

Оптимизация конструкторско-технологических параметров микрополосковой дифференциальной пары

Кечиев Л.Н., Нисан А.В.

В статье изложены методика и результаты исследования влияния основных конструкторско-технологических параметров на дифференциальное полное сопротивление пары с поперечным сечением в виде микрополосковой линии. Описана разработанная программа для оптимизации конструкторско-технологических параметров пары под требуемое дифференциальное полное сопротивление.

Введение

Дифференциальная передача сигналов позволяет передавать информацию со скоростью 100 Мбит/с и выше. В печатном монтаже для передачи дифференциального сигнала используется дифференциальная пара, представляющая собой две линии передачи с сильной связью между ними.

Для передачи дифференциального сигнала используется два выхода источника (драйвера) с целью подачи сигналов по двум линиям передачи. Одна линия несет один бит информации, а другая – его дополнение. Информационный сигнал заключен в разнице между сигналами в этих линиях. Одна из самых используемых сигнальных схем – это схема низковольтных дифференциальных сигналов (LVDS). В LVDS два проводника используются для переноса отдельного бита информации. Каждый сигнал изменяется в пределах от 1,125 В до 1,375 В и переносится по отдельной линии передачи.

Дифференциальное полное сопротивление – полное сопротивление, которое встречает на своем пути дифференциальный сигнал.

Наиболее распространенными видами поперечных сечений дифференциальных пар являются микрополосковая, полосковая и развернуто-связанная полосковая линия. Для всех этих вариантов конструктивного исполнения дифференциальных пар имеются формулы, например, в стандарте IPC-2141A, позволяющие рассчитать дифференциальное полное сопротивление при условии симметричности линий.

Однако известно, что асимметрия (нарушение идентичности конструкций связанных линий в дифференциальной паре), например, различная ширина, наличие отверстий в диэлектрике или проводника рядом с одной из линий, может привести к искажению дифференциального сигнала. Более того, формулы, приведенные в указанном и других стандартах, не учитывают влияние таких существенных факторов, как толщина и диэлектрическая проницаемость паяльной маски и влагозащитного покрытия.

Целью данной работы являлось уточнение имеющихся формул для расчета дифференциального полного сопротивления и создание программы для оптимизации конструкторско-технологических параметров микрополосковой дифференциальной пары. При этом под критерием оптимальности понималось соответствие расчетного дифференциального полного сопротивления заданному с заданной погрешностью.

Уточнение формулы для расчета дифференциального полного сопротивления

В [1] приведена методика проведения и результаты расчета с применением методов теории планирования эксперимента линейных эффектов (силы влияния на дифференциальное полное сопротивление) конструкторско-технологических факторов – параметров дифференциальной пары, сечение которой приведено на рис. 1. В качестве целевой функции было выбрано дифференциальное полное сопротивление. Проведенный анализ микрополосковой дифференциальной пары позволил выделить 15 конструкторско-технологических факторов, исследование влияния которых представлялось целесообразным, см. табл. 1. Подчеркнем, что в распространенных инженерных формулах влияние 9 из этих факторов никак не учитывалось.



Рис. 1. Сечение исследуемой микрополосковой дифференциальной пары: 1, 2 – дифференциальная пара, 3 – одиночный проводник

Вычисления проводились в программе ELCUT [2], позволяющей, в частности, методом конечных элементов рассчитывать электростатические поля и определять частичные и взаимные емкости проводников.

Проведение вычислительного эксперимента позволило снять ограничения на реализуемость варьируемых параметров, точность их значений и на пределы варьирования, устранить погрешность измерения. К преимуществам вычислительного эксперимента также следует отнести возможность всегда обеспечить управляемость факторами и осуществимость всех комбинаций факторов.

Результаты расчетов, приведенные в [1], позволяют существенно уточнить формулу для определения дифференциального полного сопротивления. Уточненная формула имеет следующий вид:

$$Z_{\text{диф}} = \frac{174,0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{подл}} + 1,41}} \ln\left(\frac{5,98h}{0,8w + t}\right) (1 - \exp(\frac{-0,96s}{h})) - 0,79 \frac{h_{\text{н.м.}} - 35}{17,5} - 5,99 \frac{\varepsilon_{\text{н.м.}} - 3,5}{1,75} - 2,87 \frac{h_{\text{вл}} - 70}{35} -$$

$$- 4,67 \frac{\varepsilon_{\text{н.м.}} - 3,5}{1,75} + 2,83 \frac{s_{23} - 800}{400} - 0,42 \frac{w_3 - 300}{150} - 0,90 \frac{s_{\text{омв-н}} - 1000}{500} + 0,68 \frac{d_{\text{омв}} - 2000}{1000} - 24,26$$

На рис. 2 приведена зависимость относительной погрешности расчета дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары по не уточненной и уточненной формулам от отклонения значений факторов от нулевого уровня. Анализ графиков, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- погрешность уточненной формулы меньше во всем рассматриваемом диапазоне значений факторов;
- в центре диапазона погрешность уточненной формулы минимальна;
- при значениях факторов меньше нулевого уровня погрешность уточненной формулы не превышает 6,5%. Учитывая постоянное уменьшение размеров проводников и зазоров между ними, невысокая погрешность расчета в данной области является существенным преимуществом уточненной формулы над аналогами.

Таблица 1. Факторы, влияние которых исследовалось. Натуральные значения факторов на уровнях приведены в микрометрах, кроме факторов $\varepsilon_{\text{подл}}$, $\varepsilon_{\text{п.м.}}$, $\varepsilon_{\text{вл}}$

Условное обозначение фактора	Название фактора	Натуральные значения факторов на уровнях			Учет влияния фактора в формулах IPC-2141A
		-1	0	+1	
$h_{\text{подл}}$	Толщина подложки	150	300	450	Да
$\varepsilon_{\text{подл}}$	Диэлектрическая проницаемость подложки	2	4	6	Да
$h_{\text{пров}}$	Толщина проводников	17,5	35	52,5	Да
w_1	Ширина проводника 1	150	300	450	Учитываются, но $w_1 = w_2$
w_2	Ширина проводника 2	150	300	450	
s_{12}	Зазор между проводниками 1 и 2	200	400	600	Да
$h_{\text{п.м.}}$	Толщина паяльной маски	17,5	35	52,5	Нет
$\varepsilon_{\text{п.м.}}$	Диэлектрическая проницаемость паяльной маски	1,75	3,5	5,25	Нет
$h_{\text{вл}}$	Толщина влагозащитного покрытия	35	70	105	Нет
$\varepsilon_{\text{вл}}$	Диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия	1,75	3,5	5,25	Нет
s_{23}	Зазор между проводниками 2 и 3	400	800	1200	Нет
w_3	Ширина проводника 3	150	300	450	Нет
$s_{1\text{п}}$	Зазор между проекцией проводника 1 на полигон заземления и краем полигона заземления	400	800	1200	Нет
$s_{\text{отв-п}}$	Расстояние от края отверстия до края полигона заземления	500	1000	1500	Нет
$d_{\text{отв}}$	Диаметр отверстия	1000	2000	3000	Нет

Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары

Меню	Исходные данные	Результат
Оптимизировать Экспортировать результаты в Excel О программе Выход	Требуемое дифференциальное полное сопротивление, Ом: 100 + 0.1 - 0.1	99.93
	Толщина подложки, мкм: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	315
	Диэлектрическая проницаемость подложки: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	3.85
	Толщина проводников, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☒ фиксирована: 35 ☐ не учитывать	35
	Ширина проводников 1 и 2, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☒ фиксирована: 150 ☐ не учитывать	150
	Зазор между проводниками 1 и 2, мкм: ☒ подобрать: мин. 100 макс. 160 шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	125
	Толщина паяльной маски, мкм: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	33.5
	Диэлектрическая проницаемость паяльной маски: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	3.35
	Толщина влагозащитного покрытия, мкм: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	67
	Диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия: ☒ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☐ не учитывать	3.35
	Зазор между проводниками 2 и 3, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☒ не учитывать	
	Ширина проводника 3, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☒ не учитывать	
	Расстояние от края отверстия до края полигона заземления, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☒ не учитывать	
	Диаметр отверстия, мкм: ☐ подобрать: мин. макс. шаг ☐ фиксирована: ☒ не учитывать	

Рис. 3. Снимок экрана программы

Заключение

Предложенный подход может быть успешно использован для уточнения формул для расчета дифференциального полного сопротивления пар с поперечным сечением других видов (полосковой и развернуто-связанной полосковой) и построения на основе уточненных формул программ-оптимизаторов, удобных и достаточно точных для инженерного применения.

Литература

1. Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Анализ зависимости дифференциального полного сопротивления пары с поперечным сечением в виде микрополосковой линии от конструкторско-технологических факторов // Технологии ЭМС. – 2007. – №3. С. 48–54.
2. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.2. ПК “ТОР”, Санкт-Петербург, 2005.