

計算機処理速度向上を目的とした プリント基板配線設計法と検証実験

吉原郁夫¹⁾ 飛高壮明²⁾ 小泉尚己³⁾ 山森一人⁴⁾ 安永守利⁵⁾

Experiments on a Novel Transmission Line Design for High Speed Computing

Ikuo YOSHIHARA Masaaki HIDAKA Naoki KOIZUMI Kunihito YAMAMORI
Moritoshi YASUNAGA

Abstract

Waveform distortion is a serious problem transmitting signals in higher frequency on printed circuit boards. In order to overcome this problem, thesegmental transmission line(STL)has already been proposed. In this reserch, we reshape signal waveforms using limited kinds of line-width and changing the segment-length together. We also develop a design methodology using a GA to determine the optimal paremeter for the proposed STL.We experimented designed STL on physical model.

Key Words:

transmission line, GA, printed circuit board

1 はじめに

近年計算機の処理速度向上のため、一度に転送するデータを増やすバス幅の拡張や単位時間当たりに行う処理の回数を増やすクロック周波数の向上などの方法が採られてきた。しかし、バス幅の拡張には信号線数の増加による配線密度の増加が避けられず、製造が困難だったり配線容量の増加による信号波形の歪みなどの問題がある。そのため、クロック周波数を高くすることで処理速度を向上させる方法が有力である。ところが現在はCPU内部のクロックが数ギガヘルツレベルにまで到達しているのに対し、プリント基板上を伝搬するクロック信号の周波数は未だ数百メガヘルツにとどまっている。図1にその現状を示す¹⁾。プリント基板上を伝搬するクロック信号の周波数を高くすることができれば、計算機全体の処理速度

を向上させることが期待できる。

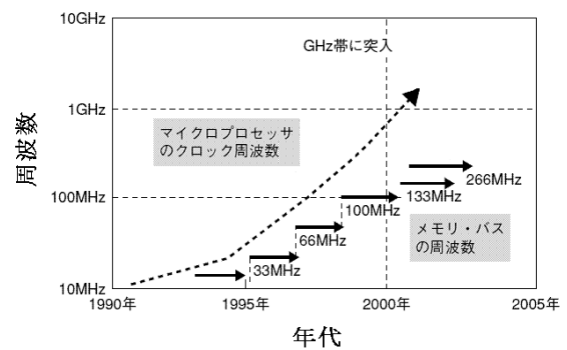


図.1 CPUとメモリのクロック周波数の変化

プリント基板上にはLSIなどの様々な部品が実装されている。プリント基板上の信号は伝送線側を伝搬する信号と部品に入力される信号とに分かれる。また部品側に分かれた信号は部品の入力端で反射し、この反射波が元の信号に重畳されるため信号波形に歪みが生じる。伝送線に接続されたLSIは等価的に容量性負荷とみなせる。これによりインピーダンスが変化し反射波が発生する。ま

¹⁾情報システム工学科、教授
²⁾情報システム工学科、学生
³⁾博士後期課程システム工学専攻、学生
⁴⁾情報システム工学科、准教授
⁵⁾筑波大学大学院システム情報工学研究科、教授

た、この反射波は、信号の周波数が高くなるにつれて大きくなるため、プリント基板上を伝搬する信号の周波数を高くする際の障害となる。

安永、吉原らは、部品が接続された点での反射と線幅を変えることでの反射を積極的に利用することにより反射波の影響を抑えるセグメント分割伝送線構造²⁾を提案している。セグメント分割伝送線では、伝送線を線幅の異なるいくつかのセグメントに分割し、各セグメントの線幅の組合せを調節することで、伝送線の特性インピーダンスを変化させ、故意に反射波を発生させ、これらの反射波とLSIなどの部品が原因で発生する反射波を重ね合わせることで、波形の歪みを解決させる。さらに、小泉ら³⁾による継続研究で個々のセグメント長を可変にすることで歪みを打ち消す不等長セグメント分割伝送線も報告されている。不等長セグメント分割伝送線では、LSIとの接続点における信号波形がより歪みの少ない波形になるように各セグメントの長さや線幅を遺伝的アルゴリズムを用いて決定する。これまでの不等長セグメント分割伝送線を用いたシミュレーションモデルでは、LSIなどの部品が接続されている点での歪みが解消できることがすでに分かっている。

そこで本研究では、シミュレーションにより求めた不等長セグメント分割伝送線を伝送路実験モデルで模擬し、シミュレーションで得た波形と同軸ケーブルを用いた伝送路実験モデル上での実測波形を比較することでクロック供給配線を事例にシミュレーション結果の検証を行なう。

2 プリント基板上を伝搬する信号と波形の歪み

2.1 伝送線の等価回路表現とインピーダンス

プリント基板の配線を、等価回路に置き換えて考える。近年プリント基板の実装密度は高くなり配線間隔が狭くなった。また、クロック信号の周波数も高くなってきたことで、プリント基板上の配線は分布定数回路と見なして取り扱う必要がある。分布定数回路とは、回路定数が空間的に分布している回路のことであり、図2はプリント基板上の伝送線を等価回路表現したものである。また交流回路における抵抗をインピーダンスと呼び、本研究では伝送線は無損失線路と仮定するため図2の G と R を省略し、インピーダンス Z を式(1)のように表す。

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

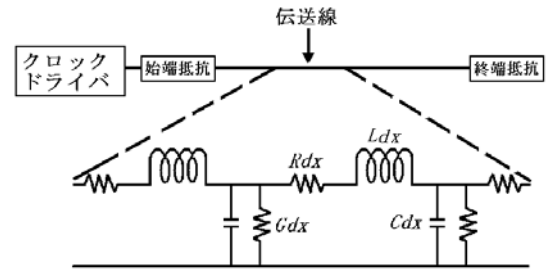


図.2 伝送線の等価回路

2.2 インピーダンスの不連続による波形の歪み

クロック供給配線のモデルを図3に示す。信号源であるクロックドライバは電圧源 V_0 と内部抵抗 R_{on} で表される。また、 R_D はクロックドライバの出力に接続されたダンピング抵抗である。ダンピング抵抗を通過したクロック信号は、特性インピーダンス Z_0 の伝送線を伝わり、終端抵抗 R_T に到達する。伝送線上にLSIなどの部品は等価的に容量性負荷 C_L とみなせる。この容量性負荷は分布定数回路に図3のように挿入された形となり、挿入された近傍で式(1)の C が増加することにより、みかけ上伝送路の特性インピーダンスが変化する。インピーダンスの変化により図4の様に一部の信号が反射し、残りの信号が透過していく。この反射波が後からくる信号と重ね合わさることで信号波形が歪む⁴⁾⁵⁾。

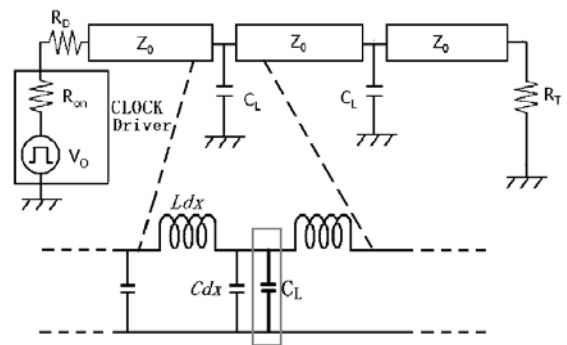


図.3 クロック供給配線

2.3 セグメント分割伝送線

- (1) セグメントを等長に分割し、幅のみを変える方式

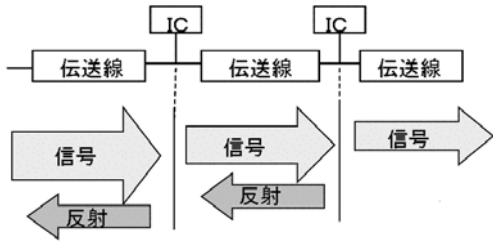


図.4 反射波発生仕組み

図5にセグメント分割伝送線を示す。セグメント分割伝送線では、各セグメントの線幅を調整することで、伝送線特性インピーダンスを変化させる。これにより、各セグメント間で特性インピーダンスが不連続となり反射波が発生する。これらの反射波と容量性負荷 C_L による反射波が互いに打ち消し合うように個々のセグメントの特性インピーダンス Z_{ij} を決定する。

セグメントの数を m 、各セグメントのとり得る特性インピーダンスの値を n 通りとすると、全体的な組み合わせは n^m 通りとなり、組合せ爆発が起こる。そこで、安永、吉原ら²⁾は遺伝的アルゴリズムを用いて各セグメントの最適な組合せを決定している。ところが、セグメント分割伝送線ではセグメントの長さを固定しているため、線幅を調節することでしか反射波を発生させることができない。その結果 99 種類もの線幅を用意する必要があり、その線幅の中には製造技術上設計することのできない線幅もある。

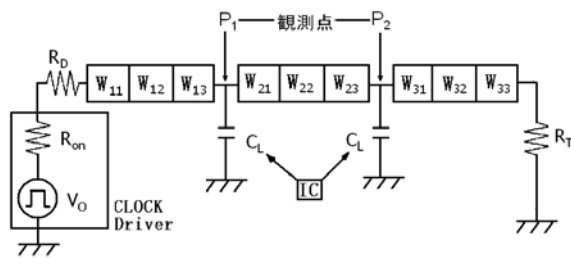


図.5 セグメント分割伝送線構造

(2) セグメントの長さも幅も変える方式

そこで、小泉ら³⁾により図6のように個々のセグメントの長さ L_{ij} を変化させた不等長セグメント分割伝送線構造が報告されている。不等長セグメント分割伝送線構造では、個々のセグメントの長さを変化させることで反射波の位相をずらし、さまざまな反射波をうまく重ね合わせ信号波形の歪みを打ち消す。これにより不等長セグメント分

割伝送線構造ではセグメント分割伝送線構造と比較してより少ない線幅の種類とセグメント分割数で設計することが可能である。

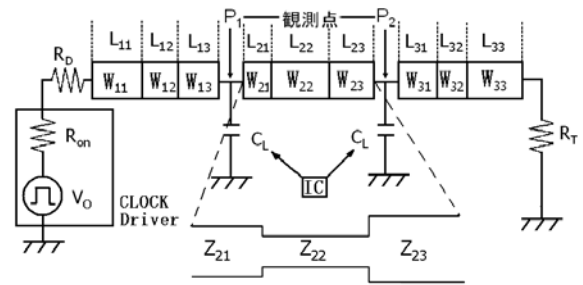


図.6 不等長セグメント分割伝送線構造

2.4 遺伝的アルゴリズムによるセグメントパラメータの最適化

遺伝的アルゴリズムとは生物の進化の過程をモデル化した解探索アルゴリズムである。解の候補を遺伝子で表現した「個体」を複数用意し、それらの個体に交差・選択・突然変異などの遺伝的操作を行う。選択の際には適合度の高い個体を優先的に残すことで個体群を進化させ、目的とする解を探索していく⁶⁾。図7は不等長セグメント分割伝送線の設計で用いる遺伝的アルゴリズムのパラメータ設定フローチャートである。不等長セグメント分割伝送線の設計で用いる遺伝的アルゴリズムのパラメータ設定では、まずランダムに初期個体群を生成する。次に交差、適合度の評価・選択といった遺伝的操作を終了条件に適合するまで行う。

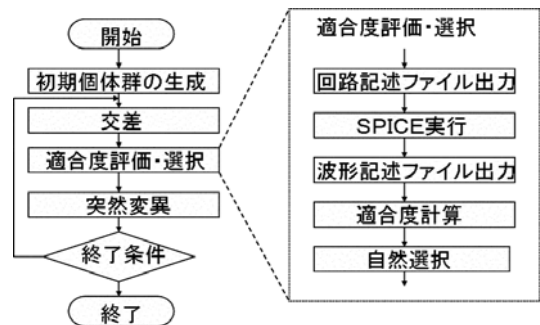


図.7 遺伝的アルゴリズムのフローチャート

図8に遺伝子の構造を示す。各個体は2本の染色体を持っている。

- 各セグメントの線幅、ダンピング抵抗 R_D 、終端抵抗 R_T を並べたもの
- 各セグメントの長さを並べたもの

この2種類の染色体で伝送線を表す。各個体は各々2種類の染色体を1つずつ保持している。

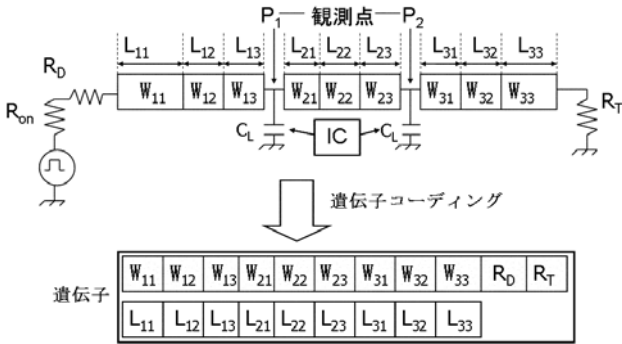


図. 8 遺伝子表現

個体の適合度は図9のように理想的な波と観測波の差の面積を式(2)を用いて計算し、その面積のずれ分が小さい個体ほど高い適合度となるよう式(3)のように定義する。また波形の計算にはアナログ回路シミュレータ SPICE を用いる。

$$Diff = \int_{t_1}^{t_2} |I(t) - R(t)| dt \quad (2)$$

$$fitness = \frac{1}{Diff} \quad (3)$$

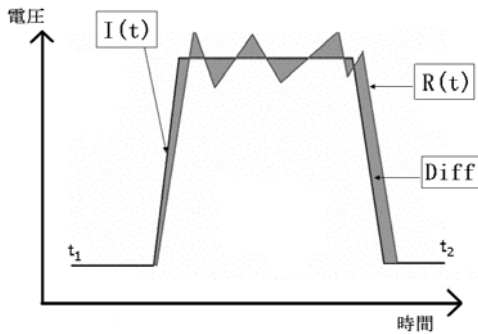


図. 9 面積のずれ分の計算

$I(t)$: 理想波形

$R(t)$: 実際の観測波形

3 検証実験

本研究ではまず第2章で説明したシミュレーション手法を用いて、伝送線の最適な線幅とインピーダンスの組合せを求める。次に求めた各セグメントの線幅を同軸ケーブルに置き換えて不等長セグメント分割伝送線の伝送路実験モデルを製作

し、シミュレーション条件と同じ信号を流した場合の観測点での信号波形を観測する。シミュレーションモデルと伝送路実験モデルの観測波形を比較することで、シミュレーションモデルの検証を行なう。

物理実験では図10の様に、シミュレーションモデルで異なる線幅を用いる代わりに、インピーダンスの異なる同軸ケーブルと平行フィーダを用いて不等長セグメント分割伝送線作成する。LSIが持つ負荷容量の変わりに小容量のコンデンサを用いる。クロックジェネレータとしては図11パルスジェネレータを用い、図12のオシロスコープで実測波形を観測することで、物理モデル上でのセグメント分割伝送線の有用性を検証する。

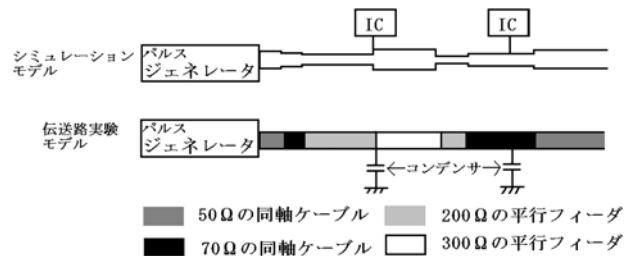


図. 10 物理モデルでの実験



図. 11 パルスジェネレータ

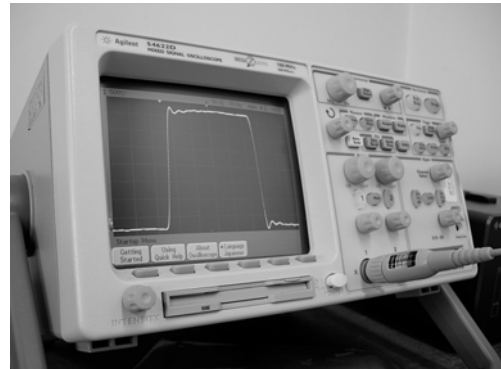


図. 12 クロック観測波形

3.1 設計対象

図 10 のように 2 つの素子を接続した不等長セグメント分割伝送線を設計対象とする。IC が接続されている観測点 P_1 、 P_2 の位置に負荷容量 $C_L = 200pF$ の素子が接続されているものと仮定し、信号入力点 P_1 における信号の波形を観測する。

通常の伝送線は、50 Ω の同軸ケーブルのみで構成する。一方、不等長セグメント分割伝送線はインピーダンスの異なる同軸ケーブル 2 種類 (50 Ω 、75 Ω) と平行フィーダ (200 Ω 、300 Ω) を用いて設計する。各セグメント同士は図 13 のようにハンダを用いて直接接続し、クロックドライバとセグメント、セグメントと波形観測点 P、セグメントと終端抵抗は 図 14 のように BNC コネクタを用いて接続する。ハンダや BNC コネクタを用いることで、インピーダンスが不連続となることが考えられる。しかし予備実験において影響は小さくほとんど波形に表れないということがすでに確認されている。実験に用いたパラメータを以下に示す。



図. 13 同軸ケーブル同士の接続



図. 14 BNC コネクタ

●伝送するクロック信号

信号の振幅:3.3V

信号の切り替わり時間:8.75ps

信号の周波数:5MHz

●設計するセグメント分割伝送線のパラメータ

使用する同軸ケーブル:50 Ω 、70 Ω 、200 Ω 、300 Ω

ダンピング抵抗、終端抵抗:50 Ω 、75 Ω

ダンピング抵抗～観測点 1 までのセグメント数:5

観測点 1～観測点 2 までのセグメント数:3

観測点 2～終端抵抗までのセグメント数:7

ダンピング抵抗～信号入力点 1 までの距離:1000mm

信号入力点 1～信号入力点 2 までの距離:600mm

信号入力点 2～終端抵抗までの距離:2000mm

3.2 実験結果

実験結果を図 15～図 19 に示す。各図の縦軸は電圧、横軸は時間である。図 15 はシミュレーションで観測された通常の伝送線での波形である。LSI に見立てた負荷容量による反射波が原因で大きく波形が歪んでいる。図 16 は物理モデルを用いた実験で観測された通常の伝送線での波形である。図 15 のシミュレーションと同様に大きく波形が歪んだ結果となった。また伝送路実験モデルで観測した波形はシミュレーションモデルとほぼ同じ波形が観測できた。

図 18 はシミュレーションで観測された不等長セグメント分割伝送線での波形である。シミュレーション結果の適合度を比較しても不等長セグメント分割伝送線の方が通常の伝送線と比べて高い適合度となり、セグメント分割伝送線を用いることで波形の歪みが減少したといえる。図 17 は今回設計した伝送線実験モデルである。図 19 は物理モデルを用いた実験で観測された不等長セグメント分割伝送線での波形である。図 18 より鈍った信号波形ではあるが、物理実験でもシミュレーションと同じ波形で歪みの少ない信号波形が観測できた。これにより、シミュレーション実験の結果が正しいことが分かった。

●シミュレーション結果との比較

無対策な伝送線での波形適合度:0.017

セグメント分割伝送線での波形適合度:0.035

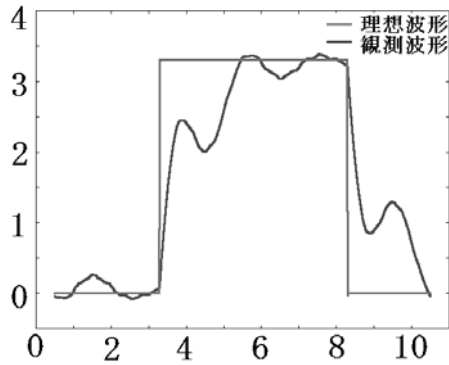


図. 15 通常の伝送線でのシミュレーション波形

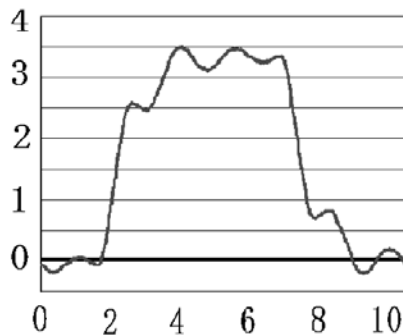


図. 16 通常の伝送線での実測波形

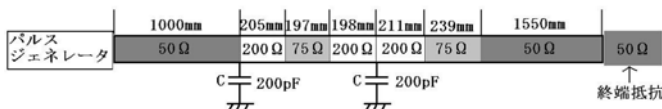


図. 17 同軸ケーブルを用いたモデル

4 おわりに

本研究ではシミュレーションモデル上の波形とインピーダンスの異なる同軸ケーブルと平行フィーダを用いた伝送路実験モデル上での実測波形を比較することでシミュレーションモデルの検証を行なった。

伝送路実験モデルを用いた検証実験で観測した波形はシミュレーションモデルで観測した波形と類似していた。また、シミュレーションモデルと同様に歪みの少ない信号波形が観測できた。これにより、物理的なモデルにおいても不等長セグメント分割伝送線構造を用いることで、LSIが接続されることによる反射波の歪みを打ち消すことができ、シミュレーションの結果が正しいことが分かった。

今後の課題として、LSIなどの部品が複数接続されている、大規模な配線系においても、不等長セグメント分割伝送線の有用性を検証する必要があると考えられる。また、今回の規模のシミュ

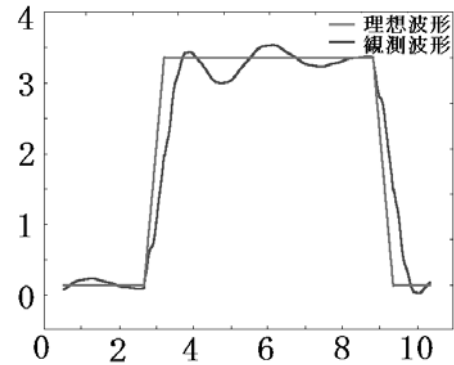


図. 18 不等長セグメント分割伝送線でのシミュレーション波形

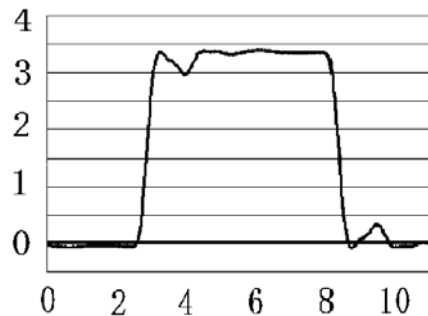


図. 19 不等長セグメント分割伝送線での実測波形

レーションを行なうのに約半日～1日の時間が必要となった。その実行時間の約8割程度がSPICEの実行時間であるため、SPICEを並列に実行させるなどの改良が必要だと考えられる。

参考文献

- [1] 須藤俊夫, “高速システム設計における差動信号伝送の考え方”, デザインウェブマガジン, Vol. 9, pp. 56–63 (2003).
- [2] M. Yasunaga, I. Yoshihara and J. H. Kim, “The design of segmental transmission-line for high-speed digital signals using genetic algorithms”, IEEE, Proc. of CEC2003, pp. 1748–1755 (2003).
- [3] 小泉尚己, 吉原郁夫, 山森一人, 安永守利, “G Aによるセグメント分割伝送線構造のセグメント長と線幅の最適化”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 105, No. 504, pp. 25–30 (2005).
- [4] 碓井有三, “ギガヘルツ時代の光速伝送線路設計”, 信学技報, Vol. FTS200134, pp. 21–28 (2001).
- [5] 西哲生, “21世紀への回路理論の基礎 [v] 一分布定数回路の解析”, 電子情報通信学会誌, Vol. 81, No. 2, pp. 202–210 (1998).
- [6] 佐藤浩, 小野功, 小林重信, “遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価”, 人工知能学会論文誌, Vol. 12, No. 5, pp. 1–11 (1997).