

セグメント分割伝送線を用いた任意信号の品質向上

島内優希[†] 中山廣士[†] 安永守利[†] 山口佳樹[†] 吉原郁夫[†]
筑波大学システム情報工学研究科[†] 宮崎大学工学部情報システム工学科[‡]

1. はじめに

近年、CPU などの VLSI 内部で伝送される信号の周波数は向上しており、それに伴ってプリント基板上で伝送されるデジタル信号の周波数も向上が求められている。高い周波数では、信号の波長が配線長に比べて小さくなり、配線は特性インピーダンスをもつ伝送線となる。特に、メモリバス等のバス構造をもつ伝送線では、モジュール接続点で特性インピーダンスの不整合がおり、ノイズが発生する。このノイズが伝送信号へ重畳されることで、信号の波形が歪み、論理誤動作などの、大きな問題を引き起こしている[1]。このような問題の対策として、従来はノイズの発生自体を抑える方法が用いられてきた[2][3]。しかし、これらの従来手法では、信号周波数の向上が進むにつれてノイズの発生を抑えることが困難になってきている。

本研究では、この問題の対策手法として、セグメント分割伝送線(STL: Segmental Transmission Line) [4]を用いている。STLとは、特性インピーダンス不整合によるノイズを意図的に発生させることにより、ノイズ同士を打ち消し合わせ、任意点における伝送信号の波形整形を行うという手法である。これまでの研究では、回路シミュレータ(SPICE)を用いたシミュレーション実験[5]と、プリント基板の試作によるハードウェア実験[6]を行い、STLによる波形整形の有用性を示している。

先行研究では、クロック信号の伝送のみに注目し、STLを用いた波形整形の有用性を示してきた。しかし、コンピュータ内部で伝送される信号はクロック信号だけではない。そのため、ランダムな信号の伝送に関して STL を用いた波形整形の有用性を示す必要がある。本研究では、伝送信号にランダムなデジタル信号を想定し、STLを用いた波形整形を行っていく。

2. STLの概要

STLでは、伝送線をいくつかのセグメントに分割し、それぞれのセグメントに異なる配線幅と長さを与えている。配線の特性インピーダンスは配線幅によって決定されるため、配線幅の異なるセグメントの間では特性インピーダンス不整合が起り、ノイズが発生する。

STLとは、このように意図的にノイズを発生させることにより、ノイズ同士を打ち消し合わせ、波形整形を行う手法である。

STLの配線構造の簡易セグメントモデルを図1に示す。各セグメントは異なる配線幅と配線長を持つため、配線パターンは左図のようになる。配線の特性インピーダンスは配線幅によって決定されるため、この配線構造を簡易セグメントモデルで表すと、右図のようなモデルとなる。

STLでは、各セグメントの特性インピーダンス配線長の組み合わせが、波形整形において重要な要素となる。しかし、各セグメントに与える特性インピーダンスと配線長の組み合わせの総数は、特性インピーダンスを10通り、配線長を100通り、総セグメント数を15とした場合 $(10 \times 100) = 1.0 \times 10^4$ 通りと膨大になり、全件探索は不可能であるといえる。

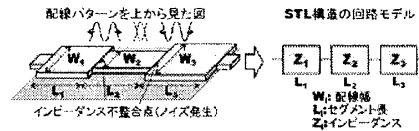


図1: STL構造の回路モデル

そのため STL では、配線の特性インピーダンスと配線長の組み合わせ選択に生物の進化を模倣した進化計算アルゴリズムである遺伝的アルゴリズム(GA)を用いている。セグメントの特性インピーダンスと配線長を個体の染色体とし、各個体を SPICE ネットリスト形式で生成。SPICE を用いて生成したネットリストの過渡解析を行い、STL を用いた波形とノイズが重畳されていない理想波形との誤差面積を適合度評価関数として用いる。GA では、生成された個体の環境への適合度を評価することによる優良個体選出が行われる。適合度は誤差面積の逆数のため、理想波形との誤差面積が小さい方がより優秀な個体となる。

STLの伝送線設計手順を図2に示す。

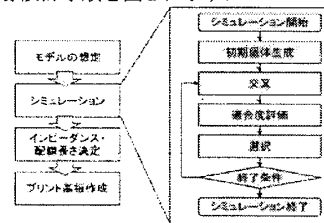


図2: STLの伝送線設計手順

まず、設計する伝送線の全配線長・入力信号の種類や周波数・セグメント総数などの配線モデルを想定する。これは、モデルの違いによって発生するノイズが異なるためである。次に、想定したモデルに対して、SPICEとGAを用いたシミュレーションを行う。配線の特性インピーダンスと配線長を個体の染色体としてGAを用いた進化計算を行い、最適なパラメータ値を決定する。

このシミュレーションにより導き出された最適なパラメータ値をもとに、各セグメントの特性インピーダンス・配線長を決定し、決定した値を用いてプリント基板の作成を行う。

3. 先行研究

先行研究では、信号の立ち上がり(T_r)/立ち下がり(T_f)によって発生するノイズに着目したスケールアップ実験が行われている。

伝送線の全配線長を360cm、セグメント総数を15、 T_r/T_f を8.75ns、信号の周波数は5MHzとし、シミュレーション実験を行った後、シミュレーションの結果より得られたSTLの設計を用いてプリント基板を作成し、ハードウェアによる実験検証を行った。先行研究によるハードウェア実験の結果を図3に示す。

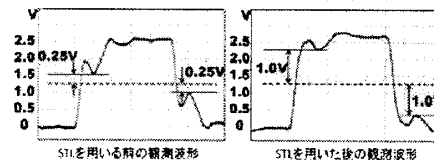


図3: ハードウェア実験結果

左図が通常の伝送線を用いた伝送波形である。ノイズによって信号が歪み、論理マージンが0.25Vまで下がっていることがわかる。STLを用いた場合の伝送波形は右図のようになり、論理マージンが1.0Vまで上がっている。この結果より、STLを用

Improved Signal Integrity for Transmitting Random Signal
Using the Segmental Transmission Line

[†] Yuki SHIMAUCHI

[†] Hiroshi NAKAYAMA

[†] Moritoshi YASUNAGA

[†] Yoshiki YAMAGUCHI

[‡] Ikuo YOSHIHARA

University of Tsukuba, Graduate School of Systems and
Information Engineering ([†])

University of Miyazaki, Graduate school of Engineering ([‡])

いた伝送信号の波形整形が有効であるということが示されている。

4. シミュレーション実験

本実験で用いた STL モデルを図 4 に示す。本実験では、伝送線の全配線長を 15cm、セグメント総数を 15 とし、信号の周波数は 1GHz とした。

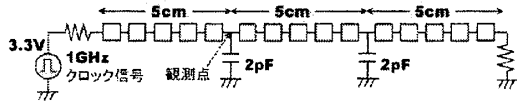


図 4: 本実験における STL モデル

上記モデルに対して遺伝的アルゴリズムを用いたシミュレーションを行い、設計した STL の入力にランダム信号を与える。その結果、クロック信号と同様に波形整形の効果が見られるかをシミュレーション実験により検証した。

まず、クロック信号に対するシミュレーションによる波形整形結果を図 5 に示す。

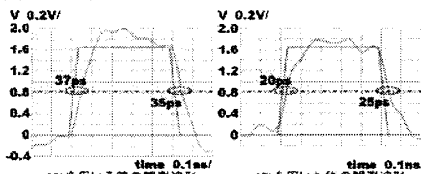


図 5: クロック信号に対する波形整形結果

波形より、STL を用いなかった場合には 37ps であった立ち上がりの遅延時間が、STL を用いることにより 20ps まで向上している。また、立ち下りの遅延時間においても、35ps から 25ps まで向上していることがわかる。

クロック信号の波形整形を目的として設計された STL に対し、入力として与えるランダム信号のテストパターンは複数考えられる。今回設計した STL に対して孤立波を入力した場合、ある信号のノイズの影響は 3ns 程度で十分に減衰した。3ns の間に伝送される信号は 6bit であるため、ランダム信号のテストパターンとしては、6bit の組み合わせを用いた。6bit の信号の組み合わせは全部で $2^6=64$ 通りであるが、100000 と 010000 など、同一パターンとみなすことのできる組み合わせも複数存在する。また、001010 などの 1 と 0 の交互な組み合わせに関しては、クロック信号と同一とみなすと、テストパターンは 30 通りとなった。

設計した STL の入力に信号 110001 を与えた結果を図 6 に示す。このパターンでは、STL によって論理マージンが最大で 0.24V 程度改善されていることがわかる。

また、入力信号を 100101 とした場合の波形を図 7 に示す。このパターンでも、STL によって論理マージンの改善が見られる。しかし、4bit 目に見られるように、論理マージンが削られてしまった部分もみられた。

今回設計した STL では、一部の信号においては論理マージンが削られる結果となった。しかし、30 通りのテストパターン全体では、ほとんどの場合で図 6 のように波形改善の効果がみられた。

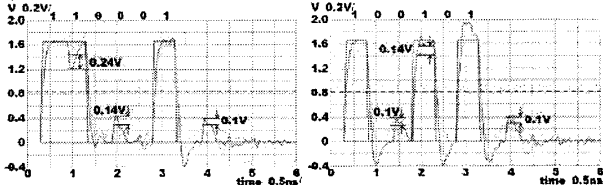


図 6: 110001 を入力した波形

図 7: 100101 を入力した波形

5. 今後の課題 (新評価関数の導入)

以上の結果より、クロック信号の波形整形を目的に設計された STL が、ランダム信号の波形整形においても有用であるというを示すことができた。

ここで、図 5 に見られるクロック信号の波形整形結果に着目する。今回の実験に用いたモデルにおいては、ノイズの影響により波形のオーバーシュートが大きいが、これは多少ならばあまり問題とならない。しかし、現在使用している適合度評価関数では、理想波形と実際の波形の誤差面積が小さいものを優秀としているため、波形のオーバーシュートが小さい個体が優秀となり、オーバーシュートを減らす方向へと進化を進めてしまう。その結果、図 6 の右図のように、論理マージンが一部で削られてしまうという問題が起きている。

このため、今後課題として、より効果的な波形整形を行うことのできる新しい適合度評価関数の導入を検討している。新しい評価関数は、図 8 に見られる灰色部分の面積 S とする。

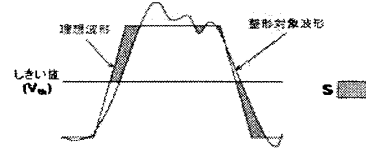


図 8: 新評価関数の導入

この評価関数では、現在の評価関数においては問題としているオーバーシュートを評価に含めず、理想波形としきい値電圧 (V_{th}) との間における、整形対象波形と理想波形の誤差面積を用いる。そのため、より効果的な波形整形を行うことができるのではないかと考えられる。

6. まとめ

高周波における伝送信号の波形整形手法であるセグメント分割伝送線 (STL) の設計において、クロック信号の波形整形を目的として設計された STL が、ランダム信号の波形整形においても有用であるということを示す、シミュレーション実験により示した。

しかし、現在の STL 設計では、今回の実験のようなモデルにおいては評価関数が最適ではないという問題がある。そのため、今後の課題としては、新しい評価関数の導入と、その効果の有用性の検証を行っていく必要がある。

また、先行研究では、クロック信号を用いていたためハードウェア実験によって STL による波形整形の有用性を示すことができた。しかし、ランダム信号に対して、ハードウェア実験による検証は行っていない。そのため、ランダム信号の伝送における STL の有用性を示すため、ハードウェアによる実験環境を整備することも進めていく。

参考文献

- [1] 碓井有三, "ボード設計者のための分布定数回路のすべて," 碓井有三, 2000.
- [2] 直野典彦, 中村祥恵, 高速デジタルシステム設計法詳説, 日経 BP 社, 2001.
- [3] M.Taguchi, "High-speed, small-amplitude I/O interface circuit for memory bus application," IEICE Trans. Electron., vol.E77-C, no.12, pp.1944-1950, Dec. 1994.
- [4] 安永守利, 吉原郁夫, "セグメント分割伝送線とその設計手法—VLSI 実装基板のための高品質信号配線の提案—," 電子情報通信学会論文誌 D-I, vol.J88-D-I, no.5, pp.515-929, May. 2005.
- [5] Naoki Koizumi, Ikuo Yoshihara, Kunihito Yamamori, Moritoshi Yasunaga, "Variable Length Segmental-Transmission-Line and Its Parameter Optimization based on GA," IEEE, Proc. of CEC2005, pp.1576-1582, Sep. 2005.
- [6] 中山廣士, 安永守利, 山口佳樹, 吉原郁夫, 小泉尚己, "セグメント分割伝送線を用いたシグナルインテグリティ向上の実験検証," 第 70 回情報処理学会全国大会, 分冊 1pp.9-10, つくば, Mar. 2008.