

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01488

研究課題名（和文）多値伝送技術を駆使したデバイスを活かす配線主体の集積回路システム設計理論の実証

研究課題名（英文）Demonstration of wiring-driven integrated circuit system design theory utilizing multi-valued data transmission

研究代表者

弓仲 康史 (Yuminaka, Yasushi)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：30272272

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高速・大容量化が求められるVLSIシステムやデータセンターなどのデータ通信を実現するために、次世代高速データ通信規格で採用された多値符号化に基づき、デバイスを活かす新概念の高速信号伝送システム設計理論の構築を検討した。特に、「4値信号特有の波形等化技術」および「受信信号のアイパターン評価」の検討を行った。研究成果として、PAM-4信号伝送の波形整形技術としてデジタルリッチな波形等化回路、符号化、プリディストーションなどの要素技術の開発により、それぞれの技術の実伝送路での評価を可能にすると共に、多値信号伝送方式の試験にも有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、VLSI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課題となっている。それに対し、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が本研究の学術的意義となる。

本研究成果は、微細化集積回路において、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の集積回路設計手法であり、高速高効率データ伝送を目的としたVLSIシステム、データセンター等の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）：In order to realize data communication in VLSI systems and data centers, etc., where higher speeds and capacities are required, this research examined the construction of a new concept of high-speed data transmission system design theory utilizing devices with multi-level coding, which is used in the next-generation high-speed data communication standards. In particular, "Waveform equalization techniques specific to 4-level signals" and "Eye-pattern evaluation of received signals" were studied. As research results, we developed elemental technologies such as digital-rich waveform equalization circuits, coding, and pre-distortion as waveform shaping technologies for PAM-4 data transmission, enabling evaluation of each technology on actual transmission lines and making it effective for testing multi-valued data transmission systems.

研究分野：集積回路工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

近年、極限微細化された VLSI システムやデータセンター等における通信容量の増加に伴い、信号伝送レートの高速度の要求が高まっている。しかしながら、トランジスタなどのデバイスの微細化による高速度の一方で、伝送データ量増大に伴う配線の激増および帯域制限に起因する伝送波形の劣化によるデータ速度制限がシステム全体の性能を律速する問題が顕在化している。これに対し本研究では、無線通信で用いられている高度な符号化・信号処理技術を、VLSI システムの有線データ伝送の高性能化に適用することにより、高速高効率信号伝送を可能とする配線主体の VLSI システムの設計理論とその実証から回路実装・評価に至る技術体系の構築を目的とする。

## 2. 研究の目的

現在、トランジスタデバイスの微細化により素子の高速化が実現される一方で、伝送データ量増大に伴う配線の激増および配線の帯域制限に起因する伝送波形の劣化によるデータ速度制限が VLSI システム全体の性能を律速する問題が顕在化している。

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、デバイスを活かす配線主体の集積回路システムの設計技術体系の構築を目的とする。具体的には、高効率な情報伝送を可能とする多値符号化をコア技術とし、「FPGA と DA 変換器を用いた多値信号発生装置によるエミュレータの開発」および「多値符号化特有の波形整形技術、AD/DA Embedded(埋め込み) 型イコライザ、受信信号のアイパターン評価アルゴリズムの検討」により、「配線・情報伝送に着目した VLSI の設計理論から回路実装、テストに至る技術体系の構築と応用展開」を図る。

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、ハードウェアの機能配分を行う。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着目し、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と実証を本課題の主目標とする。

## 3. 研究の方法

IEEE の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、多値符号特有の波形等化技術の理論的考察とその回路実装、さらに伝送信号品質評価に至る各要素技術の検討を、以下の3つのサブテーマに基づき実施した。

- (1) FPGA と高速 DA 変換器を用いた高速任意波形発生装置の開発と応用
- (2) 4 値信号特有の波形等化アルゴリズムの検討
- (3) 受信信号のアイパターン評価に基づく波形等化回路のパラメータの動的調整技術

主に、アルゴリズムの検証・評価には回路シミュレータ ADS(Advanced Design System)および MATLAB/Simulink を用い、データレートをスケールした原理実験には、作成した伝送路評価基板および本課題で構築した高速 DA 変換器と FPGA による任意波形発生システム等を用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) FPGA と高速 DA 変換器を用いた高速任意波形発生装置の開発と応用

これまで、アナログ回路構成が主流だった波形等化回路の実現において、AD/DA 変換器を用いてデジタル領域で信号処理する手法が、近年、回路の高速化により実現可能となっている。実波形を用いた多値伝送方式の評価を目的とし、送信回路を高速 DA 変換器と FPGA の構成によりエミュレート(模倣)可能な高速任意波形発生装置の開発を行った(図 1 左)。

高速 DA 変換器と FPGA の協調設計により、多値信号などの高効率符号化信号を実波形として発生させると共に、多値信号向け波形等化回路の設計アルゴリズムの検討とその実証を、作成した伝送路評価基板において測定評価可能となった。図 1 右に送信イコライズ回路のシミュレーションと実測結果例を示す。シミュレーションと同様の波形整形効果が実波形でも得られていることがわかる。

また、本評価システムの応用例として、高速信号伝送の送信ドライバの非線形性補償を検討した。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逆特性としてシンボルに不均等に割り当てるプリディストーション技術の検討を行った。高速 DA 変換器と FPGA を用いたエミュレータを用いて評価した結果を図 2 に示す。送信アンプの非線形性により不均等であった 4 値アイパターンが補償され均等になっていることがわかる。

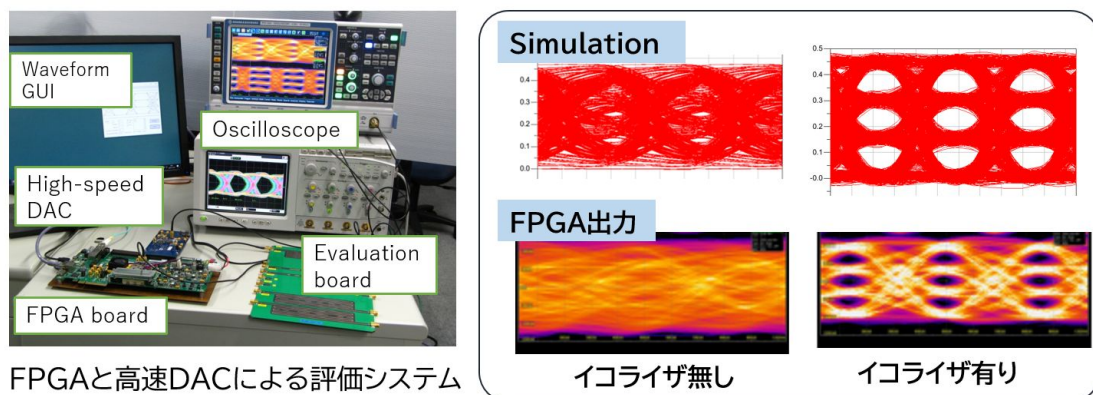


図 1：高速 DA 変換器と FPGA を用いた PAM-4 信号評価システムとイコライザの評価例

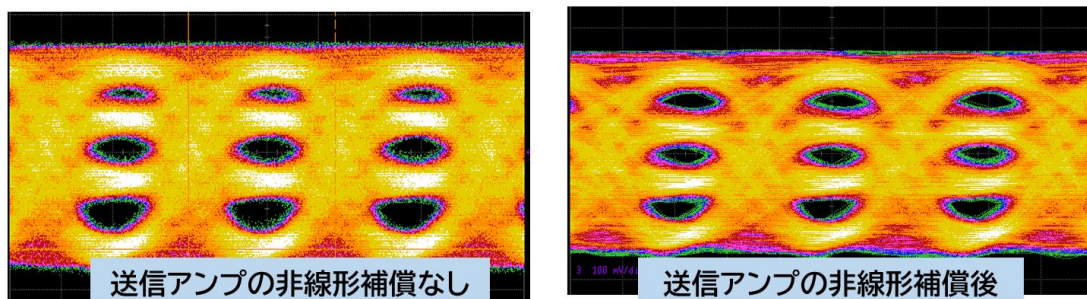


図 2：PAM-4 信号送信ドライバの非線形性補償の評価

## (2) 4 値信号特有の波形等化アルゴリズムの検討

4 値信号は、現在デジタルシステムで用いられている 2 値信号と比較し、同じデータ量を半分のレートで低速に伝送可能となる。しかしながら、2 値信号と比較し符号の遷移パターンが複雑なため、4 値信号特有の波形等化および受信波形評価技術が必要となる。これに対し、立ち上がり、立下りエッジを強調する新たな送信イコライズ手法である Fractionally-Spaced Feed Forward Equalizer (FSFFE) を用いた波形等化回路の新回路構成を提案した。

通常の FFE は、各タップで重み付けした信号を  $T_s$  (1 シンボル分) 遅延させて加算することで波形を強調させる。一方、FSFFE は、重み付けした信号を  $T_s$  より小さな遅延量 (一般には  $T_s/2$  (0.5 シンボル分)) で遅延させて重み付き加算することで波形を強調させる。この手法により、通常の FFE と比較し、高精度な補正を行うことが可能となる。しかし、FSFFE は、遅延量を半分にするにより乗算素子などの高速動作が要求されると共に、遅延量の誤差の影響がシビアとなる。

これらの課題を解決するために本研究では、通常の FFE ( $T_s$  遅延) と DA 変換器を組み合わせ、回路動作速度を通常の FFE (遅延量  $T_s$ ) のまま  $T_s/2$  遅延の FSFFE と同等の波形を生成する回路構成を新たに提案した。本手法は、信号遷移のエッジの強調が可能であるため、4 値信号の波形等化に特に有効であり、図 3 のように、時間軸方向のアイの開口を改善可能であることを明らかにした。さらに、提案した FSFFE の系統的パラメータ設定方法を検討した。

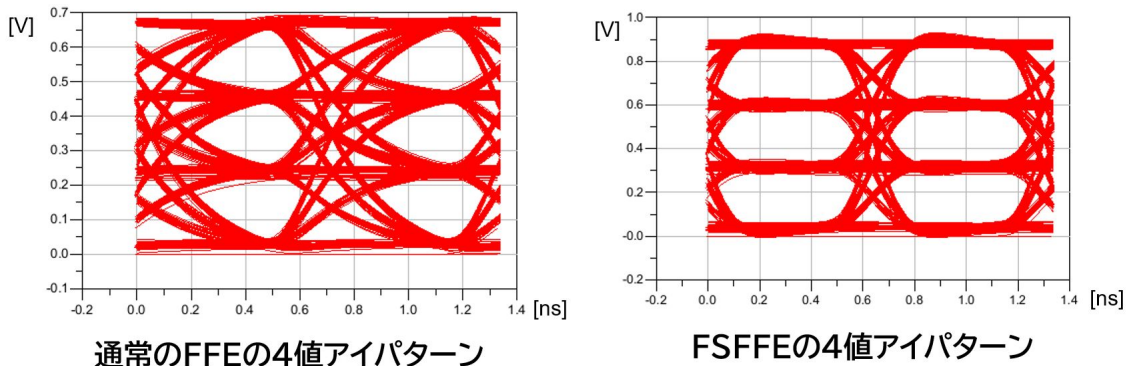


図 3 : PAM-4 信号波形整形の比較 (通常の FFE と提案の FSFFE)

また、アナログ・デジタル協調 AD/DA Embedded (埋め込み) 型イコライザの検討として、受信器の AD 変換回路と波形補正回路の一部を共用することによって、劣化した信号波形を補正しながらデジタル信号に変換する回路構成の検討を行った。この回路構成により、回路規模と消費電力の削減が可能であることを明らかにした。

## (3) 受信信号のアイパターン評価に基づく波形等化回路のパラメータの動的調整技術

高速化・複雑化する信号伝送においては、隣接する配線やコネクタ等の影響によって実装後の配線特性が変化するため、実装後の環境に合わせた波形整形回路のパラメータの動的調整が必要となる。従来、受信端にて伝送波形の歪みの影響をモニタリングする Eye-opening monitor (EOM) を用いたパラメータ調整が用いられているが、4 値信号の EOM は複雑となる。そこで本研究では、劣化した各シンボルがガウス分布することに注目すると共に、Modulo 演算で 4 シンボルを折り返し、単一のガウス分布とし、分散を最小化することでアイ開口の最適化を実現する新規構成の EOM 回路の検討を行った。

さらに、本 EOM 回路の応用として、機械学習を用いて伝送路特性の変動に適応可能な係数の自動調整アルゴリズムを MATLAB 上で実装し、動作を検証した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Iijima, K. Taya, and Y. Yuminaka	4. 巻 -
2. 論文標題 PAM-4 Eye-Opening Monitor Technique Using Gaussian Mixture Model for Adaptive Equalization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information & Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020LOP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Taya, Y. Yuminaka, and Y. Iijima	4. 巻 -
2. 論文標題 Statistical Waveform Evaluation Method for Adaptive PAM-4 Equalization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Logics - IfCoLog Journal of Logics and their Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Yuminaka, K. Taya, and Y. Iijima	4. 巻 9
2. 論文標題 PAM-4 Eye-Opening Monitoring Techniques based on Gaussian Mixture Model Fitting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 464 ~ 469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y. Yuminaka, N. Sato, T. Chigira, K. Toyoda and Y. Iijima	4. 巻 7
2. 論文標題 PAM-4 Signal Transmitter Using FPGA and DAC for Serial-Link Test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Logics - IfCoLog Journal of Logics and their Applications	6. 最初と最後の頁 29-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 Y. Yuminaka and Y. Iijima	4. 巻 8
2. 論文標題 Digital-Analog Hybrid Transmitter Equalizer for Multi-Valued Signaling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	6. 最初と最後の頁 387-392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2019XBL0091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka	4. 巻 888
2. 論文標題 Multi-Valued PAM-N Data Transmission Using Double-Rate Tomlinson-Harashima Precoding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mechanics and Materials	6. 最初と最後の頁 59-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/AMM.888.59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Efficient PAM-4 Data Transmission with Closed Eye Using Symbol Distribution Estimation
3. 学会等名 IEEE Proc. 51st Int. Symp. Multiple-Valued Logic (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 PAM-4 Eye-Opening Monitoring Techniques Using Gaussian Mixture Model
3. 学会等名 IEEE Proc. 50th Int. Symp. Multiple-Valued Logic (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Taya, Y. Iijima, and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Statistical PAM-4 Eye-Opening Monitor Technique for Adaptive Equalization
3. 学会等名 29th International Workshop on Post-Binary ULSI Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田谷 圭吾, 弓仲 康史, 飯島 洋祐
2. 発表標題 適応波形等化のためのPAM-4 伝送波形評価手法の検討
3. 学会等名 電気学会電子回路研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田谷 圭吾, 弓仲 康史, 飯島 洋祐
2. 発表標題 PAM-4 信号の適応波形等化技術と伝送波形評価手法の検討
3. 学会等名 第42回多値論理Forum
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 弓仲 康史, 夏井 雅典
2. 発表標題 第50回多値論理国際シンポジウム報告
3. 学会等名 第34回多値論理とその応用研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 PAM-4 Eye-Opening Monitoring Techniques Using Gaussian Mixture Model
3. 学会等名 IEEE Proc. 50th Int. Symp. Multiple-Valued Logic ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Tayama, Y. Yuminaka, and Y. Iijima
2. 発表標題 Function Allocation of Coding and Equalization for High-Speed Serial Links
3. 学会等名 2019 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iijima, K. Taya, and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Multiplexing Data Transmission using Wireline Baseband OFDM
3. 学会等名 2019 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Waveform Shaping Transmitter Combining Digital and Analog Circuits for Multi-Valued Signaling
3. 学会等名 IEEE Proc. 49th Int. Symp. Multiple-Valued Logic ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 飯島 洋祐、田谷 圭吾、弓仲 康史
2. 発表標題 PAM-4 伝送における混合ガウス分布を用いた伝送評価手法の検討
3. 学会等名 多値論理とその応用研究会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 弓仲 康史、夏井 雅典
2. 発表標題 第49回多値論理国際シンポジウム報告
3. 学会等名 第41回多値論理Forum
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Waveform Shaping Transmitter Combining Digital and Analog Circuits for Multi-Valued Signaling
3. 学会等名 IEEE Proc. 49th Int. Symp. Multiple-Valued Logic (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iijima and Y. Yuminaka
2. 発表標題 Waveform Shaping Technique for Multi-Valued Data Transmission Combining Digital/Analog Equalization Circuit
3. 学会等名 International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Taya, Y. Iijima and Y. Yuminaka
2 . 発表標題 Evaluation and Optimization Method for Multi-Valued Transmission Equalizer Using Genetic Algorithm
3 . 学会等名 International Conference on Advanced Micro-Device Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Yuminaka, N. Sato, K. Toyoda and Y. Iijima
2 . 発表標題 Signal Generation Using an FPGA and DAC for PAM-4 Serial-Link Test
3 . 学会等名 2nd International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Sato, T. Chigira, K. Toyoda, Y. Iijima and Y. Yuminaka
2 . 発表標題 Multi-Valued Signal Generation and Measurement for PAM-4 Serial-Link Test
3 . 学会等名 IEEE Proc. 48th Int. Symp. Multiple-Valued Logic ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Iijima, K. Taya and Y. Yuminaka
2 . 発表標題 Optimization of Waveform Shaping for Multi-Valued Signaling by Using Variation Evaluation of Received Signals
3 . 学会等名 International Conference on Technology and Social Science ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 千装 尊仁、弓仲 康史
2. 発表標題 高速信号波形整形のための時間領域判定帰還型等化技術の検討
3. 学会等名 平成30年度電子情報通信学会東京支部学生会発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯島 洋祐、弓仲 康史
2. 発表標題 多値高速伝に向けたデジタル/アナログハイブリッド波形整形回路の検討
3. 学会等名 第32回多値論理とその応用研究会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 弓仲 康史、夏井 雅典
2. 発表標題 第48回多値論理国際シンポジウム報告
3. 学会等名 第41回多値論理フォーラム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室WEBページ <a href="http://cs3.el.gunma-u.ac.jp">http://cs3.el.gunma-u.ac.jp</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------