержки каждой из мод и длины $l_{мф}$ и $l_{мл}$, можно определить задержки каждого из основных импульсов разложения ($t_{I1}–t_{I15}$) на выходе исследуемого устройства аналогично [17]:

$$t_{I1} = \tau_1 l_{мф}, t_{I2} = \tau_1 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл}, t_{I3} = \tau_1 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл},$$

$$t_{I4} = \tau_2 l_{мф}, t_{I5} = \tau_2 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл}, t_{I6} = \tau_2 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл},$$

$$t_{I7} = \tau_3 l_{мф}, t_{I8} = \tau_3 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл}, t_{I9} = \tau_3 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл},$$

$$t_{I10} = \tau_4 l_{мф}, t_{I11} = \tau_4 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл}, t_{I12} = \tau_4 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл},$$

$$t_{I13} = \tau_5 l_{мф}, t_{I14} = \tau_5 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл}, t_{I15} = \tau_5 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл}.$$

Для полного разложения СКИ на выходе устройства необходимо, чтобы задержка каждого последующего импульса была не меньше задержки предыдущего, просуммированной с общей длительностью СКИ, иначе импульсы будут накладываться друг на друга. Зная выражения, определяющие задержки импульсов ($I1–I15$), это может быть обеспечено следующим рядом условий:

$$\tau_1 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} \geq \tau_1 l_{мф} + t_{\Sigma}, \quad (1)$$

$$\tau_1 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} \geq \tau_1 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (2)$$

$$\tau_2 l_{мф} \geq \tau_1 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (3)$$

$$\tau_2 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} \geq \tau_2 l_{мф} + t_{\Sigma}, \quad (4)$$

$$\tau_2 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} \geq \tau_2 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (5)$$

$$\tau_3 l_{мф} \geq \tau_2 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (6)$$

$$\tau_3 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} \geq \tau_3 l_{мф} + t_{\Sigma}, \quad (7)$$

$$\tau_3 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} \geq \tau_3 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (8)$$

$$\tau_4 l_{мф} \geq \tau_3 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (9)$$

$$\tau_4 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} \geq \tau_4 l_{мф} + t_{\Sigma}, \quad (10)$$

$$\tau_4 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} \geq \tau_4 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (11)$$

$$\tau_5 l_{мф} \geq \tau_4 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (12)$$

$$\tau_5 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} \geq \tau_5 l_{мф} + t_{\Sigma}, \quad (13)$$

$$\tau_5 l_{мф} + \tau_e 2l_{мл} \geq \tau_5 l_{мф} + \tau_o 2l_{мл} + t_{\Sigma}, \quad (14)$$

где t_{Σ} – сумма длительностей фронта, спада и плоской вершины СКИ.

После простых алгебраических преобразований выражения (1), (4), (7), (10) и (13) примут одинаковый вид

$$\tau_0 2l_{\text{мл}} \geq t_{\Sigma}, \quad (15)$$

а (2), (5), (8), (11) и (14) –

$$\tau_e 2l_{\text{мл}} \geq \tau_0 2l_{\text{мл}} + t_{\Sigma}. \quad (16)$$

Таким образом, для разложения СКИ на последовательность из 15 импульсов в каскадно-соединенных 5-проводном МФ и меандровой МПЛ необходимо выполнить условия (3), (6), (9), (12), (15) и (16).

Результаты моделирования

Моделирование выполнено в системе TALGAT без учета потерь в проводниках и диэлектрике [18]. С учетом условий (3), (6), (9), (12), (15) и (16) выполнен эвристический поиск оптимальных параметров поперечных сечений МФ и меандровой МПЛ. Получены следующие параметры поперечного сечения МФ: $w_{1\text{мф}}=2000$ мкм, $w_{2\text{мф}}=w_{3\text{мф}}=w_{4\text{мф}}=1500$ мкм, $w_{5\text{мф}}=2000$ мкм, $t_{\text{мф}}=200$ мкм, $h_{\text{мф}}=200$ мкм, $s_{1\text{мф}}=s_{2\text{мф}}=10$ мкм, $s_{3\text{мф}}=20$ мкм, $s_{4\text{мф}}=30$ мкм и $\epsilon_{\text{рмф}}=50$. Оптимальные параметры поперечного сечения меандровой МПЛ: $w_{\text{мл}}=500$ мкм, $t_{\text{мл}}=300$ мкм, $h_{\text{мл}}=500$ мкм, $s_{\text{мл}}=32$ мкм и $\epsilon_{\text{мл}}=80$.

Вычисленные в системе TALGAT погонные задержки МФ: $\tau_1=8,05$ нс/м, $\tau_2=10,2$ нс/м, $\tau_3=12,47$ нс/м, $\tau_4=17,4$ нс/м, $\tau_5=22,7$ нс/м, а меандровой МПЛ – $\tau_0=11,1$ нс/м, $\tau_e=22,5$ нс/м. С учетом условий (3), (6), (9) и (10) получены значения длин МФ и меандровой МПЛ: $l_{\text{мф}}=2000$ мм и $l_{\text{мл}}=25$ мм. При подстановке значений вычисленных погонных задержек в условия (3), (6), (9), (12), (15) и (16) они выполняются с запасом.

На рис. 4 представлена форма сигнала в диапазоне 15–55 нс (поскольку до 15 нс импульсов не наблюдается, а после 55 нс наблюдаются только импульсы меньшей амплитуды, вызванные отражениями) на выходе исследуемого устройства.

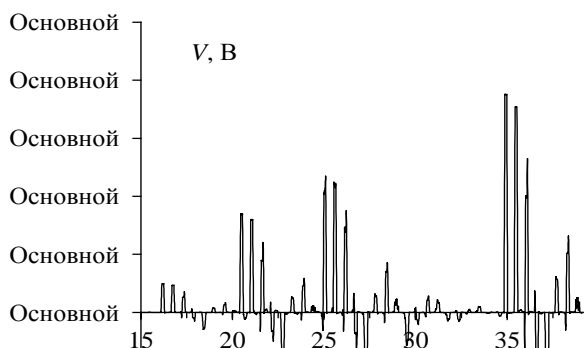


Рис. 4. Форма сигнала в конце устройства при выполнении условий (3), (6), (9), (12), (15) и (16)

Из рис. 4 видно, что СКИ в конце устройства представлено последовательностью множества импульсов, из которых 15 являются основными, а остальные – отражениями. Максимальная амплитуда СКИ на выходе устройства не превышает 19 мВ. Таким образом, ослабление СКИ (относительно $E/2$) составило 26,6 раза.

Заключение

Продемонстрирована возможность разложения СКИ в каскадно соединенных 5-проводном МФ и меандровой МПЛ. Для этого сформулированы условия полного разложения СКИ и выполнена оптимизация геометрических параметров устройства по критериям выполнения каждого из условий. В результате ослабление СКИ на выходе устройства составило 26,6 раза.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

Литература

1. Мещеряков С.А. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при воздействии мощного СВЧ-импульса. Структуры с барьером Шоттки // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 11. – С. 1–15.
2. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–38.
3. Gizatullin Z.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Vol. 61, № 5. – P. 546–550.
4. Mora N. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System Design and Assessment Notes. – 8 July 2014. – Note 41. – P. 1–48.
5. Gizatullin Z.M. Study of the electromagnetic compatibility of local area networks under the action of nanosecond electromagnetic disturbances / Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2014. – Vol. 59, № 5. – P. 424–426.
6. Response of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proc. 15th Int. Zürich Symp. EMC. – Schweiz, 2003. – P. 18–20.
7. Systematic description of the protection capability of protection elements / R. Krzikalla, J. Luiken, L. Haseborg, F. Sabath // 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Honolulu, 2007. – P. 1–5.
8. Krzikalla R. Interdigital microstrip filters as protection devices against ultrawideband pulses / R. Krzikalla, T. Weber, J.L. Haseborg // 2003 Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC (Istanbul). – P. 1313–1316.
9. Krzikalla R. HPEM protection on HF transmission lines / R. Krzikalla, T. Weber, J.L. Haseborg // 2005 Proc. of IEEE Int. Symp. on EMC (Chicago). – P. 977–81.
10. Weber T. Linear and nonlinear filters suppressing UWB pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J. Haseborg // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, № 3. – P. 423–430.
11. Cui Q. Investigation of waffle structure SCR for electro-static discharge (ESD) protection / Q. Cui, S. Dong, Y. Han // 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC). – Bangkok, 2012. – P. 1–4.
12. Hayashi H. ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance / H. Hayashi, T. Kuroda, K. Kato, K. Fukuda, S. Baba, Y. Fukuda // 2005 International Conference On Simulation of Semiconductor Processes and Devices. – Tokyo, 2005. – P. 99–102.
13. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Ga-

zizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.

14. Belousov A.O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov // Complexity. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–15.

15. Surovtsev R.S. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1864–1871.

16. Nosov A.V. Propagation of UWB pulse in two turns of meander microstrip line connected in cascade/ A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2019. – P. 0288–0292.

17. Nosov A.V. Simulating hybrid protection against ultrashort pulse based on its modal decomposition / A.V. Nosov, A.O. Belousov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1353, № 1. – P. 1–6.

18. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560, No. 1. – P. 1–6.

Сирица Вероника Андреевна

Инж.-иссл. научно-исследовательского
медико-биологического инженерного центра
высоких технологий
Уральского федерального университета
Тел.: +7-982-601-25-62
Эл. почта: veronikusik2695@mail.ru

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-858-16-12
Эл. почта: surovtssevr@gmail.com

Носов Александр Вячеславович

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-406-86-01
Эл. почта: alexns2094@gmail.com