

ВЛАГОЗАЩИЩЕННЫЙ МОДАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ ТРЕХПРОВОДНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Белоусов А. О.

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Современная радиоэлектронная аппаратура имеет широкие функциональные возможности, но также и повышенную восприимчивость к электромагнитным помехам [1]. Для защиты ее от сверхкоротких импульсов предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод [2]. Известен способ такой защиты, основанный на использовании модальных искажений сигнала в многопроводных модальных фильтрах (МФ) на основе микрополосковых линий [3].

Между тем осталась без внимания устойчивость МФ к внешним воздействиям. Таким образом, для повышения сопротивляемости данным воздействиям целесообразно выполнить моделирование МФ с покрывающим слоем.

Для исследования выбран многопроводный МФ, состоящий из трех проводников (рис 1). В результате его оптимизации эвристическим поиском по критерию минимизации максимальной амплитуды на выходе линии получены следующие значения параметров: ширина проводников $w = 500$ мкм, их толщина $t = 18$ мкм, толщина диэлектрика $h = 500$ мкм, а покрывающего слоя $h_0 = 10$ мкм, расстояния между проводниками линии $s_1 = 200$ и $s_2 = 640$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$, а покрывающего слоя $\epsilon_{r0} = 4$, длина линии $l = 60$ см, сопротивление $R = 50$ Ом.

Вычисление параметров МФ и определение форм сигнала выполнялось с помощью программного продукта TALGAT [4]. При этом допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяется Т-волна. Также учитывались потери в проводниках и диэлектриках. В качестве исходного импульса использовался оцифрованный сигнал осциллографа С9-11, измеренный на нагрузке 50 Ом, с амплитудой 0,657608 В. Длительность фронта составила 27 пс, спада – 29 пс, плоской вершины – 9 пс (измерены по уровням 0,1 – 0,9), так что общая длительность равна 65 пс. Амплитуда сигнала на выходе линии составила 0,04 В, что в 16,2 раза меньше ЭДС источника.

Таким образом, смоделирован и оптимизирован трехпроводный МФ с покрывающим слоем (лак ЭП-9114), обладающий коэффициентом ослабления 16,2 при воздействии сверхкороткого импульса длительностью до 100 пс. Полагается, что покрытие МФ лаком обеспечивает его влагоизоляцию

и защиту (в том числе от коррозии, взаимодействия химическими веществами и воздействия температур от минус 60 до +125 °С), что позволяет в перспективе использовать его в широком спектре областей, в том числе космической.

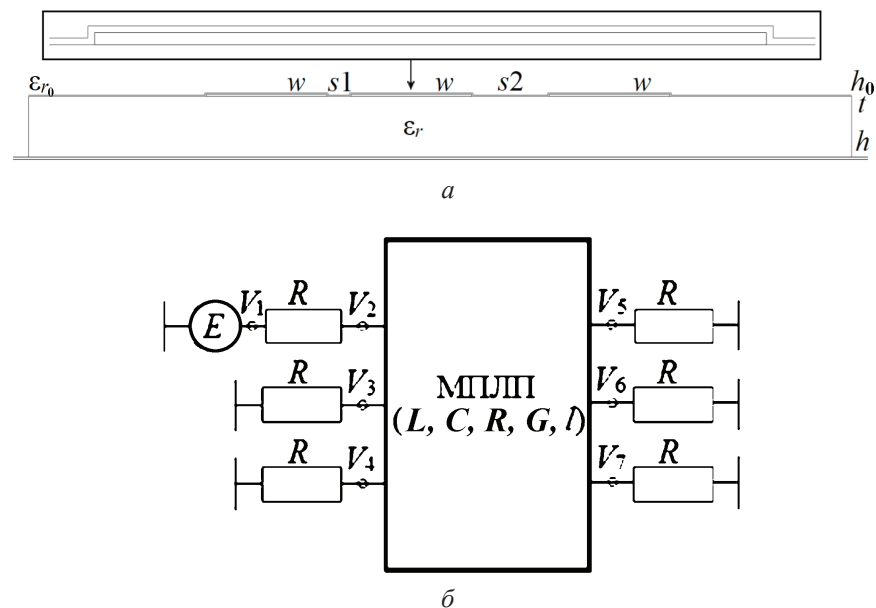


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и электрическая схема (б) трехпроводного МФ с влагозащитным покрытием

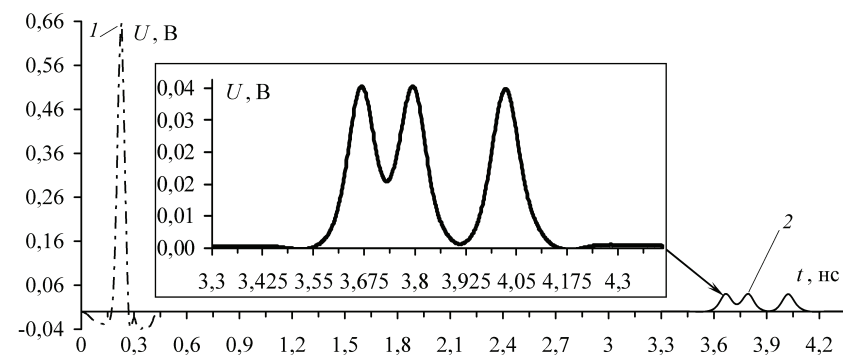


Рис. 2. Формы сигналов на входе (1) и выходе (2) (с увеличенным фрагментом сигнала на выходе) трехпроводного МФ с влагозащитным покрытием

Литература

1. *Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M.* Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. Vol. 61, No. 5. P. 546 – 550.
2. *Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R.* UWB pulse decomposition in simple printed structures // *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. 2016. Vol. 58, No. 4. P. 1136 – 1142.
3. *Belousov A. O., Gazizov T. T., Gazizov T. R.* Multicriteria optimization of multiconductor modal filters by genetic algorithms // *2017 Siberian Symposium on Data Science and Engineering (SSDSE)*. Novosibirsk, 2017. P. 65 – 68.
4. *New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S. P. Kuksenko [et al.] // Advances in Intelligent Systems Research (ISSN 1951-6851) : Proc. of the 2015 Inter. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM-2015)*. Phuket, Thailand, 2015. P. 293 – 301.

УДК 621.391.31

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СВЯЗАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ МАРКИ RT/DUROID

Суровцев Р. С.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В настоящее время при проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов необходимо особое внимание уделять электромагнитной совместимости. Одной из задач при этом является обеспечение целостности сигналов печатных плат, в рамках которого основное внимание уделяется минимизации или компенсации перекрестных наводок в межсоединениях.

Наведенные сигналы на концах (ближнем и дальнем) проводников являются результатом наложения падающих и отраженных волн и пропорциональны четверти суммы и разности коэффициентов емкостной (K_C) и индуктивной (K_L) связей между проводниками. Значения этих коэффициентов зависят от геометрической модели сечения и диэлектрического заполнения материала основы. В свою очередь, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r зависит от частоты, что усложняет анализ и обеспечение целостности сигналов.

Например, $\epsilon_r(f)$ широко используемого материала FR-4 может изменяться от 3,8 до 5 в диапазоне частот 8 – 12 ГГц [1]. Поэтому для обеспечения целостности сигналов необходимы предварительное моделирование взаимовлияний в связанных микрополосковых линиях (МПЛ) и выбор материалов со стабильными параметрами на начальных этапах проектирования.

Примечательными с этой точки зрения являются материалы марки RT/duroid, применяемые для производства печатных плат СВЧ-аппаратуры и имеющие малую относительную диэлектрическую проницаемость со слабой зависимостью от частоты.

Для сравнительной оценки параметров МПЛ на основе материалов марки RT/duroid проведено моделирование с использованием нескольких их типов: 5870, 5880, 6002. Сначала выполнена оптимизация ширины проводника w одиночной МПЛ для обеспечения волнового сопротивления линии сопротивлению тракта 50 Ом. Большая часть параметров фиксирована (толщина диэлектрика и фольги, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) и определяется типовыми размерами заготовок. Толщина основы всех материалов h_c составляет 127, 254, 381, 508, 762, 1524 и 3048 мкм, а толщина слоя фольги t равна 18 и 35 мкм. Диэлектрическая проницаемость материалов 5870, 5880, 6002, измеренная на частоте 10 ГГц, составляет 2,33; 2,2 и 2,94 соответственно.

Моделирование выполнено в системе TALGAT [2]. Вычислены оптимальные параметры одиночных МПЛ, а также соответствующие им коэффициенты взаимовлияния связанных МПЛ: четверти суммы $K_{NE}=(K_C + K_L)/4$ и разности $K_{FE}=(K_C - K_L)/4$. Полученные результаты сведены в табл. 1 и 2 (при толщине фольги t , равной 18 и 35 мкм соответственно).

Таблица 1

h_c , мкм	Оптимальные параметры МПЛ при $t=18$ мкм								
	RT/duroid5870			RT/duroid5880			RT/duroid6002		
	w , мм	K_{NE}	K_{FE}	w , мм	K_{NE}	K_{FE}	w , мм	K_{NE}	K_{FE}
127	0,365	0,02423	-0,00760	0,379	0,02336	-0,00699	0,313	0,028406	-0,01019
254	0,740	0,02237	-0,00737	0,768	0,02160	-0,00679	0,635	0,026109	-0,00987
381	1,120	0,02149	-0,00733	1,161	0,02080	-0,00676	0,962	0,024974	-0,00982
508	1,497	0,02116	-0,00731	1,552	0,020482	-0,00673	1,285	0,024576	-0,00979
762	2,251	0,02080	-0,00729	2,335	0,02012	-0,00672	1,933	0,024115	-0,00977
1524	4,515	0,02039	-0,00730	4,682	0,01974	-0,00672	3,876	0,023611	-0,00978
3048	9,045	0,02014	-0,00732	9,380	0,01951	-0,00674	7,762	0,023314	-0,00981