

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-167-180>

## Оценка параметров высокоскоростных линий связи для высоконадежных реконфигурируемых систем на базе S-параметров и BER

М. В. Орда-Жигулина<sup>1,2</sup> ✉

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук пр. Чехова, д. 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров пер. Итальянский, д. 106, г. Таганрог 347900, Российская Федерация

✉ e-mail: jigulina@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования:** улучшение параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигнала, в том числе между программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Такое улучшение параметров передачи сигнала с учетом влияния на них электрических и конструктивных параметров многослойных печатных плат (МПП) необходимо для повышения пропускной способности современных высоконадежных реконфигурируемых систем для обеспечения скорости передачи данных до десятков Гбит/с. Обеспечение таких высоких скоростей передачи данных становится возможным за счет использования более широкой полосы частот передаваемых сигналов. Одним из существующих подходов к решению такой задачи является увеличение «физической» частоты передаваемых информационных сигналов до 25-300 ГГц, что является достаточным для достижения требуемых скоростей.

**Методы.** В данной статье предложен метод оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала на базе определения таких стандартизированных методов анализа параметров передачи сигнала, как JCOM, S-параметров и BER, которые позволяют оценивать высокоскоростные линии передачи связи. Так, для оценки качества цифрового канала связи может использоваться параметр JCOM (the Channel Operating Margin (COM)/JCOM) – стандартизированный метод определения общего показателя качества канала. Для оценки затухания и потерь информационного сигнала в тракте, когда отраженные от неоднородностей копии сигнала воздействуют на оригинал и приводят к его искажению, используются известные методы оценки таких параметров передачи сигнала, как коэффициент отражения S11 и коэффициент ослабления S21 (S-Parameters). Моделирование такого параметра, как интенсивность битовых ошибок Bit Error Rate (BER) происходит согласно методике нормирования и контроля качества G.821/G.826/M2100.

**Результаты.** На основе оценки таких параметров передачи сигнала, как Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER) были выбраны основные метрики для оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала. Были получены численные оценки параметров передачи сигнала и оценено их влияние на конструктивные параметры высокоскоростных линий передачи сигнала. В частности, для скорости передачи данных менее 25 Гбит/с рекомендуется использовать не менее 1 переходного отверстия между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см<sup>2</sup> площади МПП. Рекомендуется использовать не менее 2-х переходных отверстий между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см<sup>2</sup> площади МПП, если высокоскоростная линия передачи сигнала проходит на расстоянии ближе 2,5 см от цепей питания в проекции на слой, где расположены цепи питания.

© Орда-Жигулина М. В., 2021

**Заключение.** В статье предложен метод расчета параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигналов на базе расчета параметров Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER). В рамках предложенного метода был проведен анализ параметров передачи сигнала, который показал, что при соблюдении «эталонных» значений электрических параметров линии наибольший вклад в искажение сигнала вносят переводные отверстия, затем слои, в которых расположена сигнальная линия, количество экранирующих полигонов между сигнальными слоями и слоями, в которых проходят цепи питания, конструктивные параметры переходных отверстий, а также длина и количество сегментов высокоскоростной линии. Были даны численные оценки минимального количества переходных отверстий и их диаметра, длины сегментов дифференциальных пар. Данные результаты могут быть использованы на этапе пред-проектного моделирования (pre-layout analysis) высокоскоростных линий передачи сигнала для вычислительных модулей высоконадежных реконфигурируемых систем.

**Ключевые слова:** системы сбора и обработки данных; высоконадежные реконфигурируемые системы; анализ целостности сигнала; высокоскоростные линии связи; МПП высоконадежных реконфигурируемых систем; BER; COM; S-параметры.

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, No.AAAA-A19-119011190173-6.

**Для цитирования:** Орда-Жигулина М. В. Оценка параметров высокоскоростных линий связи для высоконадежных реконфигурируемых систем на базе S-параметров и BER // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 168-180. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-168-180>.

Поступила в редакцию 14.08.2021

Подписана в печать 29.09.2021

Опубликована 21.10.2021

## Evaluation of High-Speed Link Parameters for Highly Reliable Reconfigurable Systems Based on S-Parameters and BER

Marina V. Orda-Zhigulina <sup>1,2</sup> ✉

<sup>1</sup> Southern Scientific Center of the RAS  
41 Chekhov ave., Rostov-on-Don 344006, Russian Federation

<sup>2</sup> Supercomputers and Neurocomputers Research Center  
106 Italian Lane, Taganrog 344006, Russian Federation

✉ e-mail: jigulina@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** is to improve signal transmission parameters in high-speed signal transmission lines, including between programmable logic integrated circuits (PLIC). This improvement in signal transmission parameters is necessary to increase throughput of modern highly reliable reconfigurable systems to ensure data transfer rate of up to tens of Gbit/s. It can be done considering the influence of electrical and structural parameters of multi-layer printed circuit boards (MPCB) on them. It is possible to provide such high data rates by using a wider frequency band of transmitted signals. One of the existing approaches to this problem is to increase "physical" frequency of transmitted information signals to 25-300 GHz, which is sufficient to achieve desired rates.

**Methods.** A method for estimating quality of high-speed signal transmission lines based on the definition of standardized methods for analyzing signal transmission parameters, such as JCOM, S-parameters and BER is proposed in the article. This method allows evaluating high-speed communication lines. Thus, the Channel Operating Margin (COM)/JCOM parameter can be used to estimate the quality of a digital communication channel - a standardized method for determining the overall channel quality indicator. Known methods are used to estimate such signal transmission parameters as S11 reflection coefficient and S21 attenuation coefficient (S-Parameters). These methods are used to estimate attenuation and loss of the information signal in the path, when copies of the signal reflected from inhomogeneities affect the original and lead to its distortion. Simulation of such parameter as Bit Error Rate (BER) is carried out according to G.821/G.826/M2100 rationing and quality control methodology.

**Results.** The main metrics were selected to evaluate the quality of high-speed signal transmission lines. It is based on the evaluation of such signal transmission parameters as Channel Operating Margin (COM), S-parameters and Bit Error Rate (BER). Numerical evaluations of signal transmission parameters were obtained and their effect on the design parameters of high-speed signal transmission lines was estimated. It is recommended to use at least 1 transition hole between screening polygons in GND separation layers every 0.5 cm or 0.25 cm<sup>2</sup> of WFP area. It is for a data rate of less than 25 Gbit/s, it is recommended to use at least 2 transition holes between screening polygons in GND separation layers every 0.5 cm or 0.25 cm<sup>2</sup> of PV area, if high-speed signal transmission line passes at a distance of closer than 2.5 cm from the power supply circuits in a projection on the layer where the power supply circuits are located.

**Conclusion.** A method for calculating signal transmission parameters on high-speed signaling lines based on the calculation of Channel Operating Margin (COM), S-parameters and Bit Error Rate (BER) parameters is introduced. As part of introduced method, an analysis of signal transmission parameters was carried out. This analysis shows that when the "reference" values of electrical parameters of the line are met, the transfer holes contribute most to the signal distortion; then the layers in which the signal line is located, the number of screening polygons between the signal layers and the layers; in which the power supply circuits, the design parameters of the transition holes, as well as the length and number of segments of the high-speed line pass. Numerical evaluations of minimum number of transition holes and their diameter, the length of segments of differential pairs are given. These results can be used in pre-layout analysis step of high-speed signal transmission lines for computational modules of highly reliable reconfigurable systems.

---

**Keywords:** data collection and processing systems; highly reliable reconfigurable systems; analysis of signal integrity; high-speed links; WFP highly reliable reconfigurable systems; BER; COM; S-Parameters.

**Conflict of interest.** The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The publication was prepared as part of GZ SSC RAS N GR project №AAAA-A19- 119011190173-6.

**For citation:** Orda-Zhigulina M. V. Evaluation of High-Speed Link Parameters for Highly Reliable Reconfigurable Systems Based on S-Parameters and BER. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 168-180 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-168-180>.

Received 14.08.2021

Accepted 29.09.2021

Published 21.10.2021

\*\*\*

## Введение

Оптимизация целостности сигнала в высокоскоростных линиях связи высоконадежных реконфигурируемых систем на основе анализа S-параметров необходима для улучшения параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи сигнала между про-

граммируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). Высокоскоростные линии передачи сигнала связывают между собой ПЛИС-передатчик и ПЛИС-приемник. При этом ПЛИС могут быть конструктивно расположены как на одной плате, так и на разных платах, входящих в один макет.

В настоящее время оценка достижимой скорости передачи данных возможна только после нескольких этапов макетирования и проверки передачи данных без ошибок на заданных скоростях. Макетирование стоит дорого, разработка топологии высокоскоростных линий передачи данных для каждого нового макета требует значительного времени.

Можно снизить себестоимость изготовления МПП за счет численного моделирования электрических параметров и параметров передачи сигнала высокоскоростных линий передачи сигнала на этапе предпроектного моделирования. Моделирование параметров может быть проведено с помощью современных технологий анализа целостности сигнала (signal integrity, channel operating margin и др.), в частности, с помощью методов и инструментов, реализованных в различных средах проектирования МПП [1-6].

При этом анализ промоделированных параметров позволяет заранее теоретически оценить максимальную обеспечиваемую скорость передачи данных еще на этапе разработки топологии МПП, до ее передачи в производство [1, 4, 6, 7-11]. Такой подход позволяет изготавливать меньшее число реальных макетов плат, которые ранее требовались для оценки максимально достижимой скорости передачи данных между вычислительными модулями ПЛИС.

## Постановка задачи

Был проведен выбор параметров (метрик) передачи высокоскоростного сигнала для оценки качества высокоскоростных линий передачи данных на требуемой скорости передачи данных. Так, анализ целостности сигналов (signal integrity) условно разделяют на 3 этапа – анализ кристалла ПЛИС, корпуса ПЛИС и анализ печатной платы (либо нескольких печатных плат, соединенных между собой). В рамках разработанной методики приводится только анализ высокоскоростных линий передачи данных МПП в рамках одной платы, как показано на рис. 1.

Предполагаем, что целостность сигнала в ПЛИС уже учтена в данных анализа в виде поведенческих моделей IBIS, разработанных производителем ПЛИС.

В процессе моделирования анализ целостности сигналов разделяется на предтопологический (pre-layout) и посттопологический (post-layout) анализ. Предтопологический анализ заключается в предварительном исследовании вновь разрабатываемых высокоскоростных линий передачи данных для проверки обеспечиваемой скорости передачи данных путем анализа электрических параметров и параметров передачи сигнала высокоскоростной линии передачи данных. Посттопологический анализ заключается в максимально полном исследовании уже разработанной высокоскоростной линии передачи данных с учетом ее реальной топологии. В рам-

ках данной методики моделирование параметров линии на этапе было проведено в рамках пост-топологического

анализа для получения численных значений «эталонных» параметров передачи сигнала.



**Рис. 1.** Структурная схема расположения исследуемых высокочастотных линий передачи сигнала

**Fig. 1.** Block diagram of the investigated high-frequency signal transmission lines

Для моделирования параметров использовались методы оценки целостности сигнала (signal integrity) и метод channel operating margin [8]. Каждая высокоскоростная линия передачи данных может быть представлена как набор стандартных конструктивных элементов и представляет собой несимметричный полосковый волновод<sup>1</sup> [12-16]. Конструктивно линия начинается от капли припоя на выходе ПЛИС-передатчика и заканчивается на капле припоя на входе ПЛИС-приемника.

Высокоскоростная линия передачи данных конструктивно включает в себя места соединения ПЛИС с проводниками на верхнем сигнальном слое, сегменты проводников на внутренних сиг-

нальных слоях, переходные отверстия между сигнальными слоями, места соединения сегментов проводников с конденсаторами и т.д. Для определения числовых «эталонных» значений параметров нужно рассматривать высокоскоростную линию передачи данных (дифференциальную пару) в пределах одной платы.

Высокоскоростная линия передачи данных при этом включает в себя различные конструктивные элементы. Конструктивные элементы линии влияют на ее электрические параметры и на параметры передачи сигнала (в том числе, S-параметры) [7, 11]. Поэтому, при разработке топологии высокоскоростной линии необходимо контролировать все эти параметры.

Основным электрическим параметром, который контролируется в рамках стандартного метода разработки топологии, является волновое сопротивление  $Z_0$ .

<sup>1</sup> Онучин М. Я. Анализ и параметрический синтез приемных трактов устройств передачи данных в распределительных информационно-вычислительных сетях: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 1994.

На этапе пост-проектного моделирования в уже изготовленном макете измеряется значение BER и из тех линий, которые передают сигнал без ошибок определяются «эталонные» высокоскоростные линии передачи данных, то есть те линии, которые позволяют передавать сигнал на заданной скорости передачи данных наилучшим образом. Такие линии должны обладать максимальной полосой пропускания и пропускной способностью, минимальным затуханием, максимальной равномерностью амплитудно-частотной характеристики при заданной пропускной способности (скорости передачи данных). Для таких «эталонных» высокоскоростных линий передачи сигнала моделируются численные значения их «эталонных» параметров.

В дальнейшем, на этапе предпроектного моделирования новых макетов, полученные «эталонные» значения параметров передачи высокоскоростного сигнала и топологию таких линий можно использовать как шаблон для вновь разрабатываемых макетов с целью обеспечения требуемых скоростей передачи данных. Если параметры вновь разработанной линии будут соответствовать «эталонным» значениям, то можно считать, что разработанная линия обеспечивает требуемую скорость передачи данных и макет можно отдавать на изготовление.

Если параметры вновь разработанных высокочастотных линий передачи

данных не будут соответствовать «эталонным» значениям, то необходимо доработать топологию МПП и использовать более качественные электронные компоненты (материал для изготовления МПП). После доработки нужно вновь провести моделирование параметров. Если доработанные параметры будут соответствовать «эталонным», то макет можно отдавать на изготовление.

### Материалы и методы

В данной статье предложен метод оценки качества высокоскоростных линий передачи сигнала на базе определения параметров передачи сигнала, которые характеризуют высокоскоростные линии передачи связи. Для определения скорости передачи данных, которую должна обеспечить каждая вновь разрабатываемая высокоскоростная линия передачи данных, недостаточно контроля одних только электрических параметров. Также при разработке высокоскоростной линии передачи сигнала необходимо контролировать значения параметров передачи высокоскоростных сигналов.

В этом случае электрический сигнал, вышедший из передатчика, распространяющийся в линии передачи, должен быть правильно распознан на входе приемника. Форма, уровни напряжений и временные параметры сигнала должны точно соответствовать стандарту сигнала, например NRZ (non return to zero). Задача сохранения целостности сигнала в линии передачи и предполагает сохранение его первоначальной фор-

мы, которую линия передачи или внешние воздействия могут лишь изменить, нарушив первоначальную целостность.

Линия передачи, в общем случае - это среда распространения. В линию передачи сигнала входят все элементы между выходом передатчика и входом приемника. А именно, проводники печатных плат, соединительные провода между печатной платой и блочными соединителями, контакты соединителей, как межплатных, так и приборных, электрические компоненты. Для получения однородной линии передачи (именно в ней сигнал будет распространяться на максимальные расстояния без отражений) в каждом месте соединения указанных элементов необходимо согласование волнового сопротивления.

Волновое сопротивление линии передачи для одиночных линий должно иметь стандартное значение 50 Ом. Для дифференциальных линий передачи значение дифференциального волнового сопротивления должно равняться 100 Ом. Важно, чтобы на всем протяжении линии передачи волновое сопротивление резко не изменялось.

При резком изменении волнового сопротивления возникают неоднородности, которые являются причиной отражений. Отраженные от неоднородностей копии сигнала воздействуют на оригинал и приводят к его искажению. Для оценки степени отражения используют оценку такого параметра передачи сигнала, как коэффициент отражения  $S_{11}$ . Коэффициент отражения показы-

вает, какая часть энергии сигнала отразилась от неоднородности, исходя из различий сопротивлений в месте неоднородности.

Если получен минимальный коэффициент отражения, то второе, что требуется для сохранения целостности сигнала, это обеспечить такую амплитудно-частотную характеристику линии передачи, которая позволит передать все значимые составляющие спектра сигнала. Это либо первые пять гармоник, либо полоса частот, определяемая скоростью нарастания фронта/спада импульса. Если частотная характеристика линии передачи не имеет провалов, спада в области как нижних, так и верхних частот, резонансных подъемов и локальных всплесков, все составляющие спектра сигнала будут переданы без искажений и форма сигнала не будет нарушена. Фронт и спад останутся монотонными, а площадка импульса – ровной. Оценить равномерность частотной характеристики можно с помощью коэффициента ослабления  $S_{21}$ .

Если частотная характеристика линии передачи равномерна, остается решить третью задачу. Минимизировать затухание сигнала, влияние внешних сигналов, перекрестных искажений, шумов питания и земли.

Таким образом, целостность сигнала на входе приемника будет сохранена при заданной скорости передачи данных в случае выполнения трех условий: минимальный коэффициент отражения, равномерность частотной характери-

ки высокоскоростной линии передачи сигнала в заданной полосе частот и минимальное затухание сигнала при минимизации влияния внешних сигналов, перекрестных искажений, шумов питания и земли.

Перечень контролируемых основных метрик (параметров) передачи сигнала для анализа качества высокоскоростной линии передачи данных будет следующим: S-параметры (S-parameters) [17], которые затем должны быть сопоставлены с такими параметрами передачи сигнала, как Signal to noise ratio (SNR) и Bit Error Rat [7, 12].

Связь между максимально возможной пропускной способностью линии  $F$  (ГГц) и ее полосой пропускания  $C$  (Гбит/сек) может быть определена по соотношению Найквиста:

$$F = \frac{C}{2} \cdot \log_2 M,$$

где  $M$  – количество различных состояний информационного параметра (для формата кода низкого уровня, который соответствует двухуровневому коду NRZ (Non Return to Zero)  $M=2$ ;  $C$  – максимальная пропускная способность линии (скорость передачи данных) в битах в секунду;  $F$  – ширина полосы пропускания линии в герцах.

Для оценки того, достижима ли заданная скорость передачи данных  $C$  (Гбит/сек) необходимо проводить анализ параметров передачи высокоскоростного сигнала МПП в частотной полосе  $F$  линии (ГГц), равной двум интер-

валам Найквиста, то есть прием  $F$  линии  $\sim C$ .

Пропускная способность линии  $F$ , и, соответственно, достижимая скорость передачи данных  $C$ , зависит от конструктивных параметров линии и от ее протяженности, а также от параметров ПЛИС и электронных компонентов, входящих в линию.

Считаем, что вновь разрабатываемая высокоскоростная линия передачи данных обеспечивает заданную скорость передачи данных только в случае, если достигнуты требуемые значения ее полосы пропускания  $F$  и пропускной способности  $C$ .

Требуемое значение полосы пропускания высокоскоростной линии передачи сигнала (transmitting capacity)  $C$  считается достигнутым, если значения S-параметров и других параметров передачи сигнала для каждой высокоскоростной линии передачи сигнала соответствуют их численным «эталонным» значениям на заданной скорости передачи данных. В рамках данной статьи будут найдены численные значения параметров передачи сигнала для скоростей передачи данных 25 Гбит/с.

## Результаты и их обсуждение

Расчет числовых значений «эталонных» параметров передачи сигнала

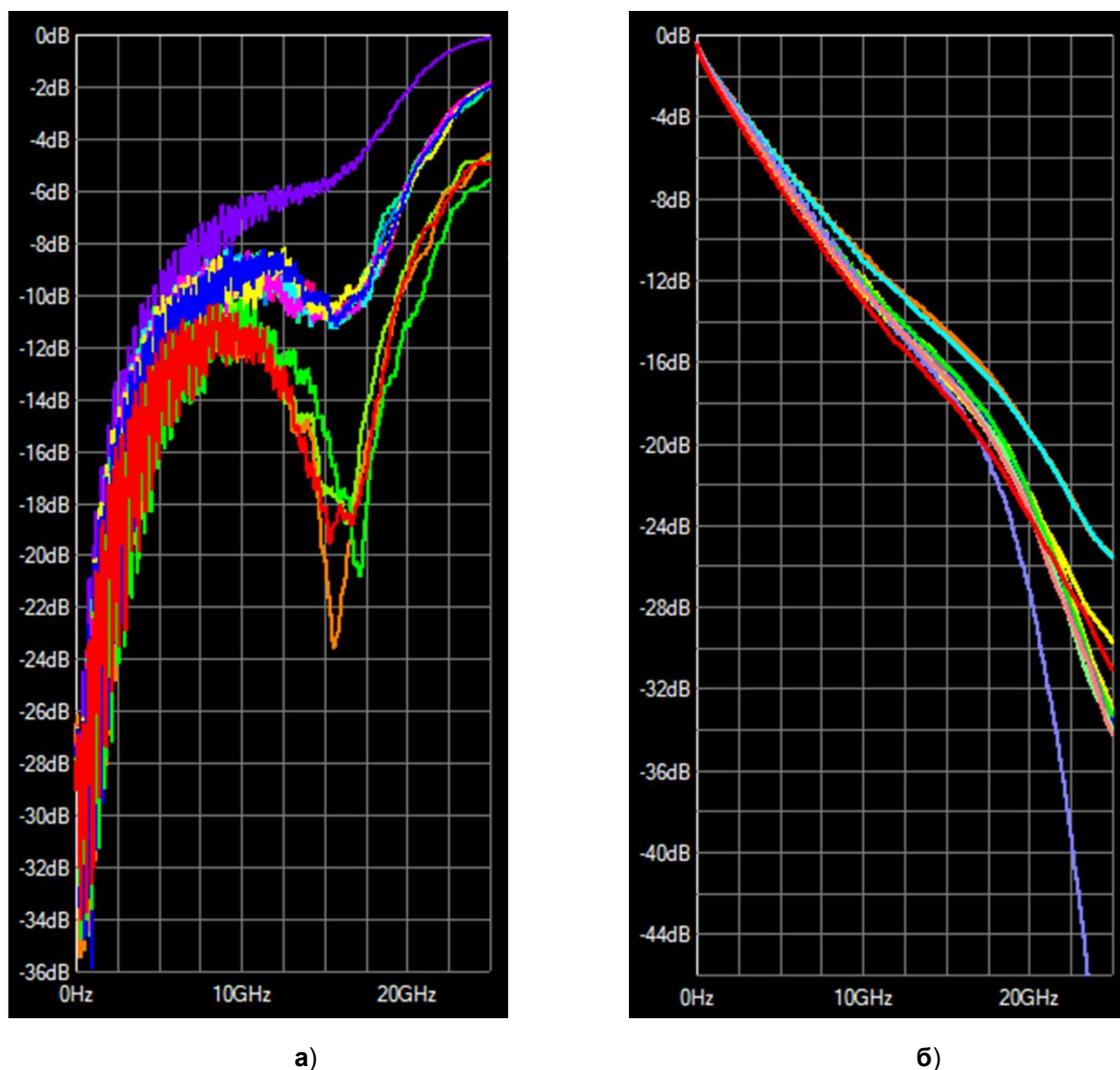
Были проанализированы 12 высокоскоростных линий передачи сигнала, соединяющие две ПЛИС внутри одной

изготовленной платы. При анализе были исключены линии, которые обладали значениями параметров, более, чем на 20% отличающимися от медианных значений. Согласно данным реальных измерений и численного моделирования методами, предлагаемыми в одной из САПР, эти линии устойчиво работают на скоростях до 25 Гбит/сек включительно.

В результате проведенного моделирования и анализа были получены

численные «эталонные» диапазоны значений S-параметров передачи сигнала, при которых данная дифференциальная линия обеспечивает скорость передачи данных не менее 25 Гбит/с. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Также полученные значения S-параметров были сопоставлены с такими параметрами, как отношение сигнал-шум и «глазовой» диаграммой, а также реально измеренными значениями BER.



**Рис. 2.** Результаты расчета S-параметров: **а** – S11, **б** – S21

**Fig. 2.** Results of S-parameters calculations: **a** – S11, **b** – S21

Полученные числовые значения «эталонных» параметров могут применяться для оценки высокоскоростных линий передачи сигнала, как для одиночных плат, так и для нескольких плат, объединенных в единый блок на скорости передачи данных не более 25 Гбит/с.

Расчет числовых значений «эталонных» параметров передачи сигнала

Моделирование осуществлялось с помощью инструмента SerDes Batch simulation. Численные значения «эталон-

ных» параметров были рассчитаны для скорости передачи данных 25 Гбит/с, для случая, когда данные передаются устойчиво и без ошибок между двумя ПЛИС в рамках одной платы.

При несоответствии значений метрик и конструктивных параметров их «эталонным» значениям схема и(или) топология линии должна быть изменена таким образом, чтобы значения электрических, конструктивных и параметров передачи сигнала в линии начали соответствовать «эталонным» значениям.

**Таблица 1.** Значения метрик (параметров) передачи сигнала для анализа высокоскоростной линии передачи данных

**Table 1.** Values of signal transmission metrics (parameters) for analysis of high-speed data transmission line

N параметра / Parameter N	Название параметра / Parameter name	Пропускная способность / Bandwidth	Полоса пропускания / Frequency	Значение параметра / Parameter value
1	JCOM	25 Гбит/с	0 – 25 ГГц	более 1,35 дБ
2	S11	25 Гбит/с	0 – 12,5 ГГц	лучше (отражение менее) минус 8 дБ
			0 – 25 ГГц	лучше (отражение менее) минус 2дБ
3	S21	25 Гбит/с	0 – 12,5 ГГц	от 0 до - 16 дБ
			0 – 25 ГГц	от 0 до - 35 дБ
4	BER	25 Гбит/с	0 – 25 ГГц	BER E10-9 Time, UI - не менее 0.27, Voltage, V - не менее 0.015

## Выводы

По результатам проведенных исследований был предложен метод расчета параметров передачи сигнала в высокоскоростных линиях передачи

сигналов. Метод разработан в рамках анализа целостности сигнала на базе расчета параметров Channel Operating Margin (COM), S-параметров и Bit Error Rate (BER).

Как показали исследования, при соблюдении «эталонных» значений электрических параметров линии наибольший вклад в искажение сигнала вносят переводные отверстия, затем слои, в которых расположена сигнальная линия, количество экранирующих полигонов между сигнальными слоями и слоями, в которых проходят цепи питания, конструктивные параметры переходных отверстий, а также длина и количество сегментов высокоскоростной линии.

Следовательно, при проектировании МПП необходимо обеспечить минимальное количество переходных отверстий и их диаметр, а длину проводников необходимо делать максимально

короткой и с минимальным количеством сегментов.

Также для скорости передачи данных менее 25 Гбит/с рекомендуется использовать не менее 1 переходного отверстия между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см<sup>2</sup> площади МПП. Рекомендуется использовать не менее 2-х переходных отверстий между экранирующими полигонами в GND-разделительных слоях через каждые 0,5 см или на 0,25 см<sup>2</sup> площади МПП, если высокоскоростная линия передачи сигнала проходит на расстоянии ближе 2,5 см от цепей питания в проекции на слой, где расположены цепи питания.

### Список литературы

1. Time-Domain Channel Specification: Proposal for Backplane Channel Characteristic Sections / R. Mellitz, C. Moore, M. Dudek, M. Li, A. Ran // Meeting, San Diego, CA, 2012.
2. Common Electrical I/O (CEI) – Electrical and Jitter Interoperability agreements for 6G+ bps, 11G+ bps and 25G+ bps I/O, OIF-CEI-03.1.
3. Mellitz R., Intel, Various Topics for Computing Channel Operating Margin (COM), 2014.
4. Stephan H., Howard L., Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs, 2009.
5. Brown M. et. al. The state of IEEE 802.3bj 100 Gb/s Backplane Ethernet, DesignCon, 2014.
6. Суанов Т. А. Моделирование высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 11 (148). P. 186-194.
7. Описание программного обеспечения для электродинамического 3D моделирования Ansys HFSS. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (дата обращения: 10.12.2019)

8. Horn A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1-50 GHz // Rogers Corporation Technical Report 5788. 2003.
9. Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region / E. Liew [et al.] // Association Connecting Electronics Industries, IPC APEX EXPO, 2014: New Ideas... For New Horizons, Las Vegas. 2014.
10. Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band. / A. Artemenko [et al.] // Proceedings of 41st European Microwave Conference (EuMC), Manchester, UK. 2011. P. 838-841. [https:// doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966](https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966)
11. Трифоненко И. М. и др. Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 2012. Т. 1. С. 396-399.
12. Simulation Model to Predict BER Based on S-Parameters of High-Speed Interconnects / L. Pizano-Escalante, O. Longoria-Gandara, R. Parra-Michel, F. Peña-Campos // IEEE Design & Test. 2012. Vol. 36. P. 31-39.
13. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications / O. Soykin [et al.] // Proceedings of 46th European Microwave Conference (EuMC). 2016. P. 1-4.
14. Wideband Probe-Type Waveguide-To-Microstrip Transition for 28 GHz Applications / A. Mozharovskiy [et al.] // 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain. 2018. P. 113-116.
15. Top-Layer Wideband Transition from Waveguide to Planar Differential Line for 60 GHz Applications / S. Churkin [et al.] // 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain. 2018. P. 663-666.
16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. Vol. 26, Iss. 11. P. 897-899. [https:// doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973](https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973)
17. Antonini G., Scogna A., Orlandi A. S-parameters characterization of through, blind, and buried via holes // IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003. Vol. 2. P. 174–184.

## References

1. Mellitz R., Moore C., Dudek M., Li M., Ran A., Time-Domain Channel Specification: Proposal for Backplane Channel Characteristic Sections July 2012 Meeting, San Diego, CA, 2012.
2. Common Electrical I/O (CEI) – Electrical and Jitter Interoperability agreements for 6G+ bps, 11G+ bps and 25G+ bps I/O, OIF-CEI-03.1.
3. Mellitz R., Intel, Various Topics for Computing Channel Operating Margin (COM), 2014.

4. Stephan H., Howard L., *Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs*, 2009.
5. Brown M. et.al. The state of IEEE 802.3bj 100 Gb/s Backplane Ethernet, *DesignCon*, 2014.
6. Suanov T. Modelirovanie vysokoskorostnykh linii peredachi v mnogosloinykh pechatnykh platakh [Modeling of high-speed transmission lines in multilayer printed circuit boards]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of the Southern Federal University. Technical science*, 2013, vol.11(148), pp. 186-194.
7. *Opisanie programmnoho obespecheniya dlya elektrodinamicheskogo 3D modelirovaniya Ansys HFSS* [Description of software for electrodynamic 3D modeling Ansys HFSS]. Available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (accessed 10.12.2019)
8. Horn, A. Dielectric constant and loss of selected grades of Rogers high frequency circuit substrates from 1-50 GHz. Rogers Corporation Technical Report 5788. 2003
9. Liew E. [et al.] Signal transmission loss due to copper surface roughness in high-frequency region. *Association Connecting Electronics Industries, IPC APEX EXPO*, 2014: New Ideas... For New Horizons, Las Vegas, 2014.
10. Artemenko A. [et al.] Design of wideband waveguide to microstrip transition for 60 GHz frequency band. *Proceedings of 41st European Microwave Conference (EuMC)*, Manchester, UK, 2011, pp. 838-841. <https://doi.org/10.23919/EuMC.2011.6101966>
11. Trifonenko I et al. Obzor sistem skvoznogo proektirovaniya pechatnykh plat radioelektronnykh sredstv [Review of systems for end-to-end design of printed circuit boards of radioelectronic facilities]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. Penza, 2012, vol. 2, pp. 396-399. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sistem-skvoznogo-proektirovaniya-pe-chatnyh-plat- \radioelektronnyh-sredstv>
12. Pizano-Escalante L., Longoria-Gandara O., Parra-Michel R., Peña-Campos F., Simulation Model to Predict BER Based on S-Parameters of High-Speed Interconnects. *IEEE Design & Test*, 2012, vol. 36, pp. 31-39.
13. Soykin O. [et al.]. Wideband Probe-Type Waveguide-to-Microstrip Transition for V-band Applications. *Proceedings of 46th European Microwave Conference (EuMC)*, 2016, pp. 1-4.
14. Mozharovskiy A. [et al.]. Wideband Probe-Type Waveguide-To-Microstrip Transition for 28 GHz Applications. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, Spain, 2018, pp. 113-116.
15. Churkin S. [et al.]. Top-Layer Wideband Transition from Waveguide to Planar Differential Line for 60 GHz Applications. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, Spain, 2018, pp. 663-666.

16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, Iss. 11, pp. 897-899. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2614973>

17. Antonini G., Scogna A., Orlandi A. S-parameters characterization of through, blind, and buried via holes. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, vol. 2, pp. 174–184.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Орда-Жигулина Марина Владимировна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ООО «Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: [jigulina@mail.ru](mailto:jigulina@mail.ru)

**Marina V. Orda-Zhigulina**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Researcher, Supercomputers and Neurocomputers, Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don, Russian Federation, Supercomputers and Neurocomputers Research Center, Taganrog, Russian Federation e-mail: [jigulina@mail.ru](mailto:jigulina@mail.ru)