

Кечиев Л.Н.
Соловьев А.В.
Нисан А.В.

Методика анализа влияния конструкции печатных плат на электрофизические параметры проводников

Современное развитие электронной аппаратуры характеризуется постоянно повышающимся быстродействием, миниатюризацией, возрастающей сложностью и интеграцией. Повышение тактовых частот до сотен мегагерц и выше ведет к тому, что на целостность сигнала начинают оказывать влияние электрофизические параметры проводников на печатных платах.

Учет электрофизических параметров требует производить расчет кусочно-однородных сред, что возможно только численным методом граничных элементов[1, 2]. Из-за сложности расчета данным методом необходимо использовать специальное программное обеспечение. На сегодняшний момент на российском рынке одним из наиболее удобных, простых и вместе с тем мощных программных продуктов является разработка Петербургской корпорацией TOP под торговой маркой ELCUT. Это программа моделирования двумерных полей методом конечных элементов. Спектр задач, решаемых данной программой, очень широк: электростатика, электрическое поле постоянных или переменных токов, магнитостатика, магнитное поле синусоидальных токов и нестационарное магнитное поле, стационарное и нестационарное температурное поле, а также упругое напряженное состояние [3 – 5].

Модель линии передачи ELCUT

Для анализа влияния конструкции печатного узла на электрофизические параметры линии передачи была построена модель, которая представляет собой сечение печатного узла: стеклотекстолитовая подложка с металлическим слоем заземления на нижней стороне, проводником на верхней стороне, а также слоями паяльной маски и влагозащитного покрытия (Рис. 1), параметры модели приведены в Табл. 1.

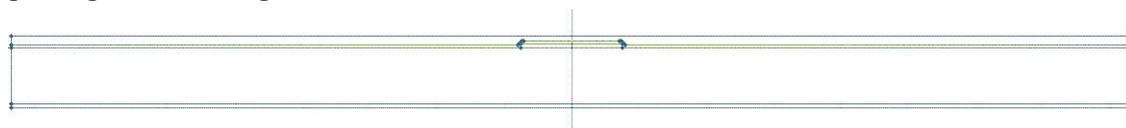


Рис. 1. Модель в программе ELCUT

Табл. 1 Параметры модели в программе ELCUT

Ширина подложки, мм	10
Толщина подложки, мм	0,5
Диэлектрическая проницаемость подложки	4,5*
Ширина полигона заземления, мм	10
Толщина полигона заземления, мкм	35
Ширина проводника, мм	0,9
Толщина проводника, мкм	0,35
Ширина слоя паяльной маски, мм	10
Толщина слоя паяльной маски, мкм	30*
Диэлектрическая проницаемость паяльной маски	3,5*
Ширина слоя влагозащитного покрытия, мм	10
Толщина слоя влагозащитного покрытия, мкм	75*
Диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия	2,5*

* - Изменяется при анализе влияния этого параметра на время задержки распространения сигнала и волновое сопротивление линии связи.

Основные параметры для расчета, а именно: ширина проводника, толщина проводника, толщина подложки, материал подложки были рассчитаны для системы проводник-подложка-экран так, чтобы волновое сопротивление лежало в пределах $50 \text{ Ом} \pm 2\%$. Расчет проводился по формуле

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \cdot \ln \left(\frac{5,98 \cdot h}{0,8 \cdot w + t} \right)$$

из стандарта IPC-2141 Controlled Impedance Circuit Boards and High Speed Logic Design.

Поскольку в программе ELCUT не может быть открытых областей с заданными свойствами, поскольку метод граничных элементов не позволяет решать неограниченные задачи, подложка окружена экраном диаметром 50 мм. Внутри экрана находится воздух, диэлектрическая проницаемость которого составляет $\epsilon_r = 1$.

Далее для решения задачи необходимо было построить сетку конечных элементов. ELCUT использует единственный тип конечного элемента – треугольник первого порядка. Генератор сетки может работать полностью автоматически, либо учитывать пожелание пользователя по сгущению или разрежению сетки в отдельных участках модели.

В расчетах электрических параметров описываемой модели сетка конечных элементов генерировалась автоматически. Среднее количество узлов сетки – 50000.

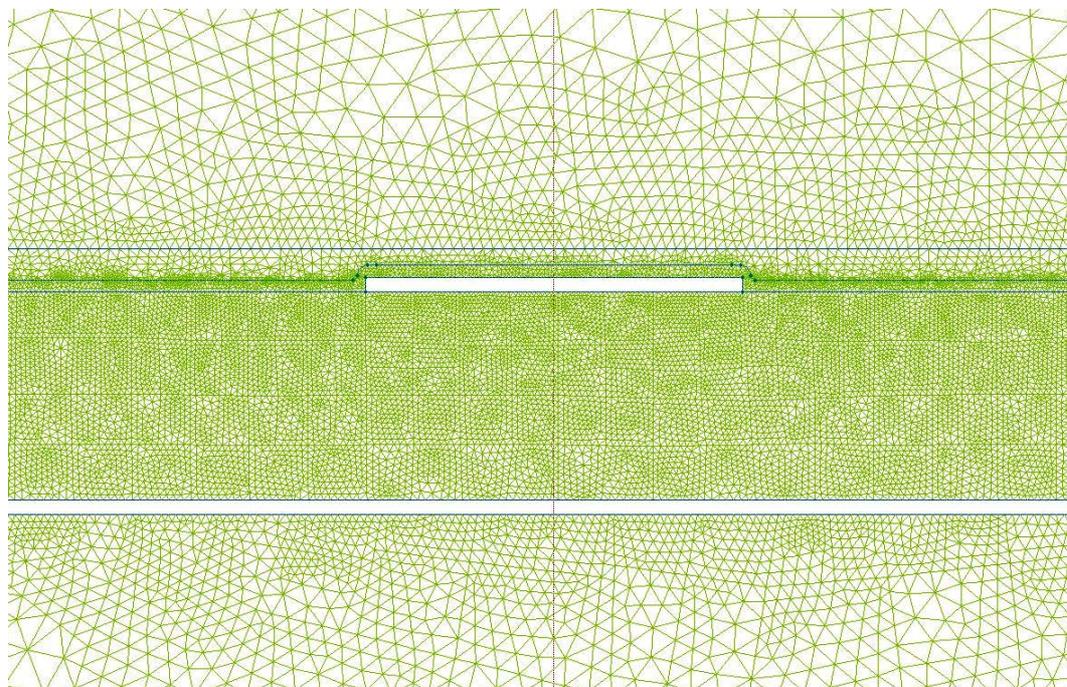


Рис. 2. Вид сетки конечных элементов вблизи проводника

В данной модели потенциал проводника составлял 1 В, потенциал полигона заземления и экрана 0 В.

Анализ влияния параметров модели

Для проверки правильности получаемых результатов при каждом изменении геометрической модели сначала проводился следующий расчет:

1. Для всех блоков (областей) была задана диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 1$. В результате расчетов в программе была получена погонная емкость проводника C_0 .
2. Затем для всех блоков была задана диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,5$ и также посчитана погонная емкость проводника C_D .
3. Далее по формуле $\epsilon_{\text{эф}} = C_D / C_0$ рассчитывалась эффективная диэлектрическая проницаемость, которая исходя из задаваемых параметров модели во втором случае, должна быть равна 4,5.

Погрешность расчетов во всех случаях не превышала $\pm 0,17\%$, что является показателем точности расчетов, проводимых в данной программе.

Используя $\varepsilon_{эф}$ можно определить время задержки распространения сигнала в линии связи по формуле:

$$t' = \frac{1}{V_F} = \sqrt{\varepsilon_{эф}} \cdot \frac{1}{V_C} = 3,3 \cdot \sqrt{\varepsilon_{эф}} \text{ нс/м}$$

где V_F - фазовая скорость распространения электромагнитной волны, V_C скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве (скорость света).

Современные быстродействующие микросхемы обладают временем срабатывания менее 1 нс, а минимальная задержка распространения электромагнитной волны в вакууме составляет 3,3 нс на 1 м. То есть, за 3,3 нс микросхема может переключиться несколько раз.

$$\text{Волновое сопротивление определяется по формуле } Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}{C},$$

Где $\mu = \mu_0 \cdot \mu_\gamma$ и $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_\gamma$ - магнитная и диэлектрическая проницаемости, C - погонная емкость проводника в диэлектрике.

Данная методика позволяет исследовать влияние на время распространения сигнала в проводнике и волновое сопротивление линии связи следующих параметров:

- Толщина паяльной маски
- Диэлектрическая проницаемость паяльной маски
- Диэлектрическая проницаемость подложки печатной платы
- Диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия
- Толщина влагозащитного покрытия
- Ширина полигона заземления
- и т.д.

В качестве примера расчета по данной методике приведено исследование влияния величины диэлектрической проницаемости подложки печатной платы.

Разница между максимальным и минимальным временем задержки распространения сигнала при изменении диэлектрической проницаемости печатной платы от 4 до 5,5 составила 0,85812 нс/м. Разница между крайними значениями волнового сопротивления составила 6,486 Ом.

Как показывают расчеты, электрофизические параметры в зависимости от диэлектрической проницаемости и толщины материала могут меняться в широких пределах. Поскольку свойства одного и того же материала могут меняться от производителя к производителю и от партии к партии, а толщина покрытий может варьироваться в зависимости от методов нанесения, при разработке сложных быстродействующих электронных модулей требуется особенно внимательно относиться к возможному влиянию этих факторов на электрофизические параметры линии связи. Внесение корректив в проект всегда сопряжено с дополнительными инвестициями. Имея мощное, но вместе с тем легкое в применении, программное обеспечение и проверенный метод расчета, изменение электрофизических параметров можно отслеживать еще на этапе проектирования электронного модуля, что позволит минимизировать как материальные, так и временные затраты.

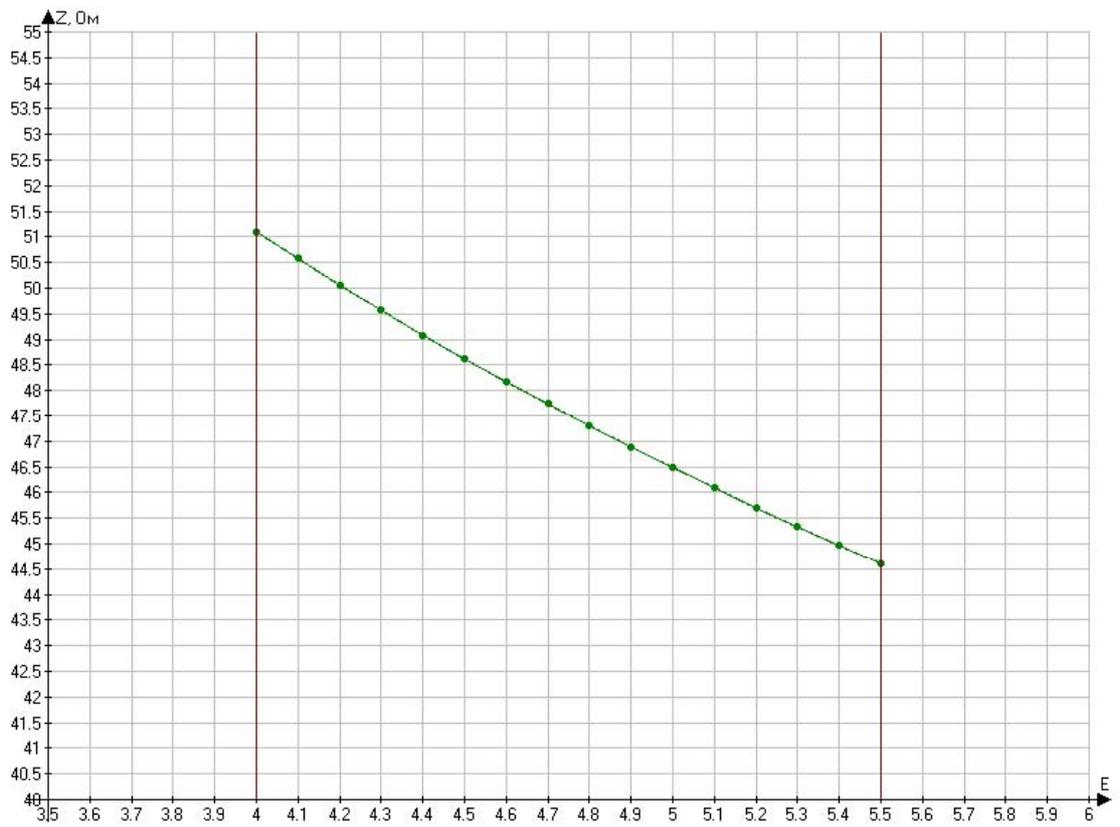


Рис. 3. Влияние диэлектрической проницаемости подложки печатной платы на волновое сопротивление

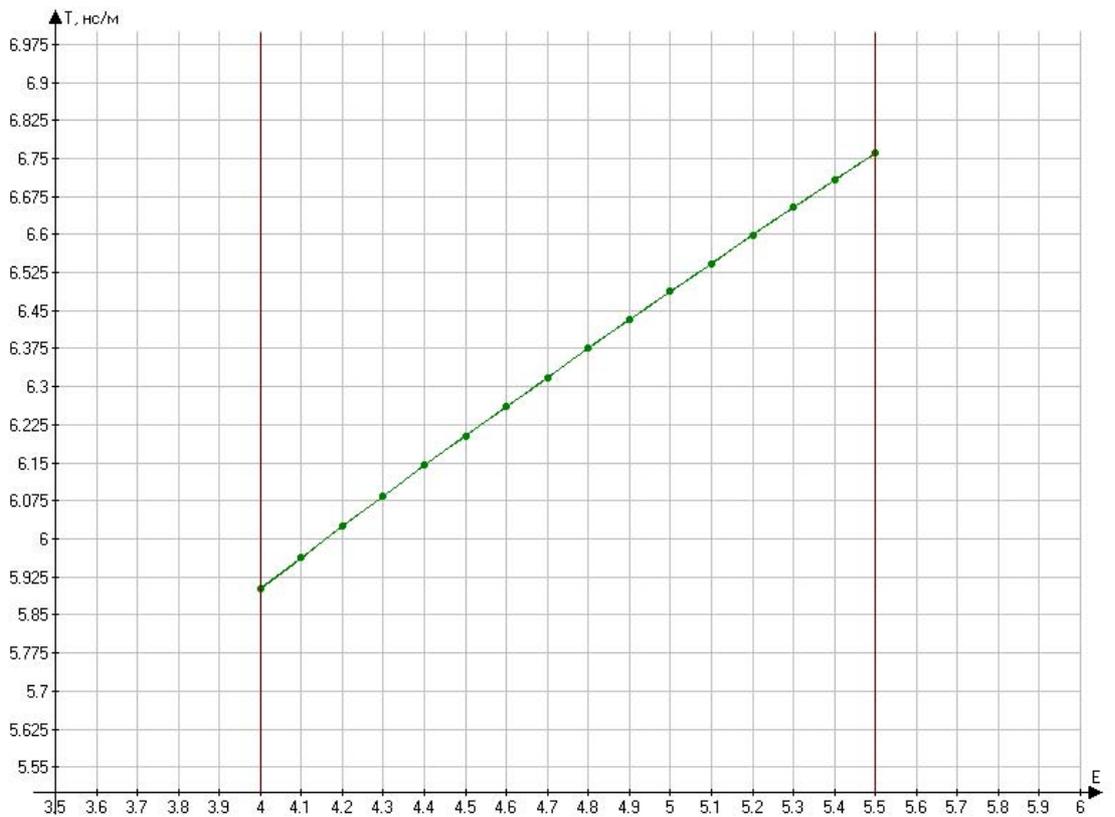


Рис. 4. Влияние диэлектрической проницаемости подложки печатной платы на время задержки распространения сигнала

Литература

1. Кечиев Л.Н., Шнейдер В.И. Современные проблемы обеспечения ЭМС и целостности сигнала электронных модулей быстродействующих цифровых электронных средств. Технология ЭМС, 2004, № 4, с. 50 – 59.
2. Кечиев Л.Н., Соловьев А.В. Методика анализа влияния технологических факторов печатных плат на их электрофизические параметры Технологии приборостроения, 2006, № 1 (17), с. 24 – 35.
3. Дубицкий С. Д. ELCUT – конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля. – EDA Express, № 12, октябрь 2005 – С. 24 – 29.
4. Дубицкий С.Д. ELCUT 5.1 – Платформа приложений анализа полей – Exponenta Pro. Математика в приложениях, 2004, № 1(5). – С. 20 – 26.
5. Дубицкий С.Д., Поднос В.Г. ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей. – CADMaser. 2001, № 1 – С. 17 – 21.