

## 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  $\epsilon_r$  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

Таблица 2

$h_c$ , мкм	Оптимальные параметры МПЛ при $t=35$ 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	0,357	0,02742	-0,00809	0,371	0,02637	-0,00743	0,306	0,03226	-0,01087
254	0,730	0,02416	-0,00759	0,758	0,02329	-0,00698	0,626	0,02832	-0,01017
381	1,108	0,02280	-0,00745	1,149	0,02204	-0,00687	0,951	0,02661	-0,00999
508	1,484	0,02219	-0,00738	1,539	0,02146	-0,00680	1,273	0,02588	-0,00990
762	2,237	0,02154	-0,00732	2,321	0,02082	-0,00674	1,920	0,02506	-0,00981
1524	4,498	0,02083	-0,00729	4,667	0,02014	-0,00671	3,862	0,02416	-0,00976
3048	9,025	0,02041	-0,00729	9,360	0,01970	-0,00671	7,745	0,02364	-0,00977

Видно, что наибольшее значение ширины проводника  $w$  во всем диапазоне изменения  $h_c$  имеет материал RT/duroid5880, при этом время задержки для данного материала является минимальным и на 10 % меньше максимального. Более толстая фольга незначительно (менее 1 %) уменьшает время задержки. Также видно, что уровень  $K_{NE}$  уменьшается с ростом  $h_c$ . В начале диапазона при  $t=35$  мкм этот уровень выше, чем при  $t=18$  мкм, приблизительно на 15 %, с увеличением  $h_c$  эта разница уменьшается и к концу диапазона составляет 1,5 %. Наименьший уровень  $K_{NE}$  имеет материал RT/duroid5880, а наибольший – RT/duroid6002. Различие составляет около 20 %. У более тонкой фольги значение  $K_{FE}$  примерно на 20 % меньше. Минимальным уровнем  $K_{FE}$  обладает материал RT/duroid5880. Во всем диапазоне значений толщины основы  $K_{FE}$  имеет отрицательный знак и изменяется в незначительных пределах. Модуль  $K_{FE}$  для материала RT/duroid6002 выше, чем для RT/duroid5880, приблизительно на 45 %. Более тонкая (максимум на 5 %) фольга уменьшает его.

Таким образом, сравнение материалов для печатных плат показывает возможность предварительного выбора материала для изготовления печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры, позволяющего минимизировать перекрестные наводки в паре связанных линий при заданном волновом сопротивлении одиночной линии 50 Ом.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.*

## Литература

1. *Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality* / A. R. Djordjevich [et al.] // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2001. Vol. 43, No. 4. P. 662 – 666.
2. *Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT* / С. П. Куксенко [и др.] // Доклады ТУСУРа. 2015. № 2 (36). С. 45 – 50.