

系统链路 Skew 仿真分析与优化

[于海丹, 谢智芬, 李琴, 林晶]

[中兴通讯股份有限公司, 518000]

[摘要] 差分对内 Skew 直接影响了通道插损和模式转换等, 尤其针对 25Gbps 以上速率, Skew 是关乎通道误码率的重要因素, 其要求更加严苛。在高速背板系统设计中, PCB 旋转角度、走线方式以及连接器等都影响了 Skew 大小, 如果依靠测试来分析多因素的影响将会浪费很多时间和人力。所以本文考虑到 PCB 旋转角度对 Skew 的影响, 在 ANSYS HFSS 中建立了 PCB 玻纤简化模型, 分析了不同旋转角度、走线位置、PP 和 Core 相对位置等对于 Skew 影响。同时, 也对差分线对内补偿方式进行了分析, 仿真了圆弧拐角和 45°拐角对于最后 Skew 大小的影响, 给出建议方案。本文依靠 ANSYS HFSS 仿真可以给高速系统全链路设计提供参考, 最后达到缩短产品性能优化时间, 提高产品 SI 性能优势的目的。

[关键词] ANSYS HFSS、Skew、玻纤效应、走线方式

Simulation Analysis and Optimization on Channel Skew

[Haidan Yu, Zhifen Xie, Qin Li, Jing Lin]

[ZTE Corporation, 518000]

[Abstract] Skew in differential stripline has a direct impact on channel insertion loss and mode conversion. Especially for 25Gbps and beyond, Skew plays an ever increasing role in BER impairment and its requirements are more stringent. In high-speed backplane system, PCB rotation angle, routing form and connector all affect Skew. It will waste a lot of time and manpower if we depend on the test to analyze the influence on Skew from many factors. Therefore, considering the impact of PCB rotation angle on Skew, this paper establishes a simplified model of PCB glass fiber in ANSYS HFSS, and analyzes the influence of different rotation angles, routing positions and PP/Core relative positions. Then the compensation form of differential stripline is proposed, and the effect on Skew of arc corner and 45°corner is simulated and analyzed. Based on the simulation of ANSYS HFSS, this paper provides reference for link design of high-speed system, shortens the time of optimization and enhances SI performance.

[Keyword] ANSYS HFSS, Skew, Fiber Weave Effect, Routing Form

1 前言

针对通信产品 25Gbps 以上速率，尤其 112Gbps 高速率应用场景，其符号间隔只有 18ps/UI，链路中各节点的偏斜失真 Skew 需要严格控制，从而减少对模式转换、损耗、串扰等多方面影响。在链路各节点中，Skew 来源于以下几个方面：差分线对内走线不等长、走线补偿方式、玻纤效应、连接器和 Footprint 设计等，其中走线由于玻纤效应和走线方式的影响所带来的 Skew 是占比最大的[1]。

近年来国内外厂家对于玻纤效应影响信号质量的研究逐渐重视，为了减小玻纤效应对信号质量的影响，电子工业界中普遍的应对方法是旋转走线与玻纤编织方向的角度、选用扁平玻纤布或者 NE-玻纤布、叠层选用 2 张玻纤布组合、Zig-Zag 布线方式[2]等，但是以上方法都是和产品成本息息相关。

Skew 由于走线位置的随机性和等长补偿方式的多样性，如果依靠传统的测试手段，需要大量的测试时间和人力成本。所以本文依据 ANSYS HFSS 建立了 PCB 玻纤简化模型，分析了不同旋转角度、走线位置、PP 和 Core 相对位置等对于 Skew 的影响，也分析了走线补偿方式对无源性能的影响。通过以上仿真评估方法，可以快速地选择 PCB 产品相关走线设计方案，达到产品应用中性能和成本的权衡。

2 Skew 分析与计算

Skew 即是差分对中 P 和 N 的延时差，如图显示了一对差分信号落在玻纤布的不同位置，由于信号传输速度与介质层介电常数的平方根成反比，当差分信号传输在不均匀介质上时，两根差分信号线间会产生不同的信号延迟，从而导致信号偏斜失真 Skew。

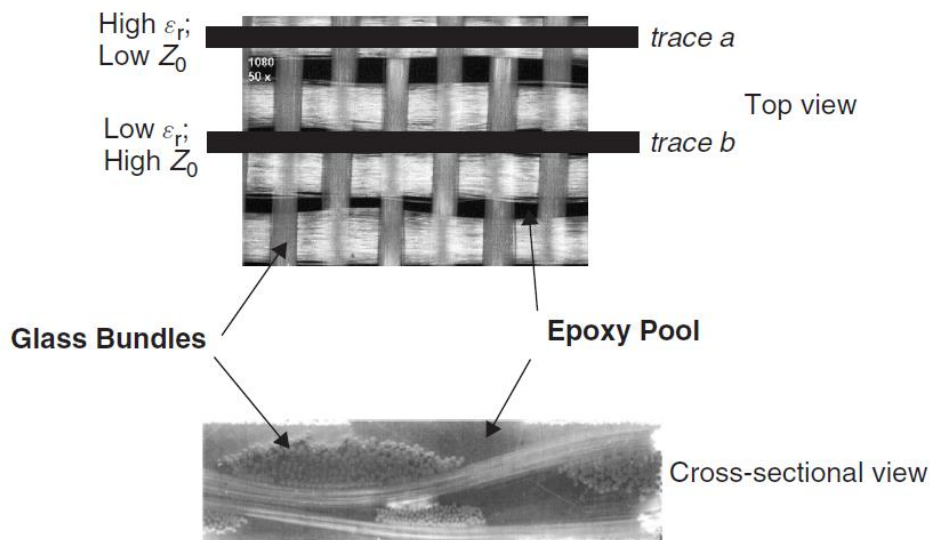


图 1 玻璃纤维上的差分线[3]

我们将传输线向前传输的传递函数设为 $H(f)$ ，则可以用如下式 1 表示。

$$H(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)} \quad \text{式 (1)}$$

其中， $|H(f)|$ 表示幅度， $\theta(f)$ 为相位响应。Skew 可直接由相位响应计算得到：

$$Skew(f) = t_{pd1} - t_{pd2} = \frac{\Delta\theta(f)}{2\pi f} \quad \text{式 (2)}$$

文档[4, 5]中提到 Skew 评估中必须考虑对内差分的耦合，Skew 应该通过差分输入到单端输出的 S 参数获取。

4 端口系统中修正后的混合 S 参数的数学表达式如下：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S1d1 & S1d2 & S1c1 & S1c2 \\ S2d1 & S2d2 & S2c1 & S2c2 \\ S3d1 & S3d2 & S3c1 & S3c2 \\ S4d1 & S4d2 & S4c1 & S4c2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{dm1} \\ a_{dm2} \\ a_{cm1} \\ a_{cm2} \end{bmatrix} \quad \text{式 (3)}$$

其中， a_{dm1} , a_{dm2} 为差模输入波， a_{cm1} , a_{cm2} 为共模输入波， b_1, b_2, b_3, b_4 为每个单端端口的输出波。 $Sidj$ 、 $Sicj$ 是端口 j 输入的差分波（差模或共模）和接收端（单端）端口 i 散射波之间的关系。由此得到：

$$S2d1 = 1/\sqrt{2}(Sdd21 + Scd21) = 1/\sqrt{2}(S21 - S23) \quad \text{式 (4)}$$

$$S4d1 = 1/\sqrt{2}(Sdd21 - Scd21) = 1/\sqrt{2}(S43 - S41) \quad \text{式 (5)}$$

Skew 可通过由两个相位延迟的差异来计算得到：

$$\Delta t_1 = -\text{unwrap}(\text{phase}(S2d1))/(2\pi f) \quad \text{式 (1)}$$

$$\Delta t_2 = -\text{unwrap}(\text{phase}(S4d1))/(2\pi f) \quad \text{式 (2)}$$

$$Skew = \Delta t_2 - \Delta t_1 \quad \text{式 (3)}$$

3 PCB 玻纤效应建模与仿真

3.1 仿真模型

本文针对某材料 2116 玻璃布进行建模，相关玻璃布 window size 和 bundle size 如图 2 和表 1 所示。

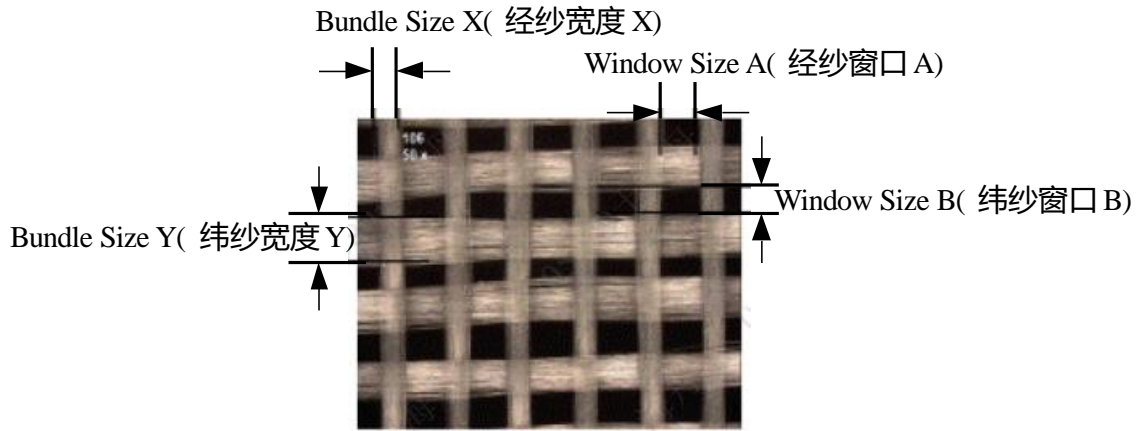


图 2 玻璃布尺寸示意图

表 1 某材料玻璃布经纱、纬纱宽度和窗口尺寸

尺寸类型	经纱宽度 X	纬纱宽度 Y	经纱窗口 A	纬纱窗口 B
单位/ μm	377	396	46	57

根据如上尺寸在 ANSYS HFSS 建立如下 L mil 走线长度的差分线、玻璃布和树脂模型，如图 3 所示，此模型走线是沿着经向方向。L mil 的大小直接影响了仿真时间，这里边设定约为经向 $\text{pitch}/\sin(\text{旋转角度}) \times N$ ，之后再等比例折算到 10inch 的 Skew 值。

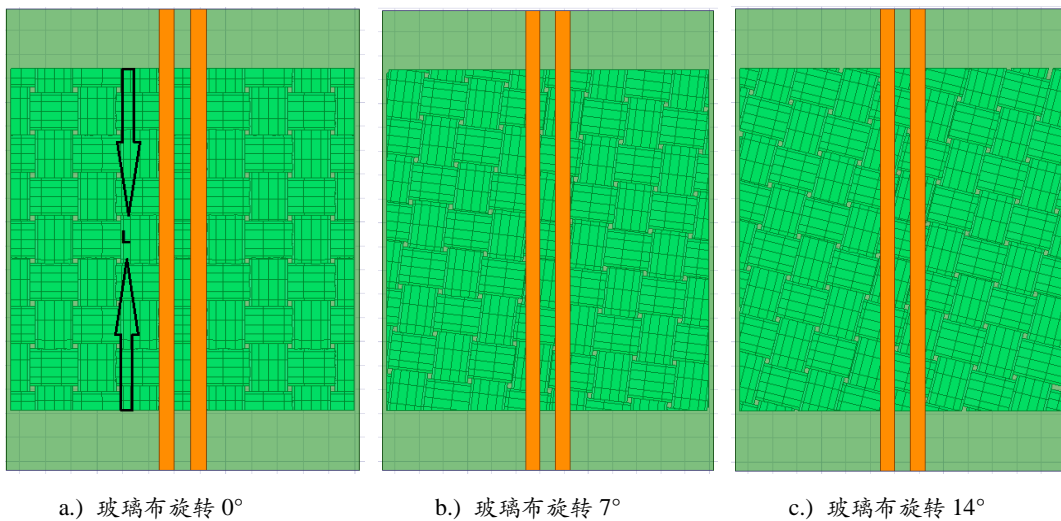


图 3 玻纤效应仿真模型

3.2 各旋转角度下，走线位置与 Skew 关系

仿真 3.1 章节中图 3 的玻纤仿真模型，走线从左侧-20mil 沿纬向方向偏移到右侧 20mil，得到在 0°、7°、14°三种角度下 Skew 随着走线位置的规律，其中考虑到仿真模型的误差，将玻璃布和树脂介电常数 DK 相同情况下得到的 Skew 结果作为误差项 Skew_error，用实际

的玻璃布和树脂 DK 仿真得到的 $Skew$ 减去误差项 $Skew_error$ ，即得到最终的 $Skew_final$ 。如图 4 所示，可以看到随着走线位置的变化， $Skew$ 呈现规律性变化，并且 $Skew$ 幅值随着玻璃布旋转角度增加，也从 0° 的 17ps 左右降低到 7° 和 14° 的 1ps 左右。

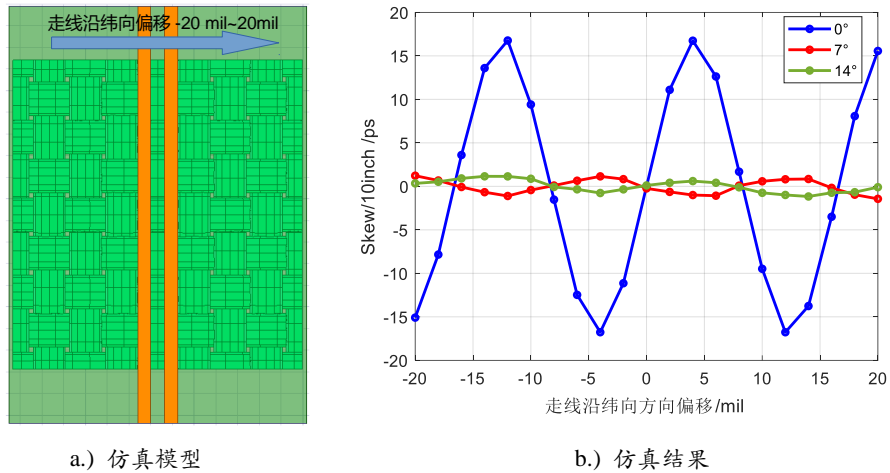


图 4 0° 、 7° 、 14° 三种角度下 $Skew$ 随着走线位置变化规律

3.3 经向走线和纬向走线的 $Skew$ 差异

由于经纱窗口和纬纱窗口大小的差异，经向走线和纬向走线 $Skew$ 也存在一定的差别。本文针对 0° 旋转角度下，经向走线和纬向走线的 $Skew$ 随着走线位置变化规律进行了对比，如图 5 所示。可以看到针对图 2 中的玻璃布，经向走线和纬向走线在 $Skew$ 的最大值上差了 3ps 左右。

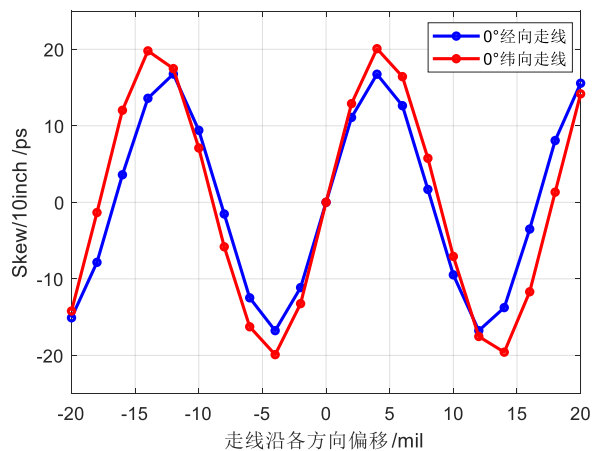
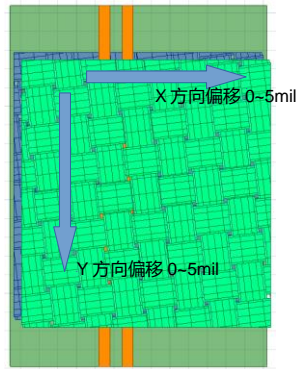


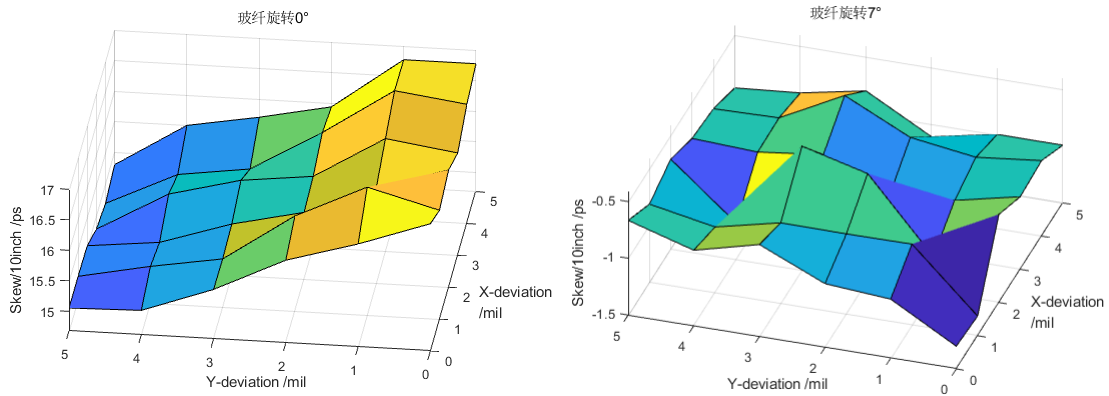
图 5 经纱走线和纬向走线的 $Skew$ 随着走线位置变化规律

3.4 PP 和 CORE 相对位置对 $Skew$ 影响

在 3.2~3.3 的仿真中，PP 和 Core 相对位置没有变化，但是在实际的玻璃布中，PP 和 Core 会有一些的相对位置变化，为了模拟此差异，本文固定走线位置，将 PP 和 Core 在 xy 方向进行了相对位移变化，建立如图 6 中的仿真模型。



a.) 仿真模型



b.) 仿真结果

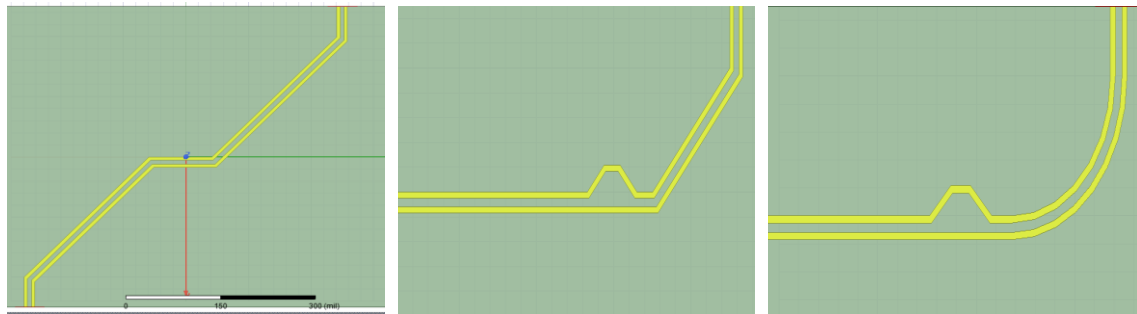
图 6 Skew 随着 PP 和 Core 相对位移变化规律

可以看到随着 PP 和 Core 相对位移变化，在 0° 旋转角度下 Skew 存在着 $[-1\text{ps}, 1\text{ps}]$ 的变化，在 7° 旋转角度下 Skew 存在着 $[-0.5\text{ps}, 0.5\text{ps}]$ 的变化。

4 PCB 走线等长补偿方式仿真与对比

4.1 仿真模型

目前 PCB 出线的走线方式如图 7 所示，分别有走线反向补偿、 45° 拐角+梯形补偿、圆弧拐角+梯形补偿三种，三种走线长度相等且差分线对内等长，本文主要对比分析三种走线在插损、回损、模式转换和阻抗方面的差异。



a.) 反向补偿走线

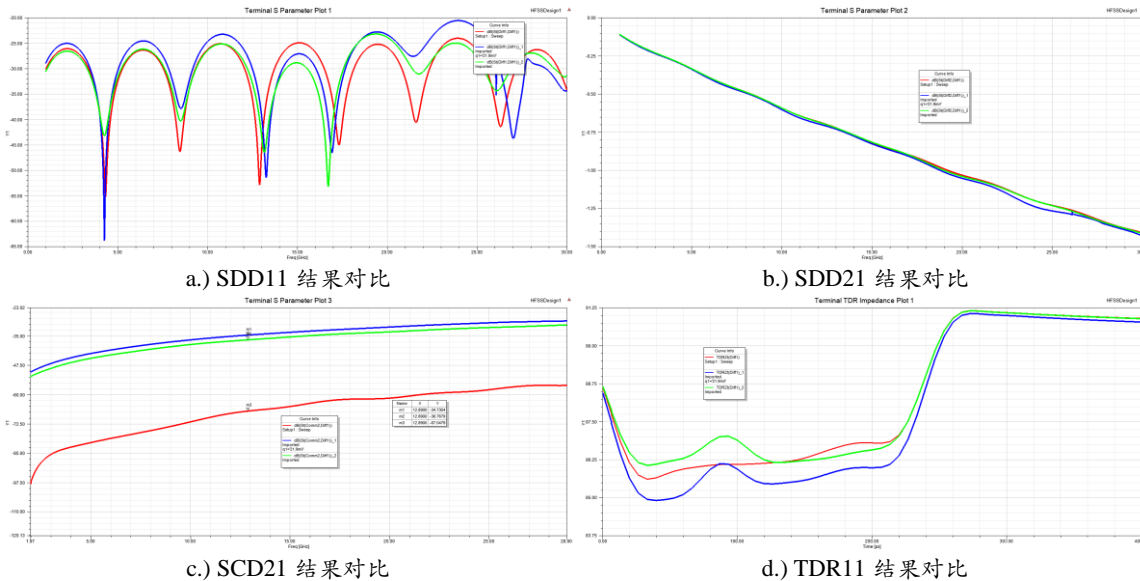
b.) 45°拐角+梯形补偿走线

c.) 圆弧拐角+梯形补偿走线

图 7 PCB 走线对内等长补偿方式仿真模型

4.2 走线等长补偿方式对比

在 ANSYS HFSS 中对 4.1 中的三种补偿方式走线进行建模仿真，仿真结果如图 8 所示。其中红色曲线代表反向补偿走线，蓝色曲线代表 45°拐角+梯形补偿走线，绿色曲线代表圆弧拐角+梯形补偿走线。



a.) SDD11 结果对比

b.) SDD21 结果对比

c.) SCD21 结果对比

d.) TDR11 结果对比

图 8 走线等长补偿方式仿真结果

回损上，45°拐角+梯形补偿走线劣于圆弧拐角+梯形补偿走线，阻抗上，45°拐角+梯形补偿走线和圆弧拐角+梯形补偿走线都会出现 1ohm 抬升的阻抗凸包。插损上，三种走线方式差别不大。三种补偿方式的 Skew 分别为 0.002ps、0.48ps、0.39ps/0.76inch，在模式转换 SCD21 上，也可以看到 45°拐角+梯形补偿走线和圆弧拐角+梯形补偿走线明显劣于反向补偿方式。综上分析，反向补偿方式走线是首选方案，45°拐角+梯形补偿走线和圆弧拐角+梯形补偿走线性能差别不大，圆弧拐角+梯形补偿走线略有优势。

5 结论

本文利用 ANSYS HFSS 对某材料 2116 玻璃布建立了 PCB 玻纤简化模型，仿真发现，Skew 幅值随着玻璃布旋转角度增加，从 0°的 17ps 左右降低到 7°和 14°的 1ps 左右；0°旋转角度下，经纱走线和纬纱走线在 Skew 的最大值上差了 3ps 左右；随着 PP 和 Core 相对位移变化，在 0°旋转角度下 Skew 存在着[-1ps, 1ps]的波动，在 7°旋转角度下 Skew 存在着[-0.5ps, 0.5ps]的波动。

同时本文也利用 ANSYS HFSS 对 PCB 走线对内等长补偿方式进行了仿真分析，仿真分析得到反向补偿方式走线性能最佳，45°拐角+梯形补偿走线和圆弧拐角+梯形补偿走线性能差别不大，圆弧拐角+梯形补偿走线略有优势。

利用 ANSYS HFSS 仿真工具，减少了产品性能优化时间，节约了人力和时间成本等，达到了系统链路 Skew 分析与优化的目的。

[参考文献]

- [1] Syed. A. Bokhari, “On the Minimization of PCB Differential Pair Skew Or Its Effect”, DesignCon 2019.
- [2] Altera Corporation, “PCB Dielectric Material Selection and Fiber Weave Effect on High-Speed Channel Routing”, AN-528-1.1.
- [3] STEPHEN H. HALL, HOWARD L. HECK, “Advanced Signal Integrity For High-Speed Digital Designs”, 2009: 275.
- [4] Hansel Dsilva, Se-Jung Moon, Amos Zhang, Chien-Ping Kao, Brent Rothermel, “Mathematically De-mystifying Skew Impacts on 50G SERDES Links”, DesignCon 2017.
- [5] Zhongmin Wei, Bi Yi, Rongxin Ban, Zachary Su, Shunlin Zhu, Maoxiang Wei, “Skew Measurement of High-Speed Connector”, DesignCon 2019.