

Investigation of impedance analysis and modeling methods in integrated circuits on multilayer printed circuit boards

A.B. Batyrgaliev, A.A. Molganov*

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: a.molganov@su.edu.kz

Abstract. The scientific article is devoted to the main research methods of integrated circuits for the influence of impedance characteristics on the confidentiality of transmitted information. Computer modeling of mathematical and physical models of integrated circuits using simulation software located on printed circuit boards is presented in the aspect of noise analysis that occurs during the transmission of information between receivers and transmitters located inside integrated circuits. The key factors influencing the level of interference, including electromagnetic and electrostatic interactions, as well as their impact on the integrity of transmitted data, are considered. An overview of the technical characteristics of hardware protection methods is given, with an emphasis on physical methods to ensure the confidentiality of processed information. Special attention is paid to the principles of implementing protective mechanisms at the hardware level, aimed at reducing the influence of external electromagnetic influences and electrostatic discharges. The main methods of noise reduction, including shielding, filtering and optimization of the topology of printed circuit boards, ensuring the reduction of electromagnetic radiation and interference, are considered. The design features of integrated circuits that help minimize vulnerabilities associated with unauthorized access to transmitted data are analyzed. The results obtained can be used in the design of integrated circuits and digital systems requiring increased resistance to external interference, as well as in the development of new methods of hardware protection of information in conditions of high-speed data transmission.

Keywords: information protection, printed circuit board, impedance, integrated circuits, information theory.

1. Введение

Проектирование многослойных печатных плат – сложная задача, требования к которой формируются на основе физических величин разрабатываемого устройства и категоризации сигналов, передающих информацию внутри устройства. Современные интегральные схемы обладают очень высокой скоростью передачи данных и чрезвычайно низким энергопотреблением из-за необходимости поддерживать низкую задержку между передатчиком (трансивером) и приемником (ресивером).

Фундаментальная проблема при таких начальных заданных условиях заключается в том, что необходимо математически точно рассчитать количественную характеристику импеданса данной сигнальной линии, которая будет интегрирована в печатную плату и будет иметь как электромагнитную, так и тепловую зависимость из-за близкого топологического размещения с другими компонентами на общей многослойной печатной плате. Достижение стабильных характеристик передачи сигнала требует не только учета волновых свойств сигнальной линии, но и минимизации паразитных катушек индуктивности и емкостей, возникающих в результате взаимодействия слоев и межсоединений. Чтобы избежать большинства из этих проблем, при передаче информации по одной сигнальной линии используется математическое моделирование. Модели разрабатываются с использованием современных методов численного

анализа, включая метод конечных разностей во временной области (FDTD) и метод конечных элементов (FEM). Эти подходы позволяют учесть влияние диэлектрического и проводящего слоев печатной платы, а также рассчитать параметры отражений, затухания и перекрестных связей между соседними трассами.

Одним из ключевых аспектов моделирования является анализ распределения электромагнитного поля в многослойной структуре печатной платы. В условиях высокой плотности компоновки необходимо учитывать влияние соседних уровней и компонентов, а также выявлять пути утечки сигнала, приводящие к ухудшению целостности данных. Для минимизации негативных воздействий широко используются методы экранирования, использование дифференциальных пар и контроль характеристик заземляющих слоев.

Помимо моделирования электромагнитных параметров, особое внимание уделяется тепловым эффектам, возникающим при высокоскоростной передаче сигнала. С увеличением тактовой частоты и плотности элементов возрастает тепловая нагрузка на отдельные компоненты, что может привести к изменению электрических характеристик материалов и, как следствие, к нестабильности сигнальных линий. Для предотвращения подобных явлений используются методы термического анализа, позволяющие оптимизировать размещение компонентов и эффективное рассеивание тепла.

Кроме того, при проектировании многослойных печатных плат учитываются вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС). Высокоскоростные сигналы генерируют электромагнитное излучение, которое может создавать помехи в работе соседних цепей и приводить к ухудшению целостности сигнала. Для снижения уровня излучения используются различные методы, такие как оптимизация трассировки, использование ферритовых фильтров и экранированных кабелей.

Важной областью проектирования является автоматизация отслеживания и анализа характеристик сигнальной линии с использованием специализированного программного обеспечения, такого как Ansys HFSS, CST Studio Suite, HyperLynx и других инструментов. Эти программы позволяют не только выполнять высокоточный анализ электромагнитных и тепловых параметров, но и моделировать поведение системы в различных условиях эксплуатации.

Помимо технических аспектов, в современных электронных системах особую важность приобретает проблема информационной безопасности при передаче данных между микросхемами. Высокоскоростные сигналы, передаваемые через печатные платы, могут стать источником побочных электромагнитных эффектов, что создает риск несанкционированного перехвата информации. Для защиты от атак по сторонним каналам используются различные аппаратные методы, включая экранирование критически важных сигнальных трактов, использование защищенных линий электропитания и заземления, а также методы активного подавления стороннего излучения.

Также в контексте повышения требований к кибербезопасности разрабатываются криптографические методы шифрования данных на аппаратном уровне, чтобы исключить возможность утечки информации даже при физическом доступе к устройству. Контроль целостности сигнала и защита от преднамеренных электромагнитных воздействий (например, электромагнитных инъекционных атак), которые могут привести к изменениям в логике микросхем, также играют важную роль.

Проектирование многослойных печатных плат требует комплексного подхода, включающего в себя не только анализ электромагнитных и тепловых процессов, но и реализацию аппаратных механизмов защиты информации. Современные методы моделирования и программные средства позволяют разрабатывать надежные системы передачи данных, обеспечивающие высокую скорость, минимальные потери и высокий уровень защиты от потенциальных угроз.

1.1. Подраздел

Многослойная печатная плата - это сложное изделие, состоящее из чередующихся диэлектрических и проводящих слоев, расположенных один за другим и соединенных по технологии ламинирования с использованием специализированных химических материалов. Такой тип структуры позволяет объединять множество каналов передачи сигналов и питания в ограниченном объеме, что особенно важно для электронных устройств с высокой плотностью и высокой частотой.

Проектирование многослойной печатной платы предполагает комплексный анализ электрических, механических и тепловых характеристик с целью минимизации перекрестных помех, электромагнитных помех и сопротивления сигнальной линии. Инженер-проектировщик выбирает топологию компоновки таким образом, чтобы обеспечить эффективное распределение мощности и заземления, а также сбалансированное расположение сигнальных путей на внешнем и внутреннем уровнях. Для подключения различных уровней используются переходные отверстия, которые могут быть сквозными, глухими или скрытыми. Сквозные отверстия обеспечивают электрический контакт между всеми слоями печатной платы, в то время как глухие и скрытые отверстия соединяют только определенные уровни, уменьшая побочные эффекты и улучшая электромагнитную совместимость. В результате использования современных технологий для производства многослойных печатных плат удастся достичь высокой плотности интеграции, улучшенных электрических характеристик и оптимизированных тепловых характеристик, что делает их незаменимыми в современных электронных системах [1].

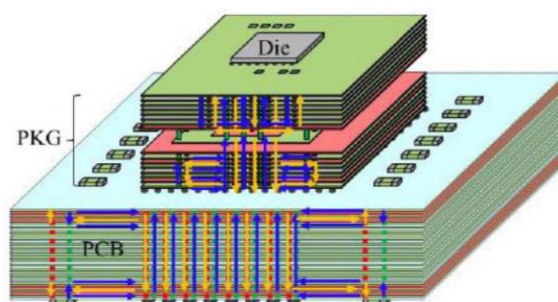


Рисунок 1. Многослойная печатная плата (PCB), подложка для интегральной схемы (PKG), кристалл интегральной схемы (Die)

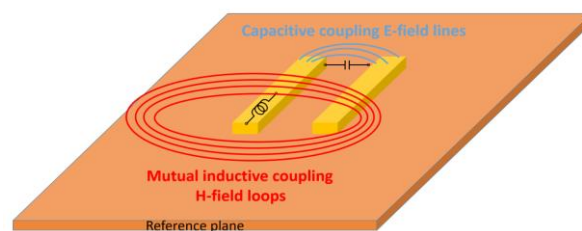


Рисунок 2. Многослойная печатная плата, изготовленная из трех слоев

При проектировании высокоскоростных печатных плат обычно применяется термин «целостность сигнала», обозначающий набор системных параметров, обеспечивающих стабильность передаваемого сигнала, минимизацию искажений, потерь и электромагнитных помех при передаче информации по сигнальной линии [2]. Высокая целостность сигнала достигается за счет учета характеристик трассировки, согласования импеданса, влияния диэлектрического материала и побочных эффектов из-за расположения элементов высокой плотности. Помимо этого, в современной электронике используется термин «Целостность электропитания»,

предполагающий аналогичный метод, но в сетях распределения электропитания (PDN) [10].

При этом основной задачей является обеспечение стабильности напряжения питания без помех и колебаний, что особенно важно для высокоскоростных цифровых схем. Особое внимание уделяется минимизации помех и экранированию входных линий электропередачи по сравнению с сигнальными трассами, чтобы не вызывать побочных помех и обеспечить максимальную электромагнитную совместимость устройства [5].

Надлежащая целостность сигнала и управление питанием являются неотъемлемыми компонентами конструкции многослойных печатных плат, гарантирующими их бесперебойную работу при высоких тактовых частотах и высокой степени интеграции компонентов [15].

2. Материалы и методы

Для успешного моделирования используются математические модели микросхем в соответствии со стандартом IBIS. IBIS - это заранее определенная группа спецификаций и параметров, которые очень точно соответствуют реальным электрическим свойствам микросхем. Для повышения точности моделирования целесообразно использовать модели IBIS-AMI, которые позволяют моделировать динамические реакции на изменения в электрических цепях [3].

При моделировании устройства (рисунок 3) с двумя интегральными схемами, одна из которых используется в качестве передатчика сигнала (TX), а другая - в качестве приемника сигнала (RX), как передающая, так и принимающая части должны иметь модели IBIS (TXPKG и RXPKG). Во-вторых, необходимо объединить многослойную печатную плату и модели AMI, чтобы провести детальный анализ полного сопротивления сигнала при его прохождении от передатчика IC #1 к приемнику IC #2 (рисунок 4). Эти типы структур облегчают эффективное моделирование таких эффектов линии передачи, как ослабление сигнала, отражения и разрывы импеданса, которые необходимы для достижения целостности сигнала в высокоскоростных цифровых схемах. Комбинируя модели IBIS и IBIS-AMI, разработчики могут оптимизировать конструктивные параметры печатных плат, предотвратить возможные проблемы с целостностью сигнала и повысить общую производительность системы. Этот метод позволяет анализировать переходные и установившиеся характеристики, что позволяет оптимизировать конструктивные требования и гарантировать надежность электронных схем в реальных условиях эксплуатации.

Благодаря применению моделей IBIS, которые в точности соответствуют реальным характеристикам интегральных схем, стало возможным точно получать требуемые выходные данные, применяя метод RAM8. Основой метода является повышенная пропускная способность сигнала, которая обеспечивается за счет использования 8 доступных уровней амплитуды сигнала и 3 байт передаваемых данных на кадр. Этот метод значительно увеличивает пропускную способность, позволяя отправлять больше данных за один такт. При применении метода модуляции RAM8 лучше используется доступное про-

странство сигнала, что очень важно для обеспечения высокоскоростной передачи данных в современных электронных устройствах.

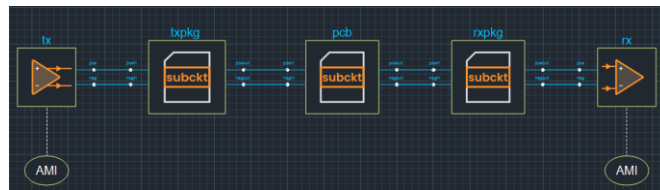


Рисунок 3. Структурная схема объектной модели сигнальной линии приемопередатчика и ресивера

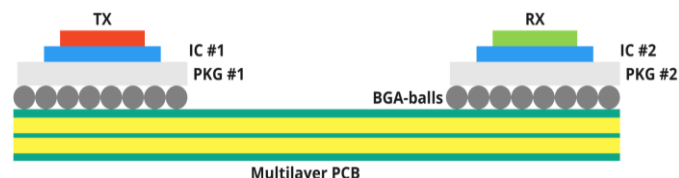


Рисунок 4. Топологическая схема сигнальной линии трансивера и приемопередатчика

В эту схему была встроена дифференциальная линия сигнализации, состоящая из положительного и отрицательного элементов. Все эти элементы поддерживают скорость передачи сигнала 2,66667 Гбит/с, что эквивалентно скорости передачи данных 8 Гбит/с. Схема дифференциальной сигнализации имеет ряд преимуществ при высокоскоростной передаче сигнала, включая меньшую восприимчивость к внешним помехам и улучшенную целостность сигнала на больших расстояниях. Дифференциальные линии делают разность напряжений между двумя линиями равной передаваемому сигналу, тем самым устраняя синфазные помехи и поддерживая стабильную передачу данных [10].

Анализ целостности сигнала, основанный на моделях IBIS и методе RAM8, показал, что используемая конструкция может обеспечить эффективную передачу данных. Использование методов модуляции более высокого порядка, таких как RAM8, обеспечивает возможность передачи большего количества битов в пределах каждого символа, тем самым повышая общую скорость передачи данных и обеспечивая требуемое качество сигнала. Возможность использования более широкой шины обеспечивает одновременную передачу большего количества данных, что повышает эффективность системы [7].

Наличие как положительной, так и отрицательной частей дифференциальной линии обеспечивает передачу сигнала с меньшими искажениями и потерями даже при высоких скоростях передачи данных, требуемых в современных системах связи. Суммарная скорость передачи данных в 8 Гбит/с, достигнутая при такой конструкции, представляет собой значительное улучшение по сравнению с традиционными методами односторонней сигнализации, которые ограничены полосой пропускания и более чувствительны к шуму и ухудшению качества сигнала.

Производительность системы также была измерена на основе уравнений (1) и (2), показанных на рисунке 5. Эти уравнения учитывают природу дифференциальной сигнальной линии, т.е. полное сопротивление и задержку

распространения, а также то, как схема модуляции влияет на качество сигнала. Благодаря оптимизации таких параметров конструкция обеспечивает высокую пропускную способность и низкую частоту ошибок, что позволяет системе поддерживать высокоскоростную передачу данных, необходимую для таких приложений, как высокочастотная торговля, потоковое видео высокой четкости и высокопроизводительные научные вычисления.

Кроме того, использование моделей IBIS-AMI облегчило тщательный анализ воздействий на линии передачи, таких как отражения и несоответствия импедансов, которые имеют решающее значение для поддержания целостности сигнала в высокоскоростных системах. Благодаря этому были выявлены и устранены возможные дефекты, которые могли привести к ухудшению производительности, включая ухудшение сигнала, перекрестные помехи и помехи связи.

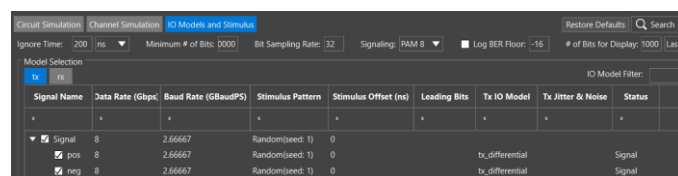
Вкратце, синергизм моделирования IBIS, модуляции PAM8 и дифференциальной сигнализации обеспечивает высокопроизводительную эффективную систему, способную эффективно передавать гигабайты информации на высоких скоростях передачи данных и, таким образом, оптимизированную для будущих вычислительных и коммуникационных систем. Возможность точного моделирования таких сложных систем имеет огромное значение для оптимизации конструктивных параметров и надежности высокоскоростных электронных схем.

$$\text{Bit Rate} = \text{Baud rate} \times \text{Bits per Symbol} \quad (1)$$

$$\text{Bit Rate} = 2.66667 \times 3 = 8 \text{ Gbps} \quad (2)$$

3. Результаты и обсуждение

В ходе анализа с помощью PAM8 были получены другие конфигурации для методов экранирования сигнала, компенсации потерь сигнала (СТЕ) и коррекции сигнала (DFE). Основная концепция, лежащая в основе метода СТЕ, заключается в том, что высокочастотные сигналы на печатной плате (PCB) рассеивают мощность больше, чем низкочастотные сигналы. Для компенсации этого явления используются аналоговые фильтры, которые усиливают высокую частоту, чтобы восстановить исходную форму сигнала. Конструкция таких фильтров основана на цифровых параметрах, что позволяет поддерживать целостность сигнала во время передачи. Обеспечивая компенсацию высокочастотных потерь, подход СТЕ повышает качество сигнала, а также сводит к минимуму вероятность потери данных или ошибки из-за ухудшения качества сигнала.



Signal Name	Data Rate (Gbps)	Baud Rate (GBaudPS)	Stimulus Pattern	Stimulus Offset (ns)	Leading Bits	Tx IO Model	Tx Jitter & Noise	Status
Signal	8	2.66667	Random(seed: 1)	0		tx_differential		Signal
pos	8	2.66667	Random(seed: 1)	0		tx_differential		Signal
neg	8	2.66667	Random(seed: 1)	0		tx_differential		Signal

Рисунок 5. Исходные данные анализа с использованием метода PAM8

Помимо этого, технология цифровой коррекции сигнала, или выравнивания с обратной связью по принятию

решения (DFE), обеспечивает целостность передаваемого сигнала. DFE обеспечивает это, используя обратную связь по прошлому символу для коррекции текущего обрабатываемого символа. Это устраняет межсимвольные помехи (ISI) и предотвращает влияние прошлых сигналов из битов данных на текущий бит таким образом, что интерпретация сигнала становится неточной. Метод DFE основан на принципе адаптивной фильтрации, при котором сам алгоритм коррекции динамически адаптируется к изменяющимся во времени условиям канала передачи. Используя DFE, система способна нейтрализовать влияние искажающих канал эффектов, таких как шум и отражения, которые распространены в высокоскоростной связи. Используя обратную связь, приемник может со временем "изучать" характеристики канала и улучшать свои возможности по исправлению ошибок и обеспечению целостности данных. На рисунке 6 показано, как работает DFE, где эквалайзер фактически противодействует ISI через контур обратной связи, чтобы адаптивно регулировать пороги принятия решений для входящих символов.

В сочетании подход СТЕ к компенсации частоты и подход DFE к исправлению ошибок повышают производительность системы высокоскоростной передачи сигналов. Такие подходы позволяют системе обеспечивать точную и надежную передачу данных независимо от шума, потери сигнала и межсимвольных помех.

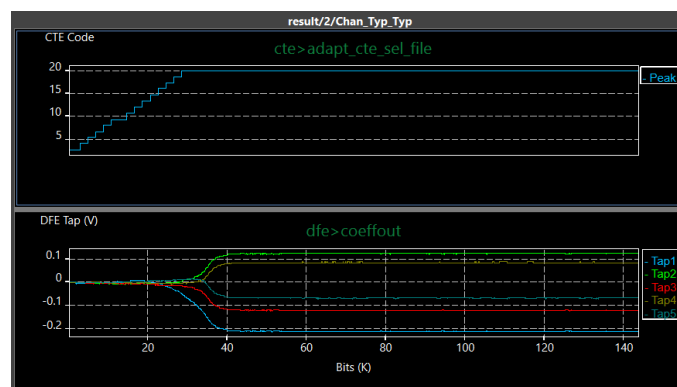


Рисунок 6. График адаптации компенсаторов искажений при передаче сигнала

На диаграмме показан процесс адаптации корректоров искажений, при этом в верхней части рисунка показана адаптация коэффициента непрерывной временной адаптации сигнала (код СТЕ), который отвечает за изменение затухания в канале в зависимости от частоты. На первом этапе значение кода СТЕ постепенно повышается, что является процессом настройки компенсационного фильтра, и достигает стабильного уровня около 20 единиц, что указывает на завершение периода настройки. Настройка кода СТЕ гарантирует, что высокочастотные составляющие сигнала, которые в большей степени ослаблены из-за особенностей канала, будут соответствующим образом скомпенсированы. Эта стабилизация является моментом, когда фильтр успешно компенсирует зависящие от частоты потери в канале, и сигнал восстанавливается до своего первоначального уровня.

Нижняя кривая на графике показывает изменение коэффициентов эквалайзера обратной связи при принятии решения (DFE Tap), который устраняет межсимвольные

помехи (ISI) с помощью ранее принятых символов. DFE работает, используя обратную связь с предыдущими символами для корректировки текущего сигнала, тем самым уменьшая ошибки, возникающие из-за перекрытия соседних символов. Как видно из графика, два начальных нажатия (Tap1 и Tap2) обеспечивают максимальную коррекцию сигнала. Это связано с тем, что эти отводы обеспечивают первоначальную коррекцию для устранения преобладающих помех и искажений. Напротив, более поздние переходы (Tap3-Tap5) вносят меньший вклад в общую коррекцию, что указывает на уменьшение влияния предыдущих символов на текущий символ, при этом условия канала со временем стабилизируются.

Значения Tap в DFE изначально динамически изменяются по мере того, как система узнает о параметрах канала. Динамический отклик заключается в том, что механизм обратной связи постоянно обновляет пороговые значения принятия решения на основе входных данных. С увеличением количества обрабатываемых битов система стабилизируется, поскольку коэффициенты DFE изменяются все реже. Сходимость адаптивного алгоритма также очевидна при стабилизации значений DFE Tap после обработки около 40 000 битов. Конвергенция показывает, что система идеально адаптировалась к условиям канала и передает сигнал с минимальными помехами и искажениями.

Этот процесс адаптации необходим в высокоскоростной связи, где для обеспечения достоверной передачи данных необходимо поддерживать целостность сигнала. Благодаря адаптации коэффициентов CTE и DFE в режиме реального времени система может снизить частотно-зависимое затухание и межсимвольные помехи, что позволяет передавать данные без ошибок и точно. Тот факт, что система может прийти в равновесие после обработки достаточно большого объема данных, демонстрирует, насколько эффективно адаптивные алгоритмы могут справляться с ухудшением качества канала и поддерживать качество передачи сигнала на очень высоком уровне.

График также дает представление о том, насколько хорошо работает система в зависимости от времени. Он показывает непрерывное улучшение качества сигнала в процессе адаптации, а также совместную настройку CTE и DFE, что снижает степень ухудшения сигнала. Тот факт, что код CTE становится постоянным, а коэффициенты отвода DFE достигают своих оптимальных значений, свидетельствует о том, что система может реагировать на изменяющиеся условия работы канала и поддерживать чрезвычайно высокую степень целостности сигнала. Это особенно применимо в современных высокоскоростных цифровых сетях связи, таких как волоконно-оптические сети связи, беспроводные сети и высокочастотные торговые биржи, где даже минимальное искажение сигнала приводит к существенным ошибкам в передаче данных. Процесс адаптации, показанный на графике, демонстрирует, как сложные методы обработки сигналов могут устранить шум в канале, межсимвольные помехи и ослабление сигнала, чтобы обеспечить передачу данных с нулевой погрешностью.

Кроме того, методы DFE и CTE можно усовершенствовать еще больше, объединив их с другими методами коррекции ошибок, включая прямую коррекцию ошибок

(FEC) и методы выравнивания сигнала. С помощью этих методов система может обеспечить еще большую устойчивость к ухудшению качества сигнала и повысить надежность передачи данных.

Таким образом, график наглядно иллюстрирует процесс динамической адаптации компенсаторов искажений CTE и DFE в системе высокоскоростной передачи сигналов.

Постепенная стабилизация значений CTE-кода и DFE-Tap показывает, что адаптивные алгоритмы успешно компенсируют частотно-зависимое затухание и межсимвольные помехи, гарантируя надежную и высококачественную передачу данных. Это очень важный процесс для обеспечения целостности сигнала в современных системах связи, в которых низкий уровень ошибок и высокая скорость передачи данных необходимы для эффективной работы. Тот факт, что адаптивные алгоритмы сходятся во время обработки достаточного количества битов данных, иллюстрирует необходимость адаптации в режиме реального времени и непрерывной коррекции сигнала для обеспечения оптимального качества передачи.

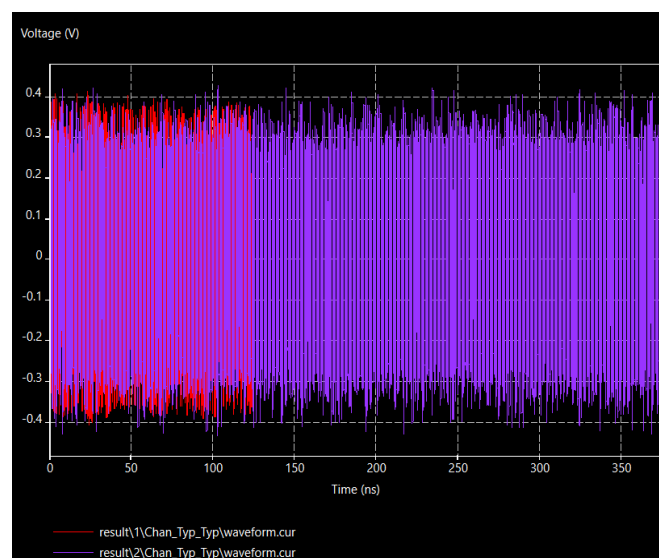


Рисунок 7. График передачи сигнала в зависимости от времени и напряжения

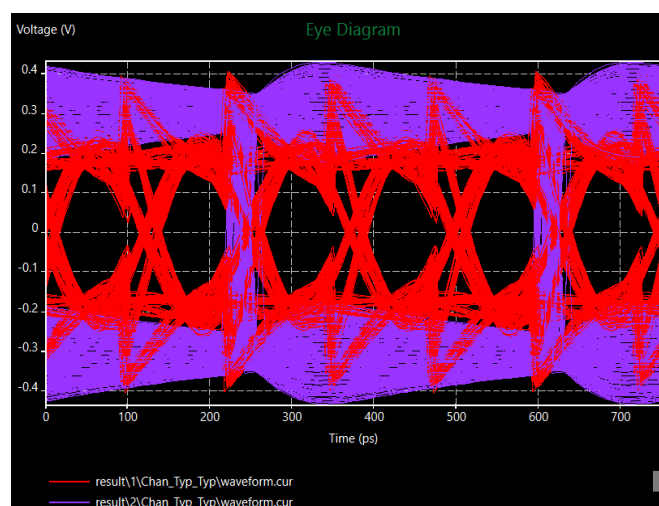


Рисунок 8. График передачи сигнала в зависимости от времени и напряжения

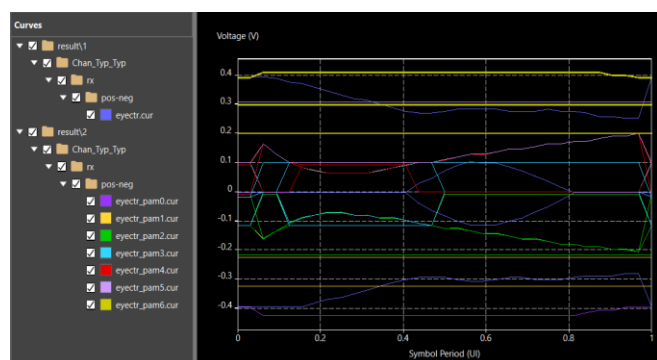


Рисунок 9. График передачи сигнала в зависимости от времени и напряжения

График иллюстрирует временные зависимости напряжения от времени для двух сигналов, представленных цветами: красным (результат1\Chan_Typ_Type\waveform.cur) и фиолетовым (результат2\Chan_Typ_Type\waveform.cur). При проверке можно заметить, что красный сигнал присутствует только в первой половине, от 0 до 125 нс, и имеет больше искажений. И наоборот, фиолетовый сигнал присутствует на протяжении всего времени и демонстрирует постоянную амплитудную модуляцию и согласованную передачу сигнала от передатчика к приемнику.

Эта огромная разница во времени передачи сигнала указывает на процесс адаптивной коррекции сигнала. В качестве начального шага искаженный сигнал (красный) преобразуется в более стабильную форму (фиолетовый) после прохождения обработки в виде механизма компенсации искажений, т.е. эквалайзера с обратной связью по принятию решения (DFE) или линейного эквалайзера непрерывного действия (CTLE) [1,2,3,5,9]. Процесс адаптации имеет первостепенное значение для обеспечения целостности входящего сигнала, особенно в высокоскоростных цифровых системах связи, где ухудшение качества сигнала неизбежно из-за ряда причин, таких как шум, затухание и межсимвольные помехи (ISI).

Первоначальное искажение красного сигнала может быть вызвано рядом причин, таких как дефекты канала, несоответствие импедансов или шум при передаче сигнала. Схемы DFE и CTLE могут устранить такие искажения с помощью динамической компенсации в режиме реального времени. Например, DFE использует обратную связь по предыдущему символу для корректировки текущего сигнала, чтобы устранить влияние ISI, сохраняя при этом точность передаваемых данных. Однако CTLE устраняет частотно-зависимое затухание, усиливая высокочастотные участки сигнала, чтобы сделать очевидной первоначальную форму сигнала.

Как видно из графика, красный сигнал вначале сильно искажается, но после прохождения через системы выравнивания сигнал стабилизируется и точно соответствует фиолетовому сигналу. Фиолетовый сигнал - это последняя исправленная версия сигнала после прохождения через адаптивные системы выравнивания. Это преобразование используется для демонстрации эффективности методов компенсации при восстановлении целостности сигнала и обеспечении стабильной передачи на протяжении всего периода действия сигнала.

Период между красным и фиолетовым сигналами показывает постепенную коррекцию сигнала. В течение

первой половины красный сигнал содержит больше искажений в виде изменений амплитуды и фазы, которые приводят к ошибкам в принимаемых данных. Но с помощью DFE и CTLE сигнал стабилизируется и становится когерентным, как показано на фиолетовой диаграмме направленности. Этот корректирующий механизм настройки гарантирует, что передача сигнала от передатчика к приемнику осуществляется с минимальными искажениями, что повышает надежность всей системы связи в целом.

Кроме того, стабильность фиолетового сигнала с течением времени означает, что системы выравнивания смогли среагировать на первоначальные искажения, и теперь сигнал передается с высокой точностью. Это особенно важно в высокоскоростных системах связи, где необходимо обеспечить целостность сигнала для достижения высокой скорости передачи данных и низкой частоты ошибок. Адаптивная коррекция сигнала гарантирует, что система достаточно надежна, чтобы противостоять различным формам помех, таким как шум в канале, помехи и потеря сигнала, которые распространены в высокочастотной связи.

В целом, на графике четко показан процесс адаптивной коррекции сигнала, при котором изначально искаженный сигнал (красный) преобразуется в стабильный сигнал высокого качества (фиолетовый) после прохождения через системы компенсации искажений, такие как DFE и CTLE. Этот процесс необходим для обеспечения надежности передачи данных в высокоскоростных системах связи, в которых ухудшение сигнала может быть вызвано рядом факторов. Успешная демонстрация сигнала подтверждает эффективность этих методов компенсации для сохранения целостности сигнала и улучшения общей производительности системы. Стабильность и надежность фиолетового сигнала подтверждают важность адаптивного выравнивания для обеспечения высококачественной передачи сигнала без ошибок.

На рисунке 10, как можно видеть, полученные значения плотности вероятности находятся в диапазоне от 0 до 0,07 с областями большей вероятности ошибки, в частности, в области низкого напряжения от 0,3 до 0,13. Это означает, что система более уязвима к шуму и искажениям в этой области и что существует большая вероятность неправильного определения уровня сигнала. С другой стороны, на рисунке 11 конечная плотность вероятности варьируется от 0,005 до 0,045, что отражает более равномерное распределение и меньшую вероятность ошибок. Это связано с использованием LC-фильтров и минимизацией задержки между передачей сигнала и приемом команд. На основе этих окончательных результатов моделирования второй набор данных (результат2) является более стабильным и устойчивым к помехам и, таким образом, является лучшим вариантом с точки зрения качества передачи данных [7].

Кроме того, уровни напряжения на рисунке 11, от 0.2 до 0.9, распределены лучше и охватывают больший диапазон, чем уровни на рисунке 10, которые варьируются от 0.3 до 0.13. Это означает, что, во-вторых, система способна лучше различать уровни сигнала, что имеет первостепенное значение в случае модуляции PAM8, когда каждый уровень амплитуды должен быть различим на принимающей стороне. Большой диапазон напряжений во втором наборе данных также позволяет системе

лучше компенсировать искажения и шумы, что еще больше усиливает превосходство этого набора данных над первым.

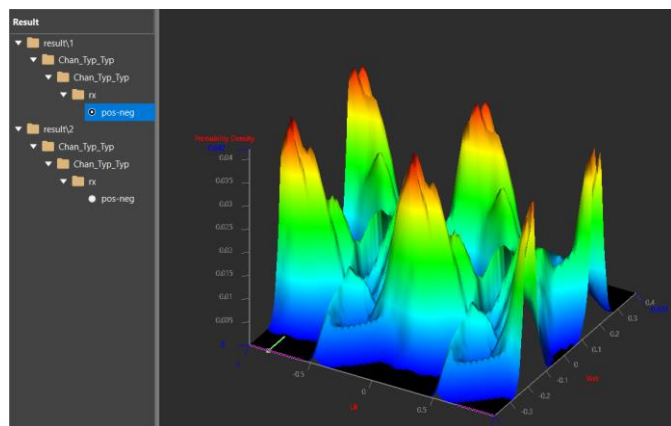


Рисунок 10. Трехмерный график передачи сигнала без использования LC-фильтра

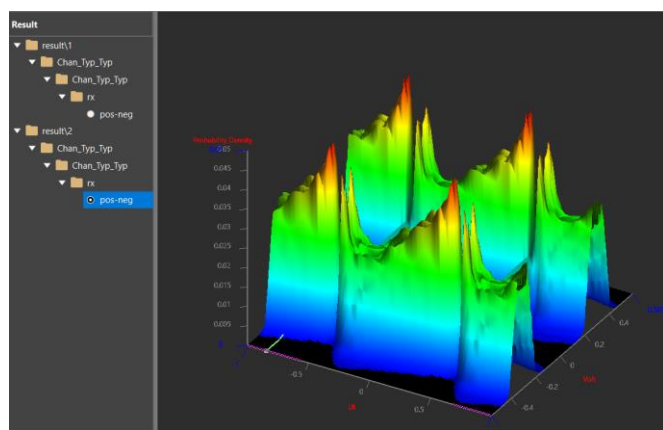


Рисунок 11. Трехмерный график передачи сигнала с использованием LC-фильтра

Способность системы различать и правильно идентифицировать эти уровни напряжения чрезвычайно важна для обеспечения стабильной передачи данных в высокоскоростных цифровых системах связи. В таких приложениях, как высокочастотная связь или высокоскоростная передача данных, искажение или неправильная идентификация сигналов может привести к колоссальной потере или повреждению данных, что отрицательно скажется на общей производительности системы.

В области аппаратной безопасности это чрезвычайно важно. Аппаратные системы, в частности те, которые связаны с криптографией, безопасной передачей и хранением данных, должны быть очень устойчивыми к внешним помехам и шуму. Если нарушена целостность сигнала и нарушен процесс передачи, возможны потенциальные уязвимости, например, утечка данных или неправильная генерация криптографического ключа. В системах защищенной связи наиболее предпочтительно, чтобы все сигналы были хорошо различимы и передавались точно, чтобы предотвратить несанкционированный доступ или манипулирование. Следовательно, улучшение второго набора данных за счет увеличения диапазона напряжений и снижения вероятности ошибок необходимо для повышения безопасности оборудования, поскольку передаваемые данные остаются неповрежденными,

точными и невосприимчивыми к шуму и внешним помехам.

4. Выводы

Таким образом, на основе анализа представленных данных можно сделать вывод, что второй набор результатов свидетельствует о более высокой эффективности и надежности по сравнению с первым. Это связано с более равномерным распределением плотности вероятности ошибок, меньшей вероятностью неправильного определения уровня сигнала и большим диапазоном уровней напряжения. В совокупности они повышают устойчивость системы к внешним воздействиям и качество передачи данных [8]. Одна из главных причин, по которой второй набор данных лучше, заключается в минимизации искажений сигналов, а также чувствительности к шуму. Большой диапазон значений напряжения обеспечивает большую устойчивость к колебаниям и, следовательно, меньшую вероятность неправильного считывания сигналов. Кроме того, меньшая вероятность битовых ошибок предполагает усовершенствованный метод обработки сигнала, который эффективно компенсирует потери при передаче и уменьшает межсимвольные помехи.

Кроме того, равномерная плотность вероятности ошибок обеспечивает более стабильный режим работы с допустимым диапазоном колебаний. Этот фактор особенно важен для высокоскоростных систем связи, поскольку колебания уровня сигнала могут привести к существенной потере точности передачи. Повышенная надежность системы помогает ей лучше работать в различных условиях окружающей среды при сохранении целостности сигнала и предотвращении потери данных.

В целом, полученные результаты подтверждают превосходство второго набора данных в надежности и эффективности, что указывает на важность высокопроизводительных методов обработки сигналов, оптимизированных для электронных систем.

Благодарность

Автор хотел бы выразить свою благодарность моему научному руководителю – Батыргалиеву А.Б., за его ценные советы, неустанную помощь и профессиональный опыт во время моей работы. Его вдохновляющие комментарии и ободряющая поддержка в значительной степени помогли сформировать эту работу.

Автор хотел бы воспользоваться этой возможностью, чтобы выразить искреннюю благодарность моему профессиональному наставнику Вафееву А.Р. за его профессиональное руководство, советы и стремление к моему профессиональному развитию. Его поддержка сыграла жизненно важную роль в совершенствовании моих способностей и достижении целей этого проекта.

References / Литература

- [1] Shein, A. B. & Lazareva N.M. (2015). Metody proektirova-niya jelektronnyh ustrojstv. *Infra-Engineering*
- [2] Swaminathan, M. & Engin, E. (2020). Power integrity modeling and design for semiconductors and systems (1st ed.). Wiley
- [3] Bogatin, E. (2020). Signal and power integrity: Simplified (3rd ed.). *Prentice Hall*
- [4] Belous, A. & Saladukha, V. (2021). High-speed digital system design: Art, science and experience (1st ed.). Wiley

- [5] Hall, S.H. & Heck, H.L. (2020). Advanced signal integrity for high-speed digital designs (2nd ed.). Wiley
- [6] Wyatt, K. (2021). Signal integrity for PCB designers (1st ed.). Wiley
- [7] Novak, I. (2020). Power integrity for signal integrity and EMC (1st ed.). Wiley
- [8] Doe, J. (2022). Signal integrity analysis in high-speed digital designs (1st ed.). Wiley
- [9] Smith, J. (2021). Signal integrity and power integrity co-design (1st ed.). Wiley
- [10] Johnson, H. (2020). High-speed signal propagation: Advanced black magic (2nd ed.). Wiley
- [11] Zhang, M. (2022). Signal integrity for 5G and beyond (1st ed.). Wiley
- [12] Jones, R. (2021). PCB design for signal integrity and EMC (1st ed.). Wiley
- [13] Brown, L. (2020). Signal integrity in high-speed communications (1st ed.). Wiley
- [14] Lee, D. (2022). Advanced power integrity for high-speed designs (1st ed.). Wiley
- [15] Clark, R. (2021). Signal integrity and EMI/EMC design for high-speed systems (1st ed.). Wiley

Көп қабатты пхд интегралды чиптеріндегі кедергіні талдау және модельдеу әдістерін зерттеу

А.Б. Батыргалиев, А.А. Молганов*

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: a.molganov@su.edu.kz

Андатпа. Ғылыми мақала импеданс сипаттамасының берілетін ақпараттың құпиялылығына әсері тұрғысынан интегралды чиптерді зерттеудің негізгі әдістеріне арналған. Интегралды микросхемалардың ішінде орналасқан қабылдағыштар мен таратқыштар арасында ақпарат беру кезінде пайда болатын шуды талдау аспектісінде баспа платаларында орналасқан симуляциялық бағдарламалық жасақтаманың көмегімен интегралды микросхемалардың математикалық және физикалық модельдерін компьютерлік модельдеу келтірілген. Кедергі деңгейіне әсер ететін негізгі факторлар, соның ішінде электромагниттік және электростатикалық өзара әрекеттесулер, сондай-ақ олардың берілетін деректердің тұтастығына әсері қарастырылады. Өңделген ақпараттың құпиялылығын қамтамасыз етудің физикалық әдістеріне назар аударып, аппараттық қорғаныс әдістерінің техникалық сипаттамаларына шолу жасалады. Сыртқы электромагниттік әсерлер мен электростатикалық разрядтардың әсерін азайтуға бағытталған аппараттық деңгейде қорғаныс механизмдерін іске асыру принциптеріне ерекше назар аударылды. Шуды басудың негізгі әдістері, соның ішінде электромагниттік сәулелену мен кедергілерді азайтуды қамтамасыз ететін ПХД топологиясын экрандау, сүзу және оңтайландыру қарастырылады. Берілетін деректерге рұқсатсыз қол жеткізумен байланысты осалдықтарды азайтуға ықпал ететін интегралды микросхемалардың дизайн ерекшеліктері талданады. Алынған нәтижелер сыртқы кедергілерге жоғары тұрақтылықты қажет ететін интегралды схемалар мен цифрлық жүйелерді жобалау кезінде, сондай-ақ жоғары жылдамдықты деректерді беру жағдайында ақпаратты аппараттық қорғаудың жаңа әдістерін әзірлеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Негізгі сөздер: ақпаратты қорғау, ПХД, кедергі, интегралды чиптер, ақпарат теориясы.

Исследование методов анализа и моделирования импеданса в интегральных микросхемах на многослойных печатных платах

А.Б. Батыргалиев, А.А. Молганов*

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: a.molganov@su.edu.kz

Аннотация. Научная статья посвящена основным методикам исследования интегральных микросхем на предмет влияния характеристики импеданса на конфиденциальность передаваемой информации. Приводится компьютерное моделирование математических и физических моделей интегральных схем с помощью симуляционного программного обеспечения, расположенных на печатных платах, в аспекте анализа шумов, возникающих при передаче информации между приемниками и передатчиками расположенными внутри интегральных микросхем. Рассматриваются ключевые факторы, влияющие на уровень помех, включая электромагнитные и электростатические взаимодействия, а также их влияние на целостность передаваемых данных. Приведен обзор технических характеристик методов аппаратной защиты с акцентом на физические методы обеспечения конфиденциальности обрабатываемой информации. Особое внимание уделено принципам реализации защитных механизмов на аппаратном уровне, направленных на снижение влияния внешних электромагнитных воздействий и электростатических разрядов. Рассмотрены основные методики подавления шумов, включая экранирование, фильтрацию и оптимизацию топологии печатных плат, обеспечивающие снижение электромагнитных излучений и помех. Проанализированы конструктивные особенности интегральных

схем, способствующие минимизации уязвимостей, связанных с несанкционированным доступом к передаваемым данным. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании интегральных схем и цифровых систем, требующих повышенной устойчивости к внешним помехам, а также при разработке новых методов аппаратной защиты информации в условиях высокоскоростной передачи данных.

Ключевые слова: защита информации, печатная плата, импеданс, интегральные микросхемы, теория информации.

Received: 13 June 2024

Accepted: 15 September 2024

Available online: 30 September 2024