

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：52201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15962

研究課題名(和文) 近距離無線アシスト調整による基板間配線における超高速デジタル信号伝送手法の開発

研究課題名(英文) Development of high-speed data transmission with wireless assist adjustment

研究代表者

飯島 洋祐 (IIJIMA, Yosuke)

小山工業高等専門学校・電気電子創造工学科・講師

研究者番号：90565441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：大規模集積回路システムにおけるチップ間などの高速デジタル伝送において、電気配線の低域通過特性に起因する信号劣化の影響が問題となっている。特に、数GHz以上の高周波領域での配線挙動の複雑化が波形歪みの影響を悪化させており、上記問題を深刻化させている。本課題では、配線起因による受信端での波形歪みの高精度除去を目的とし、通信環境に応じたリアルタイムでの波形整形処理の最適化技術を実現した。主な研究成果は、(1)波形整形処理のリアルタイム調整に向けた受信端波形歪み評価手法の開発、(2)調整機能を有する波形整形回路の開発および試作、(3)無線アシストによる波形歪み除去調整技術の構築である。

研究成果の概要(英文)：In high-speed data transmission on electric wirings in VLSI systems, signal deterioration due to low-pass effect of electric wiring becomes an important problem. Particularly, in high frequency region beyond GHz over, the waveform distortion is increased, and behavior of the electric wiring characteristics become complicated. Therefore, the signal deterioration becomes serious problem. In this work, we have proposed optimization techniques of waveform shaping according to the environment of the signal deterioration; (1) evaluation method of waveform distortion for real time adjustment of waveform shaping, (2) waveform shaping circuit with adjustment function, (3) wireless assist system for adjustment of waveform shaping circuit.

研究分野：高速デジタル伝送技術

キーワード：高速デジタル伝送 波形整形技術 デジタル信号処理 最適化 無線アシスト

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大規模集積回路システムにおいて、CPU などの半導体素子の処理速度が数 GHz 以上に高周波数化しており、それに伴ってチップ間およびボード間通信の大容量化の要求が高まってきている。この通信の大容量化の遅れが大規模集積回路システム全体の性能を律速させる要因の一つになっており、システム全体の高性能化にはチップ間等における通信の高速化が必須である。この通信の大容量化を遅らせている原因には、電気配線の高周波数領域での低域通過（ローパス）特性がある。数 G ビット/sec (bps) 以上の超高速通信では、電気配線のローパス特性による信号減衰の影響が顕著となり、送信波形が配線上を伝送する事で大きく劣化し、受信端波形に歪みが生じる。この受信端波形の歪みによる隣接ビット同士の干渉（符号間干渉）が S/N 比を悪化させ、受信側で正確なシンボル判別ができずに正しい通信を困難にしている。このため、通信の大容量化には電気配線における伝送波形の歪み除去が必須であり、歪み除去のための波形整形技術が必要不可欠である。波形整形技術を適用する事で、配線による伝送波形歪みを除去し、受信端での S/N 比の改善が可能である。

しかしながら、数 GHz 以上の高周波数領域では、配線の表皮効果および誘電損に起因する信号減衰の増加し、基板配線の高密度化や 3 次元化の複雑配線、隣接配線との干渉による配線挙動の複雑化が上記問題を深刻化させている。このため、波形整形技術にて伝送波形歪みを高精度に除去するには複雑に変化する受信状態に応じた波形整形処理のリアルタイム調整が重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、通信環境に応じてリアルタイムでの波形整形処理の最適化を実現し、それによる伝送波形歪みの高精度除去を実現する事を目的とし、実測での評価による有効性検証と実装上の課題を明確化する。そのために、具体的に下記 3 点に取り組む。

- (1) 「波形整形処理のリアルタイム調整に向けた受信端波形歪み評価手法の開発」
- (2) 「調整機能を有する波形整形回路の開発および試作」
- (3) 「無線アシストによる波形歪み除去調整技術の構築」

### 3. 研究の方法

上記 3 点の研究目的の達成に向け、それぞれ以下のような研究の方法で取り組む。

(1) 「波形整形処理のリアルタイム調整に向けた受信端波形歪み評価手法の開発」

通信時の状況に応じた波形整形処理の最適化を実現する上での評価関数とするための受信端での歪み評価手法を開発する。実装後の受信端での伝送波形歪みの影響を回路上で評価可能にすることでリアルタイムで

の波形整形処理の調整を実現する。

(2) 「調整機能を有する波形整形回路の開発および試作」

送信側にてデジタル信号処理で波形整形が可能な Tomlinson-Harashima precoding をベースに、実装後にて波形整形処理の調整が可能回路開発およびその試作を行う。回路試作では、書き換え可能なハードウェアである FPGA を用いる。

(3) 「無線アシストによる波形歪み除去調整技術の構築」

波形整形回路の調整のための追加配線等を不要とするために、無線通信による回路調整を実現可能なシステムを構築する。無線通信として免許不要の近距離無線通信を用いる。

### 4. 研究成果

(1) 「波形整形処理のリアルタイム調整に向けた受信端波形歪み評価手法の開発」

実装後の通信状態を評価するために、受信端でのサンプリングデータに対して統計的手法を適用し、波形歪みの影響を数値評価可能な手法を開発した。特に、0/1 のバイナリ伝送に限らず、多値伝送にも対応可能とした。図 1 に示すように、受信端での A/D 変換後のサンプリングデータに対し、モジュロ演算を施して統計的処理することで、受信端でのシンボルデータのバラつきを平均値と分散にて数値評価する。モジュロ演算を施すことで、多値伝送のシンボル毎の歪みの影響を一つに合成し、一つの統計評価の結果で統合的に評価可能とした。更に、その回路実装方法を提案し、加算・乗算回路のみでの回路実装を実現し、受信端にてデータ蓄積のためのメモリを不要とした（図 2）。

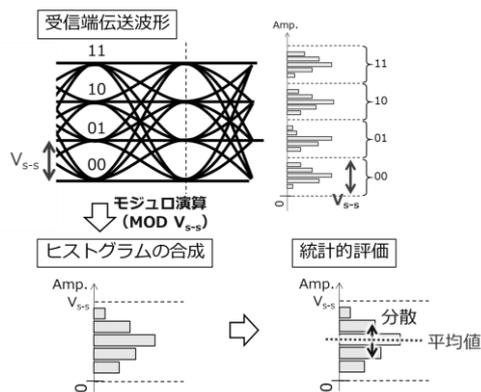


図 1 開発したモジュロ演算を適用した受信端波形歪みの評価手法の概要

開発した評価手法の有効性について、測定器連携による波形整形処理の最適化にて検証した。実験には、送信回路として任意波形発生器 (Agilent 社 81180B)、受信機としてオシロスコープ (Agilent 社 DS09404A) を使用した。それら測定器を数値解析ソフトウェア MATLAB にて制御し、オシロスコープにて観測した伝送波形を MATLAB 上にに取り込み、

開発した評価手法に基づき波形整形処理の最適化を実行した。遺伝的アルゴリズムを用いた最適化の結果、図3に示すように提案評価手法にて波形整形処理を最適化することで波形歪みが除去できる事を明らかにした。

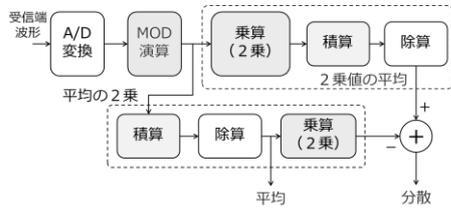


図2 加算回路と乗算回路による受信端歪み評価の回路構成

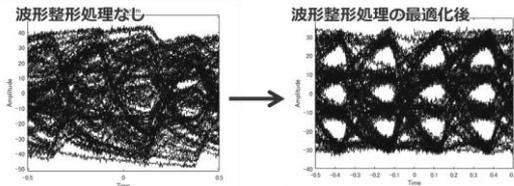


図3 提案評価手法に基づく波形整形の最適化結果(左:波形整形処理なし(調整前)、右:波形整形処理の調整後)

(2) 「調整機能を有する波形整形回路の開発および試作」

本課題では、波形整形処理として送信側にてデジタル信号処理にて波形整形を行う Tomlinson-Harashima precoding (THP) の適用を検討した。THP では、振幅方向に対して波形歪みの影響を改善可能である一方で、時間軸方向に対する歪み除去への対応が困難であり、受信端アイパターンで評価した場合のアイの開口幅拡大が困難であった。そこで、振幅方向および時間軸方向に対して柔軟な歪み除去を可能にした Double-rate THP (図4) を新たに提案した。Double-rate THP は、従来の THP と比較して、特に多値伝送における受信端歪み除去に有効である事を PAM (Pulse amplitude modulation) -4 の多値伝送アイパターンにて評価し、明らかにした(図5)。ビットエラーレート等の数値評価による効果検証が今後の課題である。

この Double-rate THP について、実装後に波形整形処理の調整が可能な回路を開発した。開発した回路について書き換え可能なハードウェアである FPGA を用いて実装評価を実施し、リアルタイムで波形整形処理の調整が可能な回路を開発した。Double-rate THP 回路に実装において、従来の THP に対して回路係数が約2倍となるため回路の高速化が困難になるが、並列化とパイプライン処理を併用した回路実装についても検討し、その性能および実装コストを評価した。

(3) 「無線アシストによる波形歪み除去調整技術の構築」

波形整形回路の調整について、無線通信に

よる調整が可能なインターフェースを開発した。具体的には、無線通信規格として Zigbee 通信と Bluetooth 通信を適用し、無線にて Double-rate THP 回路の回路係数を調整可能なインターフェース回路を開発した。

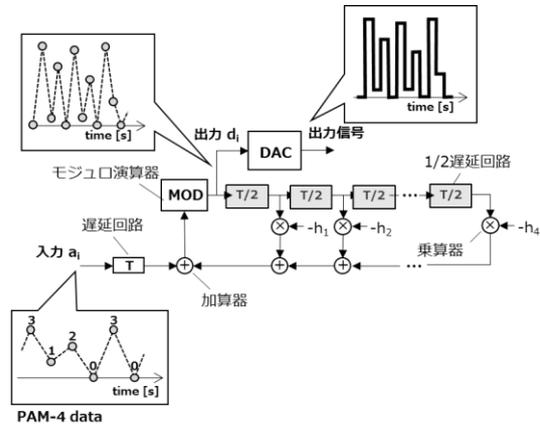


図4 Double-rate THP の構成図

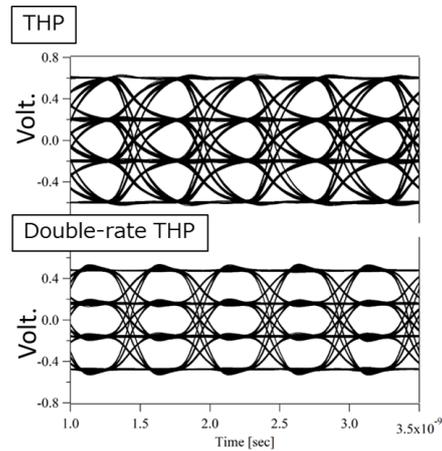


図5 THP および Double-THP における受信端歪み除去後の PAM-4 受信端 Eye パターン(上:THP、下:Double-rate THP)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Yosuke Iijima and Yasushi Yuminaka, "Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding for Multi-Valued Data Transmission," IEICE Trans on Information and Systems, 査読有, Vol. E100-D, No. 8, pp.1611-1617, Aug. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1587/transinf.2016LOP0014>

[学会発表] (計 9 件)

- ① Yasushi Yuminaka, Yosuke Iijima, "Experimental Measurements of Multiple-Valued Signaling with Tomlinson-Harashima Precoding for High-Speed Serial Links," 24nd International Workshop on Post-Binary

- ULSI Systems (Waterloo, Canada), 2015.
- ② 飯島 洋祐, 弓仲 康史, “多値伝送における送信イコライザの実装後係数調整の検討,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年.
  - ③ Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka, “Double-Rate Equalization Using Tomlinson-Harashima Precoding for Multi-Valued Data Transmission,” 2016 IEEE 46th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), 2016.
  - ④ Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka, “Multi-Valued Data Transmission using Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding,” 3rd International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 8th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (GUMI&AMDE 2016), Poster No. 69, 2016.
  - ⑤ Yasushi Yuminaka, Takuya Kitamura, Yosuke Iijima, “PAM-4 Eye Diagram Analysis and Its Monitoring Technique for Adaptive Pre-Emphasis for Multi-valued Data Transmissions,” 2017 IEEE 47th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), 2017.
  - ⑥ 飯島 洋祐, 田谷 圭吾, 弓仲 康史, “PAM-4送信イコライザのリアルタイム係数調整手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 273, pp. 177-182, 2017.
  - ⑦ 中嶋 一晴, 田谷 圭吾, 飯島 洋祐, 弓仲 康史, “PAM4による高速多値伝送に向けた波形整形回路のハードウェア実装に関する検討”, 第8回電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会, pp. 13-pp. 15, 2018年.
  - ⑧ Yosuke Iijima, Keigo Taya, Yasushi Yuminaka, “Optimization of waveform shaping for multi-valued signaling by using variation evaluation of received signals,” International Conference on Technology and Social Science 2018, 2018.
  - ⑨ Natsuki Sato, Takahito Chigira, Kohei Toyoda, Yosuke Iijima and Yasushi Yuminaka, “Multi-Valued Signal Generation and Measurement for PAM-4 Serial Link Test,” 2018 IEEE 48th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), 2018.

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.oyama-ct.ac.jp/EE/iijimaken/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯島 洋祐 (IIJIMA, Yosuke)  
小山工業高等専門学校・講師  
研究者番号：90565441