

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.391.31

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

3D ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕДНЫХ ТРАСС НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ И ПОЛУЧЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ В СРЕДЕ HYPERLYNX

П. А. Максимов

Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия
rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современных цифровых устройствах важным становится вопрос комплексной оценки линий передачи, представляющих собой медные трассы на печатной плате и связанные с ними конструктивные элементы. Прогнозирование их состояния, оценка создаваемых распространяющимися в них полезными и паразитными сигналами электромагнитных волн и их взаимное влияние друг на друга посредством моделирования играет существенную роль при оценке работоспособности изделия. *Материалы и методы.* Параметры используемых препрегов и ядер, проводящих элементов стека печатной платы, геометрические параметры медных трасс, характеристики выводов размещаемых на плате электронных компонентов, математический аппарат программы HyperLynx. *Результаты.* Установлено, что в условиях производства современных электронных устройств и печатных плат для них, в том числе работающих в высокочастотных диапазонах, на качество их работы могут влиять самые различные факторы: стек печатной платы и параметры используемых материалов, электромагнитное излучение, формируемое мощными элементами схемы, внешнее излучение, геометрия проводников, их совместное расположение на слоях печатной платы, другие параметры. В работе показано, что с целью максимального снижения возможных рисков, связанных с различными физическими явлениями и возникающими паразитными параметрами, необходимо проведение моделирования работы печатной платы, комплексно учитывающее взаимные параметры ее элементов, и их влияния как минимум на самые критичные участки. Определены S-параметры выделенного участка печатной платы, в частности параметр S_{11} , который является основным при оценке возможных переотражений в группе медных трасс в полосе до 10 ГГц. *Вывод.* Выполненные исследования позволяют по итогам моделирования снизить влияние факторов, вызванных неудачной геометрией медных трасс и расположением электронных компонентов, негативным образом сказывающихся на параметрах передаваемых сигналов.

Ключевые слова: медная трасса, печатная плата, 3D электромагнитное моделирование, надежность, HyperLynx

Для цитирования: Максимов П. А. 3D электромагнитное моделирование медных трасс на печатной плате и получение s-параметров в среде HyperLynx // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 69–74. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

3D ELECTROMAGNETIC MODELING OF COPPER TRACKS ON PRINTEC CIRCUIT BOARD AND EXTRACTION OF S-PARAMETERS IN HYPERLYNX

P.A. Maksimov

Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia
rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* In modern digital devices, the issue of a comprehensive assessment of transmission lines, which are copper tracks on a printed circuit board and associated structural elements, becomes more and more important. Predicting their behavior, assessing the electromagnetic waves generated by useful and parasitic signals propagating in them and their mutual influence on each other through modeling plays an essential role in assessing the performance of a product. *Materials and methods.* Geometric parameters of copper tracks, characteristics of electronic components placed on the board and the density of their mounting with a constant increase in operating frequencies and a decrease in supply voltages can significantly affect the electromagnetic environment, the parameters of transmitted pulses and the operation of internal microcircuit nodes, leading to instant or delayed, periodic in time failures different types of criticality. *Results.* The paper shows that in order to minimize possible risks associated with various physical phenomena and the resulting parasitic parameters of the printed circuit board materials, it is necessary to simulate its operation, taking into account the possible parameters of the materials used and their effect on at least the most critical areas – printed wiring, places installation of microcircuits and other radioelements. The S-parameters of the selected section of the printed circuit board are determined, in particular, the S_{11} parameter, which is the main parameter when assessing possible multiple reflections in a group of copper paths in the band up to 10 GHz. *Conclusions.* The performed studies allow us to exclude, based on the results of modeling, the factors caused by the unsuccessful geometry of copper routes and the location of electronic components that negatively affect the parameters of the transmitted signals.

Keywords: copper tracks, Printed circuit board, 3D electromagnetic modelling, reliability, HyperLynx

For citation: Maksimov P.A. 3D electromagnetic modeling of copper tracks on printed circuit board and extraction of s-parameters in HyperLynx. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):69–74. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-9

Введение

Современные печатные платы являются сложными устройствами, при изготовлении которых необходимо учитывать множество различных эффектов и параметров используемых материалов, их взаимной структуры в пределах печатного узла¹ [1–3], что в свою очередь подразумевает ряд возможных дефектов, влияющих на их надежность [4].

С увеличением плотностей монтажа, увеличением рабочих частот и уменьшением используемых напряжений электромагнитная обстановка и электромагнитная совместимость различных элементов печатной платы становится важным условием, в ряде случаев определяющим применение тех или иных элементов либо конструктивных решений, от которых в конечном счете зависит целостность сигналов в линиях передачи на печатной плате и надежная работа всех электронных элементов.

Сложные устройства могут состоять из десятка крупных микросхем – мощных вычислительных устройств и источников, преобразователей питания, соединенных между собой множеством линий передач, представленных в виде медных трасс и соединяющих их на разных слоях переходных отверстий, а также полигонами питания и земли, которые могут как занимать площадь всего отдельно взятого слоя, так и представлять из себя некоторую геометрию, параметры которой были заложены разработчиком исходя из необходимых требований к решению задачи [5–7].

В современной практике оценка электромагнитных параметров печатной платы производится после ее изготовления путем проведения испытаний, а также связанного ряда измерений, направленных на выявление отклонений в формах сигналов и определения уровня оказывающего негативное влияние электромагнитного фона, формирующегося непосредственно от различных элементов печатной платы. Такой подход не позволяет своевременно выявить ошибки на этапе проектирования, что при условии невозможности просчитать все особенности разработанной печатной платы, влечет за собой редкие и периодические сбои в работе части электронных узлов печатной платы.

Современное программное обеспечение позволяет проводить моделирование печатной платы и отдельных элементов ее топологии, производя анализ различных ее параметров. Несмотря на то, что ни один вид моделирования не позволяет достичь абсолютно достоверных результатов, тем не менее оно позволяет быстро, без готового изделия и измерительного оборудования провести анализ печатной платы и сделать соответствующие перерасчеты элементов – их замены, изменения в топологии и конструкции печатной платы.

¹ ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.

Описание свойств и функционала моделируемого объекта

Посредством моделирования можно провести общую оценку влияния некоторых параметров материалов [8, 9], геометрии ее элементов [10, 11], на параметры функционирования печатной платы до этапа изготовления опытного образца с целью прогнозирования их влияния на работу изделия.

Для проведения моделирования с учетом электромагнитного излучения была выбрана разработанная ячейка защиты информации, видоизменяющая проходящие через нее данные, тем самым скрывая их истинное значение от предполагаемого противника (рис. 1).

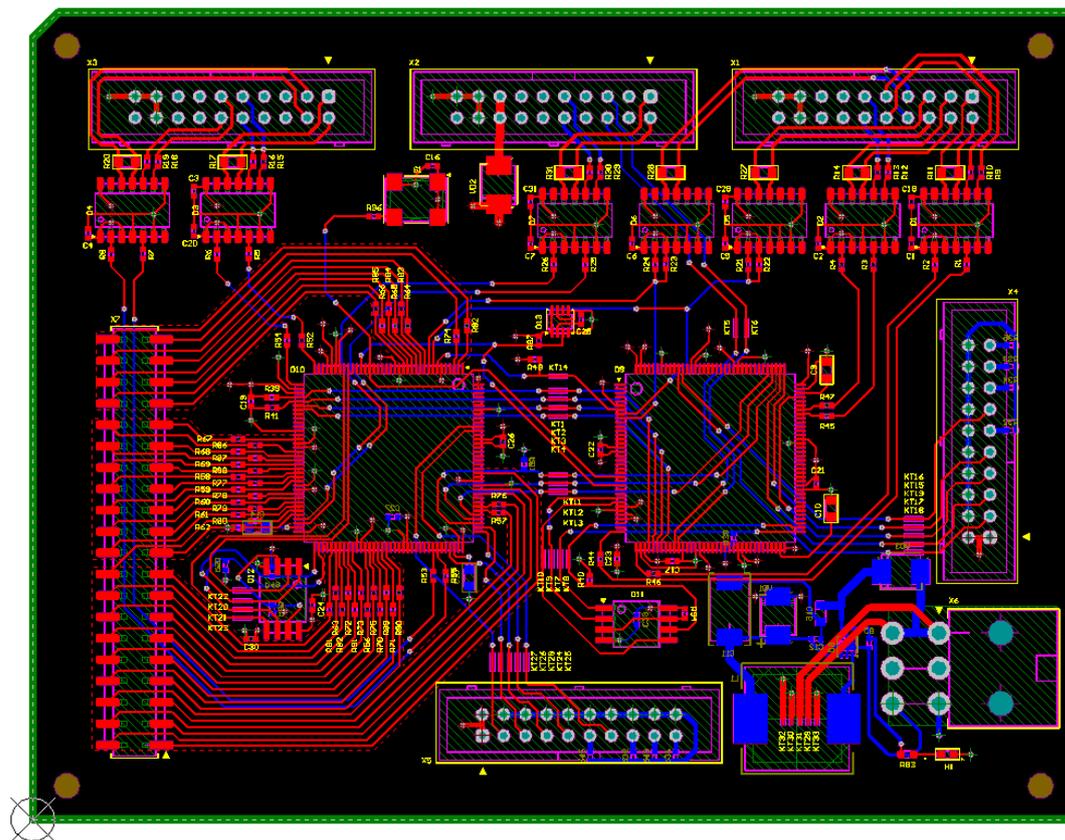


Рис. 1. Внешний вид печатной платы ячейки защиты информации, используемой для моделирования

С внешними устройствами данная ячейка связана интерфейсными микросхемами и разъемами, к которым подведены линии различных интерфейсов передачи данных. Присутствуют как параллельные линии данных, так и последовательные, в том числе дифференциальные. Структура и расположение элементов соответствуют типовым расположениям, применяемым во многих цифровых устройствах. Также разработана схема питания, вынесенная стандартно на край печатной платы, состоящая из диодов, защищающих схему от переполюсовки при неправильном подключении разъема питания, понижающего импульсного стабилизатора и фильтрующих цепей. Разработанная печатная плата ячейки защиты информации позволяет произвести моделирование данного изделия и оценку работы других электронных элементов со схожими структурой и принципами функционирования.

Методика проведения моделирования

Полное трехмерное электромагнитное моделирование, основанное на разбиении всех элементов проекта на примитивы с последующим решением сложных электромагнитных уравнений, определяющих искомые величины, является наиболее точным и вместе с тем весьма затратным средством, позволяющим получить перечень параметров, предельно точно описывающих разрабатываемое устройство.

Имеющаяся модель печатной платы загружается в программу HyperLynx, где происходит последовательная настройка параметров стека в соответствии с типичными для применяемых

классов материалов, а также выбор моделей объектов и установка других необходимых настроек. По итогам выполненного моделирования производится оценка полученных результатов.

Моделирование топологии ячейки

Несмотря на то, что непреобразованные данные не выходят из ячейки посредством линий передачи, их высокочастотные составляющие могут излучаться за пределы линий передачи на печатной плате в виде электромагнитных волн и приниматься антеннами, выдавая первичные сигналы и нивелируя функциональное назначение ячейки.

Для проведения моделирования в качестве линий, по которым распространяются «первичные данные», были выбраны линии интерфейса FSMC, идущие от соединителя «X2» до микроконтроллера «D10».

Для экономии времени моделирования была использована введенная в HyperLynx функция экспортирования в пакет 3D Full Wave Solver только части исходного проекта, наиболее интересная с точки зрения поставленных задач. На рис. 2 можно видеть полученный после четырех часов работы программы выбранный для моделирования участок печатной платы в виде набора из четырех слоев, проводящих дорожек и переходных отверстий, смонтированных элементов и их составных частей.

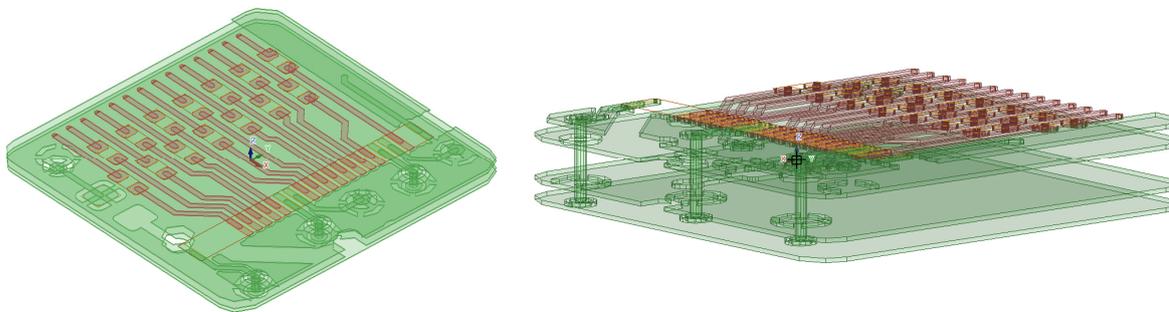


Рис. 2. Внешний вид участка печатной платы после завершения 3D электромагнитного моделирования

На полученных в пакете 3D Full Wave Solver графиках параметра (рис. 3, 4) S_{11} (мощность и фаза отраженного сигнала) можно отметить, что в выбранных линиях и связанных с ними проводящих структурах происходит отражение волн на частотах примерно в 4 и 6 ГГц, что относительно сигнала частотой в 100 МГц говорит об излучениях, проявляющих себя преимущественно на фронтах импульсов, в которых сосредоточены верхние гармоники спектра сигнала.

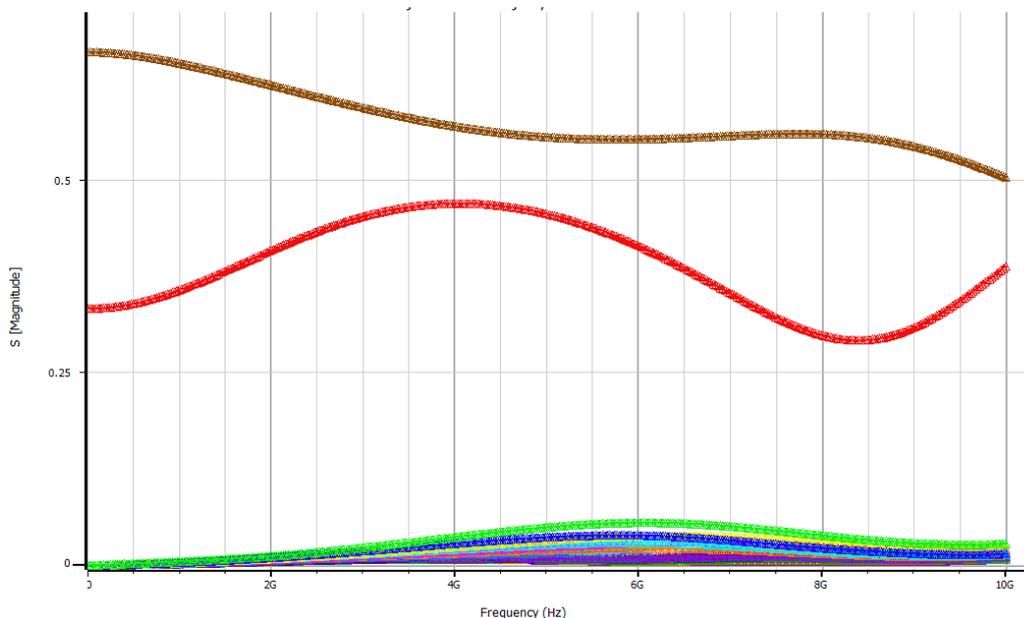


Рис. 3. Графики амплитуд параметра S_{11} (коэффициент отражения) по итогам моделирования

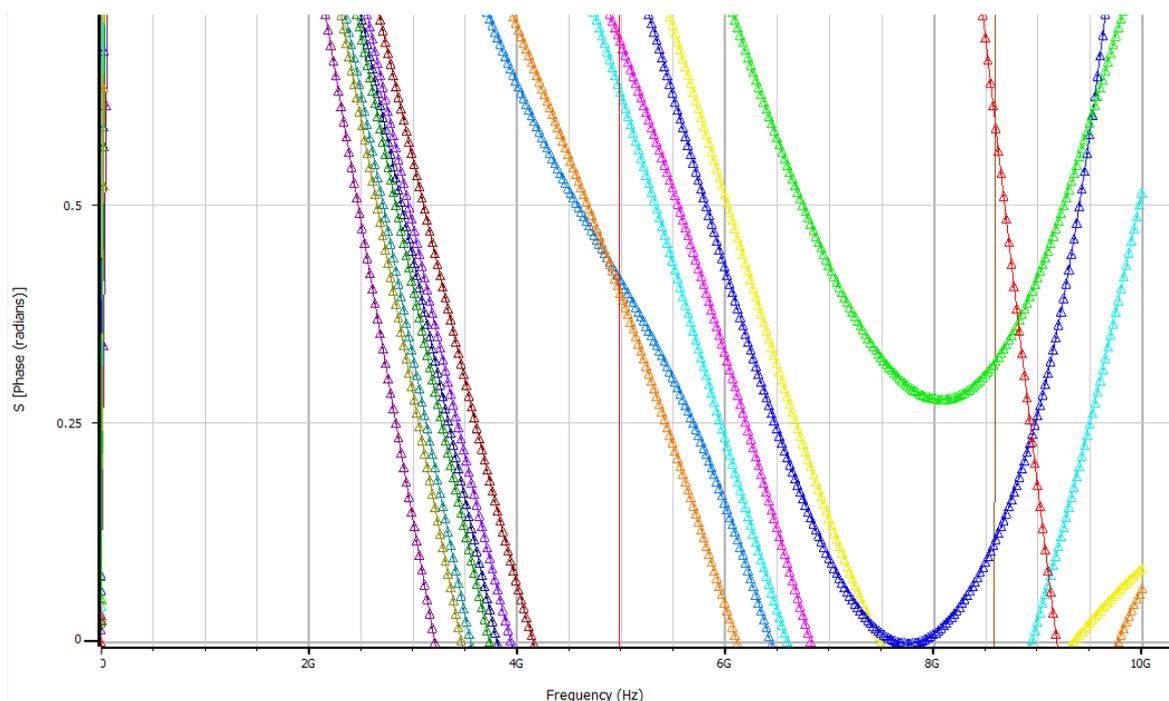


Рис. 4. Графики фаз параметра S_{11} (коэффициент отражения) по итогам моделирования

Наличие графических интерпретаций мощности и фазы отраженных волн позволяет судить об обстановке вокруг выбранного участка схемы, а также о предполагаемой форме искажений импульсов и их значимости с точки зрения оценки надежности разработанного устройства.

Заключение

Проведено моделирование печатной платы ячейки защиты информации в программе HyperLynx с учетом влияния электромагнитного излучения. Получены S -параметры выделенных линий передачи в полосе до 10 ГГц, учитывающие как сами линии, контактные площадки элементов подключения, переходные отверстия, так и параметры диэлектрика слоев стека печатной платы и параметры свободного пространства. Приведены изображения полученного набора слоев печатной платы в пакете 3D Full Wave Solver и графики распределения по частоте значений параметра S_{11} , определяющего мощности и фазы возникающих в линиях отражений. Произведен анализ результатов по итогам моделирования.

Список литературы

1. Юрков Н. К. Технология производства электронных средств. СПб. : Лань, 2021.
2. Жигалов А. Т., Котов Е. П., Шихаев К. Н., Хохлов Б. А. Конструирование и технология печатных плат : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1973.
3. Гриднев В. Н. [и др.]. Анализ проектирования многослойных печатных плат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018.
4. Данилова Е. А. Классификация дефектов печатных плат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013.
5. Johnson H. W., Graham M. High-Speed Digital Design. PTR Prentice Hall, 1993.
6. Трундов А. В. Практические рекомендации по проектированию высокоскоростных печатных плат. Сохранение целостности электрических сигналов и электропитания. М., 2020.
7. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. NJ : Prentice Hall PTR, 2003.
8. Yu Zheng. Secrets of Signal Integrity [M]. Beijing : Mechanical Industry Press, 2013.
9. Ni Tao. Signal Integrity Analysis and Simulation of High-Speed Digital Circuits [D]. Xi'an : Xidian University, 2010.
10. Zhang Haifeng. HyperLynx Simulation and PCB Design [M]. Beijing : Mechanical Industry Press, 2005.
11. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx // Electronic Devices. 2009. Vol. 32. P. 445–451.

References

1. Yurkov N.K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv = Technology of electronic means production*. Saint Petersburg: Lan', 2021. (In Russ.)
2. Zhigalov A.T., Kotov E.P., Shikhaev K.N., Khokhlov B.A. *Konstruirovaniye i tekhnologiya pechatnykh plat: ucheb. posobie = Design and technology of printed circuit boards : textbook*. Moscow: Vyssh. shk., 1973. (In Russ.)
3. Gridnev V.N. [et al.]. Analysis of the design of multilayer printed circuit boards. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018. (In Russ.)
4. Danilova E.A. Classification of PCB defects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013. (In Russ.)
5. Johnson H.W., Graham M. *High-Speed Digital Design*. PTR Prentice Hall, 1993.
6. Trundov A.V. *Prakticheskie rekomendatsii po proektirovaniyu vysokoskorostnykh pechatnykh plat. Sokhraneniye tselostnosti elektricheskikh signalov i elektropitaniya = Practical recommendations for the design of high-speed printed circuit boards. Preserving the integrity of electrical signals and power supply*. Moscow, 2020. (In Russ.)
7. Brooks D. *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2003.
8. Yu Zheng. *Secrets of Signal Integrity [M]*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
9. Ni Tao. *Signal Integrity Analysis and Simulation of High-Speed Digital Circuits [D]*. Xi'an: Xidian University, 2010.
10. Zhang Haifeng. *HyperLynx Simulation and PCB Design [M]*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.
11. Li Cheng. Research on Signal Integrity Simulation of High-Speed DSP System Based on HyperLynx. *Electronic Devices*. 2009;32:445–451.

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Андреевич Максимов

инженер-программист,

Пензенский научно-исследовательский

электротехнический институт

(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: agdvs8880@gmail.com

Pavel A. Maksimov

Software engineer,

Penza Research Electrotechnical Institute

(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 28.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 26.01.2022

Принята к публикации/Accepted 3.03.2022