

高速信号伝送プリント基板の開発

八木 貴弘 小池 清
飯長 裕

データ通信の高速・大容量化に伴い、デジタル信号の高速化が著しい。伝送方式もパラレル伝送からシリアル伝送に移行し、汎用インターフェースにおいても8Gbps (PCI Express Gen3) や10Gbps (USB 3.1) などの高速伝送レートが適用され始めている。通信分野では更なる高速化に向けてサーバーのバックプレーン伝送レートが25Gbps (CEI-25G LR)から28Gbpsと高速化の一途をたどっている。図1は高速インターフェースのトレンドを示しており、今後更に40Gbpsを超える電気伝送の実用化が検討されている。

当社では、これまで通信分野で培われた高多層・特性インピーダンス制御技術を基に高速信号伝送プリント基板を設計・製造してきているが、昨今の25Gbpsを超える高速プリント基板では、従来技術の延長による信号品質を確保することが難しくなっている。

本稿では、25Gbpsを超える高速信号伝送プリント基板のために開発した設計・製造、および特性評価手法について紹介する。

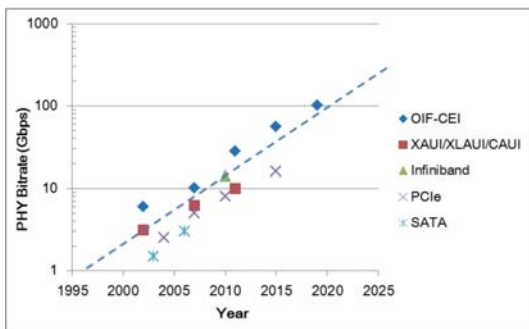


図1 高速インターフェースのトレンド
(出展：ITRS 2013 Edition (JEITA 訳), 7章, 48頁, 図14)

高速信号伝送プリント基板の課題

高速信号をプリント基板に伝送するための最重要項目は、伝送線路の損失低減と反射低減による通過特性の確保である。前者は低誘電率・低誘電正接基材の使用による誘電損失低減と、信号線幅拡大や銅箔表面の平滑化による導体損失低減により実現している。後者

は部品パッドやビアを含む線路のインピーダンス整合により実現している。また、板厚の厚いバックプレーンなどでは、ビアのスタブ（伝送線路から枝分かれした配線部分で、ここではその先端がオープンとなっている配線部分）に起因した共振が生じるため、スタブ除去が必須となっている。

加えて高速シリアル伝送に用いられる差動信号では、ペア配線間の平衡度が伝送路の特性に大きな影響を与える。差動信号の不均衡はインピーダンス変化やスキュー（複数信号間の伝搬遅延時間の差）の増加、差動同相変換をまねき、信号品質劣化だけではなく放射ノイズ増加の要因ともなる。

これら課題を解決するために材料、設計、製造の総合的な対応技術が必要となるが、ここではスキューの低減とビアのスタブ除去の手法について述べる。

高速化への対応技術

(1) 高速差動信号におけるスキュー低減

①スキュー発生要因

プリント基板に用いられるFR-4 (Flame Retardant Type4: ANSI規格における難燃性の基板材料) は、エポキシ樹脂とガラス繊維を束ねた縦糸と横糸で構成されたガラスクロスによる複合材料である。比誘電率は、前者が3.6、後者が6.6と大きく異なる。差動ペアの各配線上下の樹脂、ガラスクロスの分布により2線間の伝搬時間に差が生じ、特に高速信号では波長が短くなることから、このスキューが信号品質劣化の要因となる¹⁾。図2に具体例として差動ペア配線の各インピーダンスと、線路2箇所断面の断面写真を示す。パターン位置Aでは2本の配線上下にガラスクロスが対称に分布しているが、パターン位置BではPosi配線上部には樹脂が多く分布しており、Nega配線と非対称になっている。このため、パターン位置BではPosi配線周囲の比誘電率が低くなり、Nega配線よりもインピーダンスが高くなっている。

スキュー低減には設計と材料による2通りのアプローチがある。前者はガラスクロスの繊維方向に対して

信号配線を傾けてレイアウトするアングル配線手法である。後者は扁平したガラス繊維束で編まれた開繊ガラスクロスの使用により、樹脂とガラスクロスの分布を均一化することで比誘電率の差が大きい部分を減少させる手法である。ただし、このアプローチはコストアップを伴うとともに、樹脂とガラスの比誘電率の差は依然残るため、どちらの手法でも高速信号伝送を考えると、アングル配線によるスキュー対策が必要となる。

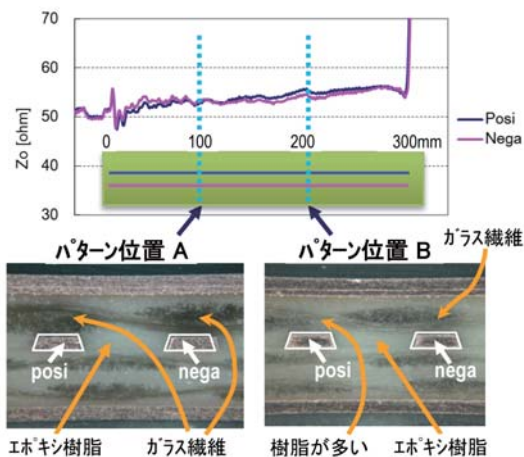


図2 差動配線の断面とインピーダンス

②スキュー低減効果の検証

ガラスクロスが信号特性に影響を与える条件としては、「ガラスクロスの繊維密度と周期」、「樹脂とガラスの比誘電率」、「ガラスクロスに対するペア配線の角度」、「伝送する信号の周波数」の4つがある。ここでは一般的な基材を用いて差動配線の角度とスキューの関係を調べた。表1に基板仕様と評価パラメータを、図3に各配線角度におけるスキューのBest/Worst値を示す。

表1 基板仕様、評価パラメータ

使用基材	0.1mm フリフレグ #2116 (IPC 規格) Resin Content 56%
配線仕様	差動 100Ω (L/S=0.12mm/0.25mm)
配線長	200mm
配線角度	0 ~ 11 度 (縦糸方向を基準)
評価項目	スキュー (N=10)

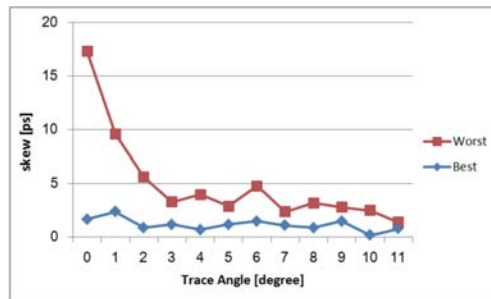
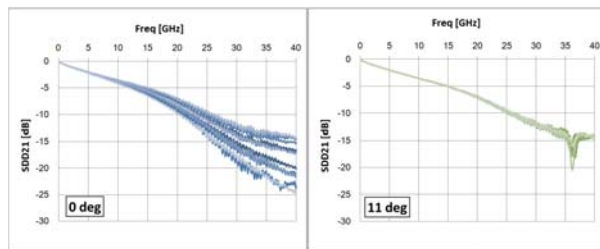


図3 配線角度とスキューの関係

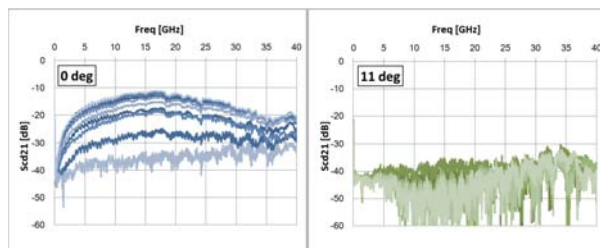
0度では最大10.4psのスキューが発生し、ばらつきも大きい。配線角度をつけることにより想定通りスキューが低減している。

次に、配線角度と伝送線路特性の関係を検証した。スキュー評価結果で影響の大きい0度と影響の少ない11度の差動通過特性 (Sdd21) を図4 (a) に、差動同相変換量 (Scd21) を図4 (b) に示す。この結果から、次のことが確認できる。

- 1) 0度配線ではボード間の通過特性のばらつきが大きく損失が増加する傾向にあるが、アングル配線の適用によりばらつきが低減する。
- 2) 通過特性ばらつきの大きい0度配線では差動同相変換量も最大-12dBと大きい。アングル配線適用により-30dB以下に低減する。
- 3) 11度配線では36GHzに共振がみられる。



(a) 差動通過特性 (Sdd21)



(b) 差動同相変換量 (Scd21)

図4 配線角度と送線路特性

0度配線の差動同相変換の増加は、ガラスクロスによる差動ペア配線の不平衡に起因する。その結果、通過

特性のばらつきやスキューが生じるが、アングル配線により改善されることが確認できた。しかしながら、アングル配線によりあらたに発生する共振は他の周波数でも確認されており、対策が必要となる。

③最適な配線角度の検討

アングル配線により生じる共振周波数から波長を算出した結果、信号配線がガラスクロス縦糸を通過するピッチと概ね一致した。

図5に評価基板に用いたガラスクロス(表1)の仕様²⁾と、信号配線が縦糸を通過するピッチから求めた共振周波数を示す。配線角度11度では36.1GHzとなり、評価基板でみられた共振周波数と概ね一致することがわかった。この共振周波数が信号の動作周波数の奇数次高調波に重なると、伝搬する信号品質が大きく劣化する。したがって、使用するガラスクロスのピッチと配線角度から縦糸を通過する配線周期(P)を求めることで予め共振周波数の予測ができ、信号の基本周波数に重ならない配線角度が最適条件となる。

本設計手法を用いることで、ガラスクロスの織りの影響を低減させることができた。

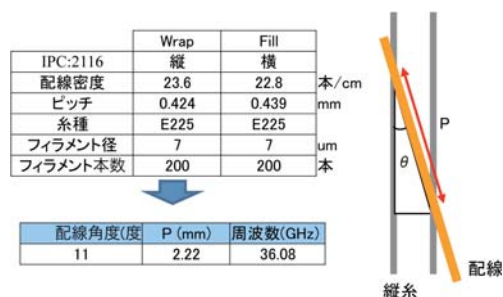


図5 ガラスクロスピッチ計算

(2) ビアのスタブ対策

①バックドリルの効果

プリント基板に設けたビアに高速信号を伝送する際に、層間の導通に関係のない余剰な部分がオープンスタブとしてふるまい、その波長に起因した周波数の通過特性が劣化してしまう。対策としては、スタブを除去するバックドリルが一般的である。バックドリルはプリント基板表面を基準位置とし、ターゲット層までのドリル深さを制御してスタブを切削除去する工法である(図6)。本来、ターゲット層までのスタブを完全に除去することが望ましいが、実際にはプリント基板製造過程で生じる層間厚のばらつきと、ドリル加工精度を考慮した製造マージンが必要であり、現実的にはスタブ長さゼロの加工は困難である。従来工法ではスタブ残り300um±150um程度の

精度が一般的であるが、このスタブ残りにより図7に示すような通過特性の劣化が生じている。

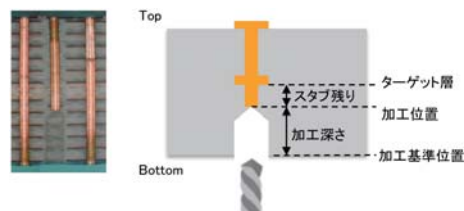


図6 バックドリル加工

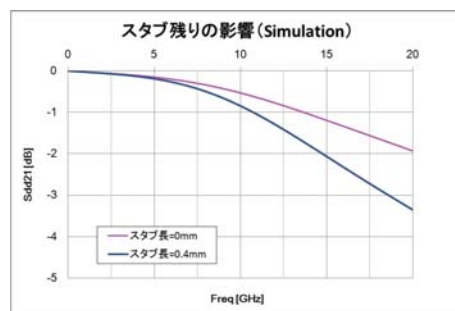


図7 スタブ残りによる通過特性への影響

②バックドリルの精度向上

25Gbps以上の高速信号伝送プリント基板に向けた高精度バックドリル加工方法を開発した。従来工法では、ターゲット層までの加工深さを非破壊で正確に把握することが困難であるため、スタブ残りを小さくすることが難しかった。そこで、新たにターゲット層までの深さを電気的に測定する手法を採用することで、基板表層からターゲット層までの深さを高精度に測定することが可能となった。この手法を用いて、スタブ長が通過特性へ与える影響を評価した。図8に評価基板の仕様を示す。板厚6.0mm、最大2.4mmのスタブを持つ貫通ビアのスタブ長を50um~400umまで50um刻みに変化させて通過特性を評価した。図9に各スタブ長の通過特性を示す。バックドリルを行わない条件では12GHzと34GHz付近にスタブによる共振がみられる。バックドリル適用により12GHzの共振は改善されるものの、34GHzではスタブ長に比例して通過特性が悪化することから、帯域によりスタブ長の影響が異なることが分かる。

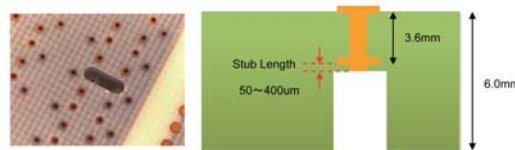


図8 評価ボード仕様

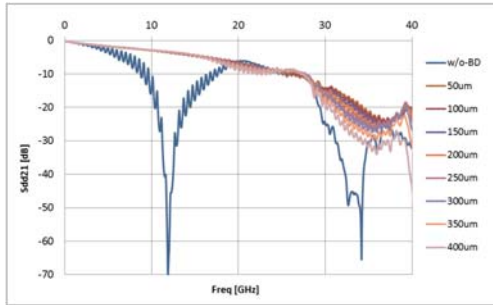


図9 スタブ長と通過特性

10/25/32Gbps伝送の基本周波数である5/12.5/16GHzにおける通過特性の変化率（スタブ長50umを基準）を図10に示す。この結果から、10Gbpsでは400um程度のスタブによる影響は無く、シビアなスタブ加工精度が不要であることが分かる。一方、32Gbpsクラスでスタブにより生じる通過特性の変化を5%以内にするには、スタブ長を250um以下にする必要がある。加工時の誤差を考慮すると製造公差は150um±100um程度となるが、今回開発した工法により実現可能であることが確認できた。ただし、バックドリル加工に要求される加工精度は、板厚、ビアの長さ、使用する周波数、通過特性の許容誤差によっても変わってくる。プリント基板メーカーとして更なる高精度加工技術の確立を目指す一方、過剰な精度追及はコスト上昇にもつながるため、特性・用途に応じた適切な精度の提案も重要であると考え。

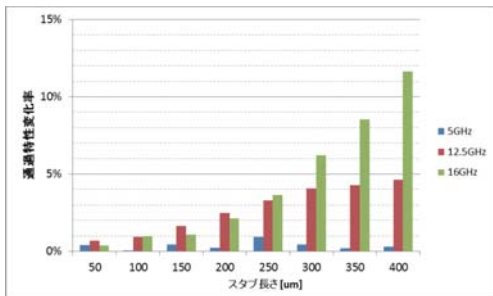


図10 スタブ長による通過特性の変化率

(3) 通過特性の評価方法

前述のように差動信号の不均衡やバックドリル加工精度に起因するスタブは、通過特性に大きく影響を与える。従来のプリント基板の特性管理として行われてきた特性インピーダンス検査のみでは、高速信号を伝送するプリント基板の製造過程で生じる様々な特性変動を定量的に検証することが難しくなっている。そこで、一部の高周波用途のプリント基板では、通過特性テストクーポンの測定により製造誤差に起因する特性変化を

評価している。図11に量産基板の差動通過特性（Sdd21）の評価例を示す。25Gbpsの基本周波数である12.5GHzの通過特性が管理値である±1.0dB以内におさまられており、ばらつきが少なく製造できていることが確認できる。また、図11に破線で示すように、今後想定される32Gbps（16GHz）以上を伝送する基板においても、今回開発したバックドリル工法による評価結果（図10）から通過特性のばらつきを管理値内におさめられると考えている。

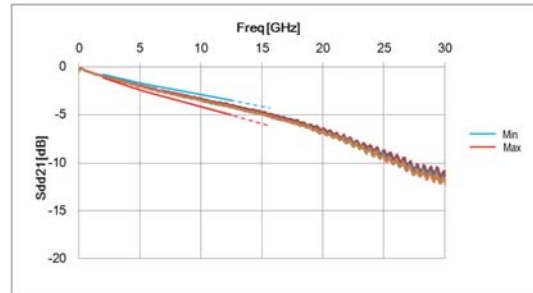


図11 量産基板の差動通過特性

あとがき

信号の高速化に伴い高精度加工が必要とされる一方、加工精度と特性の関係を定量化することにより、要求仕様に応じた適切な精度の設定、提案が可能となる。

今後、電気伝送の更なる高速化が進み、伝送レートは40Gbps以上になると予想される。これに対応するべく、最適な材料、製造プロセスの開発、シミュレーション・設計技術の向上に取り組んで行く。◆◆

参考文献

- 1) S.McMorrow,C.Heard,“The Impact of PCB Laminate Weave on the Electrical Performance of Differential Signaling at Multi-Gigabit Data Rates”, DesignCon East 2005
- 2) IPC-4412B,“ Specification for Finished Fabric Woven from E Glass for Printed Boards”

筆者紹介

八木貴弘：Takahiro Yagi. 沖プリントドサーキット株式会社 技術本部 開発部

小池清：Kiyoshi Koike. 沖プリントドサーキット株式会社 技術本部 開発部

飯長裕：Hiroshi linaga. 沖プリントドサーキット株式会社 技術本部