

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель секции – Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ, д.т.н.;
зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, д.т.н.*

УДК 621.391.825

АНАЛИТИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ РАЗНОСТЕЙ ЗАДЕРЖЕК МОД ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

Е.Б. Черникова, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, chiernikova96@mail.ru*

Представлено аналитическое условие для выравнивания разностей задержек мод структур с зеркальной симметрией. Обеспечение данных условий позволяет усовершенствовать защиту от СКИ: предупредить наложение импульсов на выходе структур и как следствие, рост общей амплитуды импульсов разложения, а также максимизировать длительность СКИ, который будет разлагаться полностью.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, зеркальная симметрия.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) с каждым годом все более актуально. Это связано в первую очередь со значительным ростом числа различной РЭС и увеличивающейся сложностью ее реализации. Одной из важнейших задач ЭМС является повышение помехозащищенности при разработке таких систем [1]. Известно, что мощные электромагнитные импульсные помехи малой длительности, также называемые сверхкороткими импульсами (СКИ), способны нарушить функционирование РЭС или же вовсе вывести ее из строя [2]. Для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации, которая основана на модальном разложении помехового импульса на последовательность импульсов меньшей амплитуды [3].

Для совершенствования технологии модальной фильтрации предложен зеркально-симметричный МФ [4] (рис. 1). Предупреждение наложения импульсов разложения на выходе МФ, а также увели-

чение длительности входного воздействия в структурах с зеркальной симметрией возможно достичь с помощью выравнивания разностей погонных задержек мод ($\Delta\tau_i$). Между тем до сих пор не сформулировано аналитическое условие, позволяющее это выполнить. Цель работы – восполнить этот пробел.

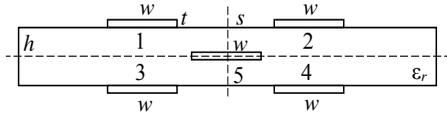


Рис. 1. Поперечное сечение зеркально-симметричного МФ

В работе [5] приведены аналитические выражения для расчета погонных задержек мод (τ_i) применительно к 4-проводной линии передачи, в которых используются элементы матрицы \mathbf{A} , являющейся произведением матриц коэффициентов электростатической (\mathbf{C}) и электромагнитной (\mathbf{L}) индукций. В [6] выявлено, что из-за симметрии исследуемой структуры относительно вертикальной и горизонтальной осей равны коэффициенты $A_{11} = A_{22} = A_{33} = A_{44}$, $A_{12} = A_{21} = A_{34} = A_{43}$, $A_{13} = A_{31} = A_{24} = A_{42}$ и $A_{14} = A_{41} = A_{23} = A_{32}$, что позволяет получить аналитические выражения в кратком виде для зеркально-симметричного МФ:

$$\tau_1 = \sqrt{(A_{11} - A_{14} - A_{12} + A_{13})}, \quad (1)$$

$$\tau_2 = \sqrt{(A_{11} + A_{14} - A_{12} - A_{13})}, \quad (2)$$

$$\tau_3 = \sqrt{(A_{11} - A_{14} + A_{12} - A_{13})}, \quad (3)$$

$$\tau_4 = \sqrt{(A_{11} + A_{14} + A_{12} + A_{13})}. \quad (4)$$

Условия равенства $\Delta\tau_i$ получены на основе вышеуказанных аналитических выражений. На выход 4-проводной структуры приходит 4 импульса мод, соответственно временных интервалов будет три. Тогда приравняв их, имеем:

$$\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau_3, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta\tau_1 = \Delta\tau_2, \\ \Delta\tau_2 = \Delta\tau_3, \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \tau_2 - \tau_1 = \tau_3 - \tau_2, \\ \tau_3 - \tau_2 = \tau_4 - \tau_3, \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \tau_4 - \tau_1 = 3(\tau_3 - \tau_2), \\ \tau_4 + \tau_1 = \tau_3 + \tau_2. \end{cases} \quad (6)$$

Используя метод умножения при решении систем уравнений [7], можно заменить первое уравнение произведением обоих уравнений системы, оставив второе уравнение без изменений

$$\begin{cases} \tau_4^2 - \tau_1^2 = 3(\tau_3^2 - \tau_2^2), \\ \tau_4 + \tau_1 = \tau_3 + \tau_2. \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\tau_4 + \tau_1 = \tau_3 + \tau_2. \quad (7.2)$$

Подставляем выражения из (1)–(4) в (7.1)

$$\begin{aligned} & \sqrt{(A_{11} + A_{14} + A_{12} + A_{13})^2} - \sqrt{(A_{11} - A_{14} - A_{12} + A_{13})^2} = \\ & = 3 \left(\sqrt{(A_{11} - A_{14} + A_{12} - A_{13})^2} - \sqrt{(A_{11} + A_{14} - A_{12} - A_{13})^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразований, в результате получим

$$A_{12} = 2A_{14}. \quad (9)$$

Далее преобразуем (7.2), возведя правую и левую части в квадрат:

$$(\tau_4 + \tau_1) = (\tau_3 + \tau_2) \rightarrow \tau_4^2 + 2\tau_4\tau_1 + \tau_1^2 = \tau_3^2 + 2\tau_3\tau_2 + \tau_2^2, \quad (10)$$

$$\frac{\tau_1^2 - \tau_2^2 - \tau_3^2 + \tau_4^2}{2} = \tau_3\tau_2 - \tau_4\tau_1. \quad (11)$$

Рассмотрим левую и правую части равенства (11) по отдельности, подставив в каждую выражения из (1)–(4) и после преобразования и обратной подстановки получившихся выражений в (11), получим

$$\sqrt{(A_{11} - A_{13})^2 - (A_{14} - A_{12})^2} - \sqrt{(A_{11} + A_{13})^2 - (A_{14} + A_{12})^2} = 2A_{13}. \quad (12)$$

В результате преобразований получим

$$2A_{11}A_{12}A_{13}A_{14} = A_{12}^2A_{13}^2 + A_{14}^2A_{12}^2 + A_{14}^2A_{13}^2. \quad (13)$$

В итоге система (7) примет вид

$$\begin{cases} A_{12} = 2A_{14}, & (14.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2A_{11}A_{12}A_{13}A_{14} = A_{12}^2A_{13}^2 + A_{14}^2A_{12}^2 + A_{14}^2A_{13}^2. & (14.2) \end{cases}$$

Решим систему (14), подставив (14.1) в (14.2). Получится квадратное уравнение, где A_{13} – неизвестное:

$$2A_{11}2A_{14}A_{13}A_{14} = 4A_{14}^2A_{13}^2 + A_{14}^22A_{14}^2 + A_{14}^2A_{13}^2, \quad (15)$$

$$5A_{13}^2 - 4A_{11}A_{13} + 4A_{14}^2 = 0. \quad (16)$$

Корни квадратного уравнения

$$A_{13_{1/2}} = \frac{A_{11} \pm \sqrt{A_{11}^2 - 5A_{14}^2}}{2,5}. \quad (17)$$

Таким образом, выражение (17) является условием выравнивания значений $\Delta\tau_i$ в структурах с зеркальной симметрией. Для проверки (17) возьмем ранее вычисленную матрицу \mathbf{A} для зеркально-симметричного МФ с оптимальными параметрами [6], которые позволили получить практически выравненные значения $\Delta\tau_i$.

Подставляем коэффициенты матрицы \mathbf{A} в (17)

$$A_{13_{1/2}} = \frac{38,979 \pm \sqrt{38,979^2 - 5 \cdot 3,05864^2}}{2,5} = 30,9412/0,24192.$$

Отбросим ненужный первый корень и сравним значение оставшегося с коэффициентом A_{13} из матрицы \mathbf{A} (0,26273). Отклонение между этими значениями равно 7,92%. Такой результат можно объяснить тем, что изначально взята матрица, в которой $\Delta\tau_i$ выравнены не идеально. Отклонения $\Delta\tau_1$ (0,489 нс/м) и $\Delta\tau_3$ (0,515 нс/м) относительно $\Delta\tau_2$ (0,494 нс/м) равны 5,04 и 4,077% соответственно.

Таким образом, получено аналитическое условие для зеркально-симметричного МФ, позволяющее выравнить значения $\Delta\tau_i$. Благодаря этому возможно предупредить наложение импульсов на выходе структур и как следствие рост общей амплитуды импульсов разложения, а также максимизировать длительность входного воздействия. Кроме того, условие можно использовать как целевую функцию при оптимизации структур, например, генетическими алгоритмами.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0041 Министерства науки и высшего образования России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radasky W.A., Bau C.E., Wik M.W. Introduction to the special issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) // Special issue of IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – Vol. 46, No. 3. – P. 314–321.
2. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – Note 41. – 8 July 2014.
3. 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. – P. 1136–1142.
4. Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // Symmetry. – 2019. – Vol. 11(7), No. 883. – P. 1–25.
5. You H., Soma M. Crosstalk analysis of high-speed interconnects and packages // IEEE Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference. – 1990. – P. 11.2.1–11.2.5.
6. Черникова Е.Б., Белоусов А.О. Аналитические выражения для вычисления погонных задержек мод зеркально-симметричного модального фильтра // Сб. избр. статей по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2018». г. Томск, 16–18 мая 2018. – С. 240–243.
7. Гусев В.А., Мордкович А.Г. Математика: справочные материалы. – М.: Просвещение, 1988. – 416 с.