

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ

Жук Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Собчук Н.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлен учебный программный комплекс для наглядного изучения целостности сигналов в высокоскоростных цифровых интерфейсах. Реализованы линейные коды NRZ, манчестерский и MLT-3, упрощенная модель канала (белый шум, джиттер, RC-фильтрация) и построение глазковой диаграммы для оценки «закрытия глаза». Дополнительно выполнен расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по формулам IPC. Параметры шума, джиттера и RC-постоянной могут изменяться пользователем, что позволяет проследить влияние искажений на раскрытие глаза.

Ключевые слова: целостность сигналов; высокоскоростные интерфейсы; линейное кодирование; глазковая диаграмма; джиттер; белый шум; RC-фильтрация; микрополосковая линия; стриплайн; волновое сопротивление.

Введение. Подобные эффекты характерны для интерфейсов *PCIe*, *USB*, *Ethernet* и др. Высокоскоростные цифровые интерфейсы предъявляют повышенные требования к целостности сигналов (*Signal Integrity, SI*): рост частоты и крутизны фронтов усиливает влияние паразитных параметров линий передачи и межсоединений. Это приводит к смещению момента переключения (джиттеру), деградации фронтов при ограничении полосы и амплитудным искажениям вследствие шумов. Цель работы – разработка учебного программного комплекса, объединяющего генерацию сигналов, упрощенную модель канала, построение глазковой диаграммы и расчет волнового сопротивления микрополоски и стриплайна.

Основная часть. Комплекс объединяет три модуля: *Encoder* (генерация и кодирование), *Eye Diagram* (построение глазковой диаграммы) и *PCB Calc* (расчет волнового сопротивления печатных линий). В *Encoder* формируются идеальная временная диаграмма и сигнал после прохождения модели канала; этот массив используется в *Eye Diagram* для построения глаза. В *PCB Calc* по параметрам W , H , T и ϵ_r вычисляется Z_0 микрополосковой линии и стриплайна по формулам IPC. Комплекс ориентирован на учебные лабораторные работы и демонстрации, для чего и был разработан удобный интерфейс (рисунок 1):

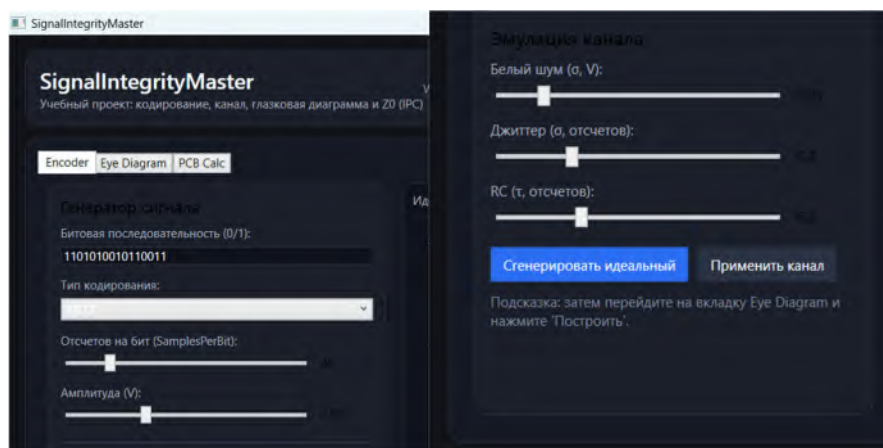


Рисунок 1 – Главное окно проекта с вкладками *Encoder*, *Eye Diagram* и *PCB Calc*

Архитектура реализована в *WPF (.NET 6)* по паттерну *MVVM*: вычисления выполняются во *ViewModel*, а графики отрисовываются на *Canvas (Polyline)*. Это упрощает сопровождение и расширение комплекса.

Формирование временных диаграмм выполняется по входной битовой строке с дискретизацией *SamplesPerBit* на битовый интервал (*UI*). Реализованы коды *NRZ* (двухуровневый), *Manchester* (переход внутри *UI*) и *MLT-3* (трехуровневый код с переходами при «1»), что позволяет сравнить плотность переключений и требования к полосе.

С практической точки зрения *NRZ* прост и широко применяется, однако при высоких скоростях чувствителен к затуханию и помехам; *Manchester* обеспечивает самосинхронизацию за счет обязательного перехода внутри *UI*, но требует большей полосы; *MLT-3* снижает спектральную ширину по сравнению с *NRZ* за счет многоуровневости, что полезно для линий с ограниченной полосой.

Для приближения к реальным условиям передачи реализована упрощенная модель канала: аддитивный белый шум (*AWGN*), джиттер и *RC*-фильтрация первого порядка. Шум добавляется к отсчетам как нормальная случайная величина с σ ; джиттер моделируется случайным смещением момента выборки с интерполяцией; *RC*-фильтр имитирует ограничение полосы и завал фронтов. В модели предусмотрена регулировка σ для *AWGN, величины джиттера (в долях *UI*) и постоянной времени τ *RC*-фильтра. При сравнении идеального сигнала и сигнала после прохождения канала, где наблюдаются снижение крутизны фронтов при усилении фильтрации и рост амплитудного разброса при увеличении шумовой составляющей; при увеличении джиттера дополнительно ухудшается повторяемость момента переключения, что критично для высокоскоростных систем синхронного приёма (рисунок 2):*



Рисунок 2 – Сравнение идеального сигнала и сигнала после канала (джиттер + *RC*-фильтрация + белый шум)

Глазковая диаграмма строится по сигналу после канала: последовательность нарезается на окна длиной несколько *UI* и фрагменты накладываются на один график. Вертикальное закрытие отражает рост амплитудного разброса (шум), горизонтальное - разброс моментов переходов (джиттер), а фильтрация снижает крутизну фронтов. В учебном режиме удобно наблюдать, как оптимальный момент выборки смещается, а окно по времени/амплитуде уменьшается при росте джиттера и шума (рисунок 3):

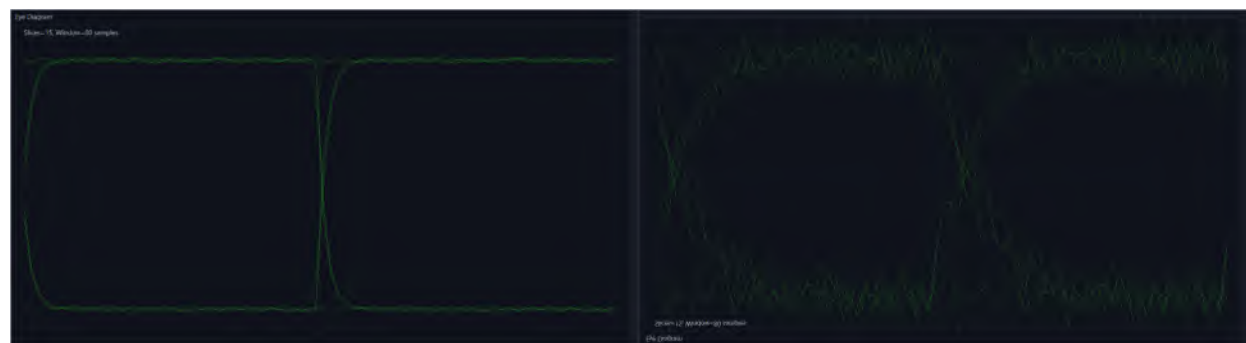


Рисунок 3 – Глазковая диаграмма при умеренных искажениях и при повышенных искажениях (закрытие глаза)

Для связи наблюдаемых искажений с параметрами межсоединений предусмотрен модуль *PCB Calc*, выполняющий расчёт волнового сопротивления Z_0 для двух типовых структур печатных линий: микрополосковой линии (*Microstrip*), и стриплайна (*Stripline*). Пример формы ввода и результата расчёта приведён далее (рисунок 4):

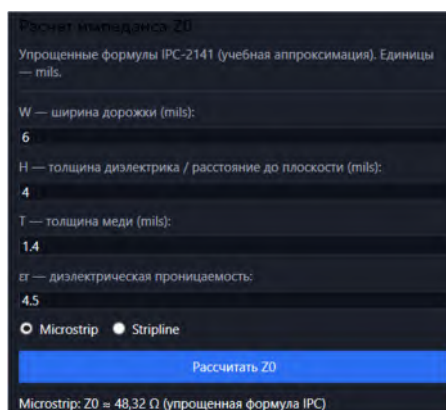


Рисунок 4 – Окно *PCB Calc*: расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по параметрам W , H , T , ϵ_r

Пользователь задает W , H , T и ϵ_r , после чего по инженерным аппроксимациям *IPC* вычисляется Z_0 . Увеличение W снижает импеданс, увеличение H повышает его, а рост ϵ_r обычно уменьшает Z_0 . Это помогает быстро подобрать геометрию трассы под требуемые значения (например, 50/90/100 Ом). Для микрополоски и стриплайна различаются эффективная диэлектрическая проницаемость и зависимость Z_0 от высоты H , что учитывается выбранными аппроксимациями.

Заключение. Разработан учебный программный комплекс для моделирования целостности сигналов в высокоскоростных интерфейсах. Поддерживаются линейное кодирование (*NRZ*, *Manchester*, *MLT-3*), упрощенная модель канала (*AWGN*, джиттер, *RC*-фильтрация) и построение глазковой диаграммы для оценки запаса по времени и амплитуде. Модуль *PCB Calc* выполняет расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по формулам *IPC*. Комплекс может использоваться как основа для учебных стендов по *SI* и последующего расширения модели канала.

Список литературы

1. *IPC-2141A:2004-04-21. Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards*. IPC, 2004.
2. Bogatin E. *Signal and Power Integrity – Simplified*. 3rd ed. Pearson, 2018.
3. Johnson H., Graham M. *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*. Prentice Hall, 1993.
4. Paul C. R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, October 2007.

UDC 621.396.6.001

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING SIGNAL INTEGRITY IN HIGH-SPEED INTERFACES

Zhuk Y.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Sobchuk N.S. – Senior Lecturer, Department of ETT

Annotation. An educational software tool for visualizing signal integrity in high-speed digital interfaces is presented. It supports *NRZ*, *Manchester* and *MLT-3* coding, a simplified channel model (*AWGN*, jitter and *RC* low-pass filtering) and eye diagram construction for assessing eye closure. The *PCB Calc* module estimates characteristic impedance of microstrip and stripline traces from W , H , T and ϵ_r using *IPC*-based formulas. Channel parameters can be adjusted interactively to observe their impact on eye opening.

Keywords: signal integrity; line coding; eye diagram; jitter; *AWGN*; *RC* filtering; characteristic impedance; microstrip; stripline; bandwidth limitation.