

## 学位論文の要旨

## Abstract of Thesis

研究科 School	自然科学研究科
専攻 Division	産業創成工学
学生番号 Student No.	51429302
氏名 Name	王 晨宇

学位論文題目 Title of Thesis (学位論文題目が英語の場合は和訳を付記)

A Study on Signal Integrity Improvement and Common-Mode Noise Suppression of Differential Transmission Lines for High-Speed PCB Layout (高速 PCB レイアウトに向けた差動伝送線路の信号完全性改善とコモンモードノイズ抑制に関する研究)

## 学位論文の要旨 Abstract of Thesis

電子機器は高性能、多機能、小型、軽量など様々な観点から開発が近年進められている。この開発の進展にはプリント回路基板(Printed Circuit Boards : PCBs)における高速信号処理、低電圧動作、高密度実装が大いに貢献している。ただし、電磁環境両立性(Electromagnetic Compatibility : EMC)と信号完全性(Signal Integrity : SI)の問題により PCB 上の伝送線路は、Gbps 伝送のボトルネックの 1 つになっている。

本論文では、USB3.0 (5.0 Gbps), SATA 3 (6.0 Gbps) と PCI Express Rev.3.0 (8.0 Gbps) など PCB 上の高速信号伝送で一般に用いられる差動伝送線路を対象とする。PCB への一層の高密度化や小型化の要求により本来対称であるべき差動伝送線路が非対称となり、SI の劣化やコモンモードノイズ発生が引き起こされる。このコモンモードノイズは、電磁干渉(Electromagnetic Interference : EMI)の要因の 1 つである。したがって、本論文では、高速差動伝送線路において現実に起こりうる以下の問題の解決を行う。

- (A) 差動伝送線路の屈曲部で生じるコモンモードノイズ。
- (B) 差動伝送線路の各線が受ける実効比誘電率が異なるによって引き起こされる差動スキュー。
- (C) 隣接する差動ペア間で生じるディファレンシャルモードクロストーク。

本論文の目的は、(A)、(B)および(C)における EMC および SI の問題のメカニズムを解明し、SI を維持しつつコモンモードノイズ発生が少ない伝送線路の構造を提案することである。これらの問題を解決することで得られた知見は次世代の高速伝送と高密度実装を実現する PCB の配線設計に役立つと考えている。

本論文は 5 章構成で第 2 章以降は以下の通りである。第 2 章では、(A)の低減を実現するため、非対称テーパ付密結合屈曲構造について検討している。これは我々の研究グループで提案したもので、非対称テーパの長さを調整することにより、差動線路の屈曲部で生じる経路差を補償することでディファレンシャルモードからコモンモードへのモード変換によるコモンモードノイズ発生を抑える。本論文では、高密度実装を前提に通常の屈曲部の範囲内に収める非対称テーパ付密結合屈曲構造とその設計方法を提案した。まず、非対称テーパ部の幾何的な経路差を定義し、テーパ形成条件の設定と構造パラメータ計算式の導出を行った。さらに、密結合屈曲部の線幅と線路間隔を減らすことにより、幾何的な経路差と実効的な経路差を一致させ、設計通りの特性が得られることを示した。そして、設計方法に基づいて形成した 45° の屈曲構造を評価し、通常の屈曲構造と比較して伝送特性は変わらず、ディファレンシャルモードからコモンモードへのモード変換が 20 dB 抑制できることを 3 次元電磁界シミュレーションと実測により示した。

第3章では、(B)を低減させるため、差動線路に対して差動スキューや特性インピーダンスに影響を与えないメッシュグラウンド構造を調べた。フレキシブルプリント回路(Flexible Printed Circuit : FPC)基板では通常、メッシュグラウンドを差動配線に対して45°回転し、その交差位置を差動配線の対称軸上に配置するが、このように対称性を重視すると、隣接差動配線の間隔はメッシュグラウンドのメッシュピッチに依存し、任意の配線間隔にすることが困難となり、実装密度を下げることに繋がる。一方、この対称性を無視すると差動スキューや特性インピーダンスに与える影響が無視できない。本論文では、まず、差動配線とメッシュグラウンドのなす角度に着目し、45°ではない別の角度で差動スキューが低減するか、差動配線の2本の線路における伝搬に伴う位相変化量の差から差動スキューの角度依存性を調べた。その際計算量を減らす目的で簡易モデルを提案し、3次元電磁界シミュレーションに近い精度で差動スキューの角度依存性の評価ができることを示した。そして、差動配線とメッシュグラウンドのなす角度を30°と40°の間にするすることで、差動スキューが差動配線とメッシュグラウンドの位置にほとんど依存せず、その値も比較的小さくなることを明らかにした。また、角度を30°にした試作基板により、差動配線に屈曲がある場合も差動スキューを小さくでき、特性インピーダンスの位置依存性もほとんどないことを確認した。そして、その低減メカニズムを調べたところと位相差をランダムにしたことに起因することが分かり、メッシュグラウンドを回転させるのではなく、メッシュ位置をランダムにシフトさせることでも同じ効果が得られることを示した。

第4章では、(C)の低減を実現するため、差動ペアの両方の外側への周期構造の導入を検討した。このクロストーク低減の効果を評価し、その低減メカニズムを明らかにした。さらに、ディファレンシャルモードのみに着目することで、周期構造を持つ隣接する差動ペアで発生するクロストークのメカニズムをモード解析、多導体伝送線路理論および弱結合理論を組み合わせ考察した。具体的には、5導体伝送線路のディファレンシャルモードクロストークのメカニズムを説明するために、奇モードと偶モードのディファレンシャルモードの概念を導入し、3導体結合伝送線路のクロストーク理論をこれにあてはめ、隣接差動ペア間のディファレンシャルモードクロストークを定式化した。3次元電磁界シミュレーション結果と比較することで計算式の妥当性を示し、さらに、ディファレンシャルモードにおいて偶モードと奇モードの特性インピーダンス、実効比誘電率およびモード結合から周期構造のディファレンシャルモードクロストークの低減メカニズムを調べ、2組の周期構造を持つ差動ペアでは、偶奇モードの実効比誘電率を一致させることができ、その結果遠端クロストークを理論的には0にできることを明らかにした。

最後に、第5章では、本研究で得られた知見をまとめた。