

令和元年5月29日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02675

研究課題名(和文) 符号化・信号処理に基づく高速信号伝送技術体系の構築とその応用展開

研究課題名(英文) High-speed data transmission technology system based on coding and signal processing and its application

研究代表者

弓仲 康史 (Yuminaka, Yasushi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30272272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、集積回路システムやデータセンター等において高速大容量データ伝送のニーズが高まっているが、配線の激増・伝送波形の劣化等が高速有線信号伝送の技術的課題となっている。本研究では、符号化・信号処理技術に基づき高速信号伝送を実現する配線主体のVLSIシステムの設計理論からテスト技術に至る技術体系の構築を目的とし、特に、次世代高速信号伝送規格で採用されたPAM-4信号に基づく有線信号伝送技術の考察と実験的検討を行った。主な研究成果は、(1) 4値信号(PAM-4)伝送のための波形等化アルゴリズムの考察と実証および(2) PAM-4信号の統計的アイパターン測定による伝送品質の評価手法の検討である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、集積回路システムやデータセンター等において高速大容量データ伝送のニーズが高まっているが、配線の激増・伝送波形の劣化等が高速信号伝送の技術的課題となっている。本研究は、携帯電話等の無線通信で用いられている高度な符号化・信号処理技術が信号伝送の高性能化に適用可能な点に着目し、配線主体のVLSIシステムの設計理論体系を構築する点に学術的意義を有する。本研究成果は、微細化された集積回路において、従来のデバイス主体の設計とは異なり、配線の高性能化に着目することによりデバイス性能を活かす新視点からの集積回路設計手法であり、ビックデータ、IoT時代のICTインフラ実現に有効な技術と考えられる。

研究成果の概要(英文)：There is growing demand for ultra-high-speed serial electric interconnects for data centers and throughout the IT infrastructure. However, in such high-speed serial links, channel distortion which arises from the limited channel bandwidth, and noise significantly restricts the total VLSI system performance.

This research proposes network-centric VLSI system design based on sophisticated coding and signal processing techniques to overcome the problems. In particular, we consider the high-speed data transmission techniques based on PAM-4 signaling that is adopted in the next-generation high-speed signal transmission standard. The main research results are (1) consideration and demonstration of waveform equalization algorithm for PAM-4 data transmission and (2) evaluation of signal integrity by statistical eye pattern measurement of PAM-4 signaling.

研究分野：集積回路工学

キーワード：多値論理 高速信号伝送 波形等化回路 PAM-4 イコライザ 符号化技術 FPGA

1. 研究開始当初の背景

近年、データセンタ等の応用において、大容量データを数 10Gbps 以上のデータレートで伝送することを目的とした次世代高速信号伝送規格が策定されているが、配線の激増・伝送波形の劣化等が高速有線信号伝送の技術的課題となっている。本研究は、携帯電話等の無線通信で用いられている高度な符号化・信号処理技術が VLSI システムの信号伝送の高性能化に適用可能な点に着目し、符号化・信号処理技術に基づき高速信号伝送を実現する配線主体の VLSI システムの設計理論から回路実装に至る技術体系の構築を研究の着眼点とする。

2. 研究の目的

集積回路システムの極限微細化・高速化・低電圧化に伴い、配線の激増、伝送波形の劣化、ノイズ等が深刻となりつつある。本課題では、符号化・信号処理技術が VLSI システムの信号伝送の高性能化に適用可能な点に着目し、配線主体の VLSI システムの設計理論から回路実装に至る技術体系の構築と、そのサーバのバックプレーン等に至る応用展開を研究目的とする。

データ伝送を主眼とする集積回路設計においては、従来のデバイス主体の設計とは異なり、伝送レート、配線の帯域制限、消費電力等に着眼した配線主体の体系的設計理論が必要となる。本研究では、与えられた伝送路特性、データレート、消費電力等の設計仕様を満たす高効率符号化の種類、波形等化アルゴリズム、回路実装を考慮し、配線主体のハードウェアの機能配分により大局的最適化を行う。特に、IEEE 802.3bs 等の次世代高速信号伝送規格で検討されている PAM-4 (4 レベル振幅変調) に基づく多値信号伝送技術に関し、多値符号の理論的考察から波形等化アルゴリズムの検討および回路技術、さらにテスト技術に至る技術体系の構築を本課題の主目標とする。

3. 研究の方法

次世代高速信号伝送規格で検討されている PAM-4 に基づく多値信号伝送技術に関し、符号および特有の波形等化技術の理論的考察とその回路実装、さらにテスト技術に至る各要素技術の検討を以下のサブテーマに基づき実施した。

(1) PAM-4 信号伝送のための波形等化アルゴリズムの考察と実証

従来、有線信号伝送で生じる劣化波形を整形する波形等化回路は、アナログ回路構成が主流であった。これに対し本研究では、A/D, D/A 変換器を用いたデジタル領域の信号処理に基づく波形等化技術の検討を行う。特に、デジタル信号処理を駆使した PAM-4 信号伝送技術の理論的考察とシミュレーションおよび D/A 変換器と FPGA による実証実験により、提案する PAM-4 信号波形整形技術の有効性を明らかにする。

(2) PAM-4 信号の統計的アイパターン測定による伝送品質の評価手法の検討

これまで研究事例が少ない PAM-4 信号伝送のアイパターン等による伝送品質評価を目的とし、PAM-4 伝送のテスト技術の基礎的考察を行う。特に、PAM-4 信号特有のアイパターン形状の統計的性質に着目した信号品質評価手法をシミュレーションおよび原理実験により実証する。

4. 研究成果

(1) PAM-4 信号伝送のための波形等化アルゴリズムの考察と実証

一般的な波形等化技術である送信側プリエンファシスを PAM-4 信号伝送に適用した場合、伝送する信号振幅のダイナミックレンジの制限が問題となる。これに対し、送信部のデジタルフィルタ中に剰余演算を用いた振幅の折り返しを利用することで信号振幅を制限可能とし、伝送路の逆特性を実現する Tomlinson-Harashima Precoding (THP) 方式が有効となる。本研究では、THP のサンプリングタイミングの工夫により、従来法と比較してアイパターンの時間軸方向の開口率を改善する手法を新たに提案し、複雑なレベル間遷移パターンを有する 4 値信号伝送に

特に効果的であることを明らかにした。

また、PAM-4 信号伝送においては、送信ドライバ回路の非線形性により、伝送波形の各符号の振幅レベル間隔が不均等となる問題が存在する。これに対し、送信回路の非線形性を考慮し、振幅電圧をあらかじめ不均等に割り当てる補正技術の検討を行った。

さらに、デジタル回路構成の波形等化アルゴリズムおよび送信ドライバ回路の非線形性補償技術の検証を目的とし、図 1 に示すような高速 D/A 変換器を FPGA で制御する PAM-4 信号伝送評価システムの構築を行った。本システムによる PAM-4 信号の実波形の生成と伝送路評価基板を用いた評価により、提案したデジタル領域での波形整形技術の有効性を実験的に検証することを可能とした。

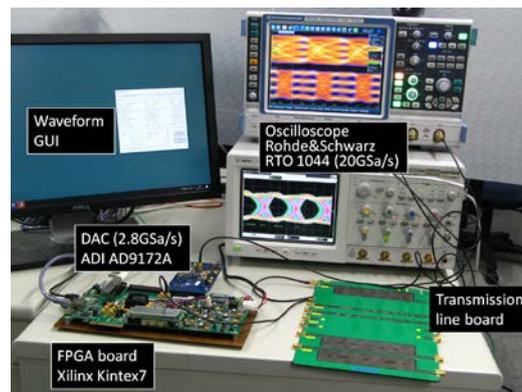


図 1：高速 D/A 変換器と FPGA を用いた PAM-4 信号評価システム

(2) PAM-4 信号の統計的アイパターン測定による伝送品質の評価手法の検討

これまで研究事例が少ない PAM-4 信号伝送の信号品質評価を目的として、PAM-4 信号テストアルゴリズムとアイパターンの最適化による THP 係数の自動調整技術を考察した。まず、2 値信号と比較し複雑な遷移パターンを有する 4 値信号特有のアイパターン形状の統計的性質に着目した伝送信号品質評価アルゴリズムを検討した。具体的には、4 レベルに正規分布するアイパターンを重ね合わせることで単一の正規分布を生成し、その分散を最小化することにより、受信信号品質の最適化を行った。次に、本アルゴリズムを MATLAB 上に実装し、原理実験を通して、伝送路特性の変動に適応可能な THP 係数の自動調整方式の有効性を明らかにした。

また、送信ドライバの線形性を評価するための指標であるアイパターンにおける RLM 値を定義し、実証実験により、提案した非線形補正アルゴリズムの有効性の定量的評価を行った。さらに、ノイズ、ジッタに対する PAM-4 信号伝送のシンボル誤り率検出の高速テスト手法の要素技術の検討を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

[1] Y. Iijima and Y. Yuminaka, Multi-Valued PAM-N Data Transmission using Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding, 査読有, Applied Mechanics and Materials, Vol. 888, pp. 59-65, 2019.

DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.888.59.

[2] Y. Iijima and Y. Yuminaka, Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding for Multi-Valued Data Transmission, IEICE Trans. on Information & Systems, 査読有, Vol.100-D, 8, pp.1611-1617, 2017.

DOI:10.1587/transinf.2016LOP0014

[3] Y. Yuminaka, Y. Takada and T. Okada, Comparison of Spectrally Efficient Coding Techniques for High-Speed VLSI Data Transmission, Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing, 査読有, Vol.26, pp.75-87, 2016.

[4] Y. Yuminaka and Y. Iijima, Multiple-Valued Signaling with Tomlinson-Harashima Precoding for High-Speed Serial Links, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 査読有, Vol.6, 1, pp.25-33, 2016. DOI:10.1109/JETCAS.2016.2528738

[5] Y. Yuminaka and Y. Takada, Comparison of NRZ and 4-PAM Coding for High-Speed VLSI Data Transmission, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.643, pp.141-147, 2015. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.643.141

[学会発表] (計 19 件)

[1] Y. Yuminaka, N. Sato, K. Toyoda and Y. Iijima, Signal Generation Using an FPGA and DAC for PAM-4 Serial-Link Test, 2nd International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System, IPS3-02, Kiryu, Nov. 5, 2018. (Best Presentation Award)

[2] 弓仲康史, 夏井雅典, 第 48 回多値論理国際シンポジウム報告, 第 41 回多値論理 Forum, No.17, 広島 2018 年 9 月 16 日

[3] N. Sato, T. Chigira, K. Toyoda, Y. Iijima and Y. Yuminaka, Multi-Valued Signal Generation and Measurement for PAM-4 Serial-Link Test, IEEE Proc. 48th Int. Symp. Multiple-Valued Logic, pp.210-214, Linz (Austria), May 18, 2018.

[4] Y. Iijima, K. Taya and Y. Yuminaka, Optimization of Waveform Shaping for Multi-Valued Signaling by Using Variation Evaluation of Received Signals, International Conference on Technology and Social Science, I03-03, Kiryu, Apr.18, 2018.

[5] 佐藤 菜月, 豊田 耕平, 千装 尊仁, 弓仲 康史, PAM-4 シリアルリンク評価のための多値信号の生成と測定システム, 第 8 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETG-18-44, 桐生 2018 年 3 月 1 日 (優秀発表賞受賞)

[6] 中嶋 一晴, 田谷 圭吾, 飯島洋祐, 弓仲 康史, 4 値 PRBS 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, ETG-18-5, 桐生 2018 年 3 月 1 日

[7] 見友 啓記, 佐藤 菜月, 豊田 耕平, 弓仲 康史, 多値信号の波形等化に関する検討 ~ 振幅領域と時間領域~, 多値論理とその応用研究会技術研究報告, pp.69-74, 神奈川 2018 年 1 月 13 日

[8] 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 デザインガイア, 熊本 2017 年 11 月 8 日

[9] 弓仲 康史, 中原 啓貴, 第 47 回多値論理国際シンポジウム報告, 第 40 回多値論理 Forum, No.20, 飛鳥 2017 年 9 月 16 日

[10] Y. Yuminaka, T. Kitamura and Y. Iijima, A PAM-4 Eye Diagram Analysis and Its Monitoring Technique for Adaptive Pre-Emphasis for Multi-Valued Data Transmission, IEEE Proc. 47th Int. Symp. Multiple-Valued Logic, Novi Sad (Serbia), pp.13-18, May 22, 2017.

[11] 北村 拓也, 弓仲 康史, PAM-4 信号伝送波形の考察とその非線形性補正, 平成 28 年度電子情報通信学会東京支部学生会発表会, 東京 2017 年 3 月 4 日

[12] Y. Iijima and Y. Yuminaka, Multi-Valued Data Transmission using Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding, International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Dec. 9, 2016.

[13] 弓仲 康史, 河口 万由香, 中原 啓貴, 第46回多値論理国際シンポジウム報告, 第39回多値論理 Forum, No.7, 盛岡 2016年9月11日

[14] 飯島 洋祐, 弓仲 康史, Double rate THP 波形等化による受信端での多値 Eye パターン制御に関する検討, 超高速・高周波エレクトロニクス実装研究会, Vol.16, No.2, pp.11-14, 東京 2016年7月29日

[15] Y. Iijima and Y. Yuminaka, Double Rate Equalization Using Tomlinson-Harashima Precoding for Multi-Valued Data Transmission, IEEE Proc. 46th Int. Symp. Multiple-Valued Logic, pp.66-71, Sapporo, May 19, 2016.

[16] 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, 2016年電子情報通信学会総合大会, B-4-33, 福岡 2016年3月16日

[17] Y. Yuminaka, High-Speed Serial Links Based on Multi-Valued Signaling, International Workshop on Emerging Technologies of Microelectronics and Their Application to IoT Paradigm, Hawaii (USA), Dec. 12, 2015.

[18] 弓仲 康史, 中原 啓貴, 第45回多値論理国際シンポジウム報告, 第38回多値論理 Forum, No.9, 札幌 2015年9月12日

[19] Y. Yuminaka and Y. Iijima, Experimental Measurements of Multiple-Valued Signaling with Tomlinson-Harashima Precoding for High-Speed Serial Links, 24th International Workshop on Post-Binary ULSI Systems, Waterloo (Canada), May 17, 2015.

〔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://cs3.el.gunma-u.ac.jp>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。