

令和 3 年 6 月 29 日現在

機関番号：52201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11232

研究課題名（和文）3次元回路並列化を駆使したデジタル波形整形処理による超高速多値伝送技術の開発

研究課題名（英文）Development of a high-speed multivalued data transmission technique based on the processing of digital waveform shaping with circuit parallelization

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・准教授

研究者番号：90565441

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高速伝送にPAM-4（Pulse amplitude modulation-4）伝送などの多値伝送方式の採用が進む中、これまで申請者は複雑なシンボル遷移パターンに起因する多値伝送特有の伝送歪み除去に向けたデジタル波形整形回路システムの開発を進めてきた。本研究では、多値伝送に対応した柔軟な波形整形を実現するためにデジタル・アナログハイブリッドの波形整形回路を新たに開発し、受信端シンボルの統計的解析による新しい定量的な伝送歪み評価手法を提案した。それら技術を合わせ、多値伝送に対応し、伝送路環境に応じた波形整形回路の最適化を実現するシステムを検討し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算機システムの高性能化において、CPUなどの半導体素子間の電気信号の高速通信技術が必要不可欠であり、その高速化の遅れがシステム全体の性能を律速させている。その原因の一つには、通信の高速化に伴う電気配線上的高周波数雑音などの影響がある。本研究は、通信の高速化に向けて現在採用が進む多値伝送方式に対応した新しい高速伝送回路技術を開発し、さらにその回路の自動調整に必要な不可欠となる多値伝送に対応した電気配線上の通信への影響を定量的に評価する手法を新たに提案し、その基礎的評価を実施したことで今後の多値伝送の高度化へ貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In recent times, multi-valued data transmission methods, such as pulse amplitude modulation-4 (PAM-4), are being widely used. This study has developed a waveform-shaping technique to eliminate waveform distortion, which depends on the complicated symbol transition patterns of multivalued data transmission. To eliminate the complicated effect of waveform distortion, a digital-analog hybrid waveform-shaping circuit has been developed; the circuit can achieve flexible waveform shaping compared with the conventional method. Moreover, a new evaluation method pertaining to received waveform distortion for multi-valued signaling based on the statistical analysis method has been proposed. This study has achieved the estimated waveform distortion for PAM-4 symbols based on the Gaussian mixture model. Based on the results, we can achieve optimized waveform shaping according to the transmission line environment.

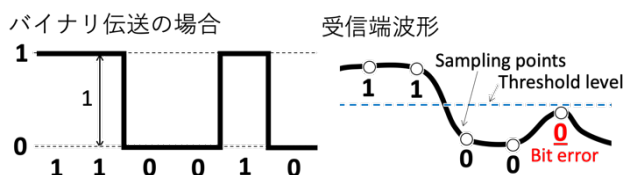
研究分野：高速デジタル伝送

キーワード：大規模集積回路システム 多値伝送方式 伝送歪み 波形整形 アイパターン 統計的評価

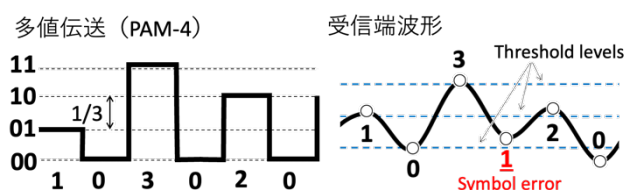
## 1. 研究開始当初の背景

(1) 大規模集積回路 (VLSI) システム内において、CPU などの半導体素子の高性能化に伴ってチップ間などの電気配線上での通信の大容量化が要求されており、その通信の大容量化に向けて伝送信号の高周波数化が進んでいる。しかしながら、伝送信号の高周波数化によって、電気配線の高周波数領域におけるローパス特性の影響が大きな問題となる。具体的には、送信信号が伝送路にて劣化し、受信端にて伝送波形に歪みが生じることで符号間での干渉 (符号間干渉) が問題となる。図 1 に示すように、符号間干渉によって受信端にて正確な符号判定が困難になることでシンボルエラーが生じる。

(2) さらに、通信の大容量化に向け、電気配線上での高速伝送に多値伝送方式の採用が進んでいる。例えば、従来の 0 と 1 のバイナリ伝送方式に対して、0、1、2、3 の 4 値を 1 シンボルとする PAM-4 (Pulse amplitude modulation-4) 伝送方式を用いることで、同じシンボルレートで 2 倍の通信速度を実現することが可能である。同じ通信速度で比較した場合には、PAM-4 伝送方式を用いることでバイナリ伝送方式に対してナイキスト周波数を 1/2 倍にできる。しかしながら、図 1 に示すように多値伝送方式の採用によってバイナリ伝送と比べてシンボル間距離が減少し、さらに多値伝送特有のシンボル間の複雑な遷移パターンによって符号間干渉の影響が増加する。加えて、高周波雑音や D/A 変換回路等の非線形性の影響が問題を深刻化させている。



(a) バイナリ伝送における受信端での符号間干渉の影響



(b) 多値伝送 (PAM-4) における受信端での符号間干渉の影響

図 1 バイナリ伝送と多値伝送における符号間干渉の影響

## 2. 研究の目的

VLSI システム全体の高性能化を律速させる要因の一つとなっている電気配線上の伝送速度の遅れについて、本研究ではこれまで申請者が開発してきたデジタル信号処理技術を駆使したデジタル波形整形技術および通信環境に応じた受信端での伝送歪み除去の最適化技術を基盤に新たな高速伝送の回路技術およびその調整手法を開発する。具体的には、多値伝送特有の複雑化した伝送歪み除去に向けた新たにデジタル信号処理と回路技術を駆使した多値伝送対応のデジタル波形整形回路を提案し、その要素技術を確立させる。さらに、受信端での多値伝送歪みの定量的な評価技術を開発し、それに基づく多値伝送における波形整形回路のリアルタイム調整手法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) バイナリ伝送に比べて伝送歪みの影響が複雑化する多値伝送方式に適用するために、従来の波形整形技術よりも柔軟な波形整形処理とその調整が可能な波形整形回路を開発する。そこで、これまで申請者が検討してきたデジタル信号処理に基づく波形整形に加えて、アナログ等化回路の概念を取り入れたデジタル・アナログハイブリッドの波形整形回路を検討する。さらに、実機を想定した伝送路環境にてシミュレーションおよび実測評価にて、その波形整形の性能を評価する。

(2) 上記 (1) で開発を目指す波形整形回路について、伝送路環境に応じた回路パラメータの自動調整に向けた受信端での多値伝送歪みの定量的な評価手法を開発する。具体的には、受信端でのサンプリングデータの統計的解析からシンボル分布を推定し、受信端での伝送歪みを定量的に評価する手法を開発する。さらに、その評価手法の有効性について、基礎的な評価を実施する。

(3) さらに、上記 (2) による受信端での伝送歪み評価手法を用い、伝送路特性に応じた波形整形回路の回路パラメータの自動調整に適用する。具体的には、パラメータ調整の目的関数に提

案の伝送歪みの定量的な評価結果を用いた波形整形回路の自動調整アルゴリズムを開発し、シミュレーションおよび実測にて波形整形回路の自動調整に対する有効性を検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 従来のデジタル信号処理に基づく波形整形に加えて、アナログ等化回路の概念を取り入れたデジタル・アナログハイブリッドの波形整形回路を提案した。図2に示すように、FFE (Feed forward Equalizer) にてデジタル処理を施した信号をアナログ演算回路で合成することで、高周波数領域における波形整形性能を向上させた。図2に示すように、2つの Digital-to-Analog converter (DAC) を並列に実装し、その差分をアナログ演算回路にて生成する。デジタル回路を採用することで柔軟な回路調整を実現可能とした。さらに、DACそれぞれの動作クロックを反転させることで、DACの動作速度を抑えつつ高周波数領域における波形整形の性能を改善させた。図3に開発した評価用の伝送路基板を用いた実測にて提案の波形整形回路を評価した結果を示す。図3に示すように、高周波数領域の波形整形性能を改善した事で時間軸方向にEyeの開口率を大幅に改善できることを確認できた。

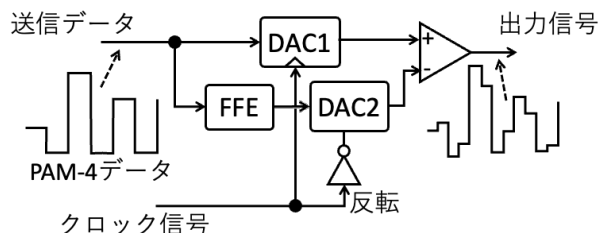


図2 開発したデジタル・アナログハイブリッドの波形整形回路

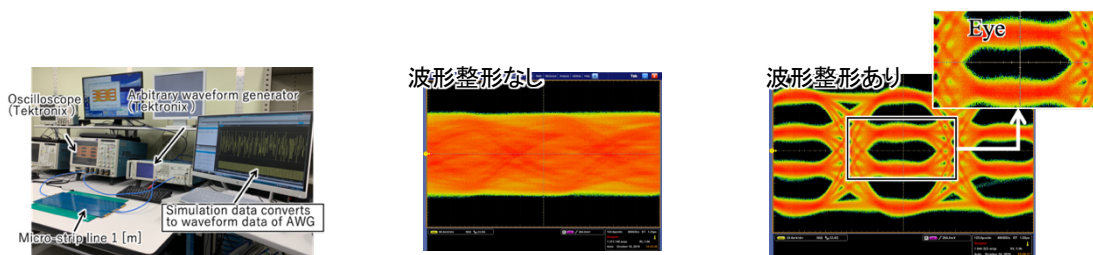


図3 評価基板による提案波形整形回路の評価 (左: 評価システムの外観、中央: 波形整形回路無しでの受信端 Eye パターン、右: 提案波形整形での受信端 Eye パターン)

(2) 伝送路の影響に適応した波形整形回路の調整を実現するには、受信端にて符号間干渉による伝送歪みの影響を定量的に評価する必要がある。本研究では、受信端でのサンプリングデータに基づく新たな統計的歪み評価手法を開発した。具体的には、多値伝送における受信端信号のばらつきを混合ガウス分布に近似し、受信端でのサンプリングデータの頻度分布から混合ガウス分布を推定することでシンボル毎のばらつきを平均値および標準偏差にて定量的に評価可能とした。図4に示すように、PAM-4 伝送において受信端シンボルのばらつきを4つのガウス分布の混合分布として推定することで、従来の Eye パターン評価では評価が困難な完全に Eye が閉じた状況でも定量的な伝送歪み評価を実現可能とした。

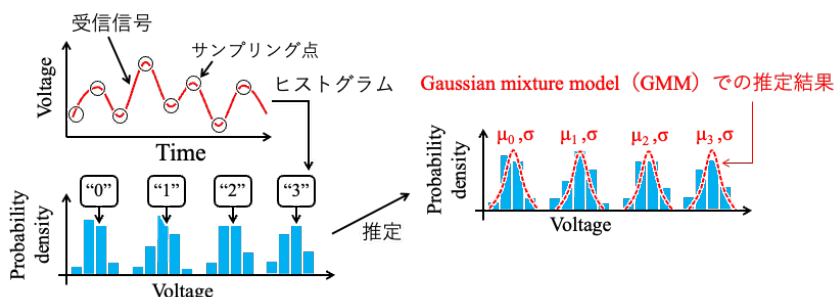


図4 PAM-4 伝送における受信端での伝送歪み評価の概要

図5に試作した評価用マイクロストリップ線路 (1 m) における 4 Gb/s PAM-4 における Eye パターンとその歪み評価の結果を示す。図5 (左図) のように Eye パターンが完全に閉じ、Eyeの開口率では伝送歪みの影響を定量的に評価することが困難であるが、本提案手法を用いることで受信端シンボルの頻度分布から各シンボルの分布を推定でき、Eyeが閉じた状態でも伝送歪み

をシンボル毎の平均値、分散値で定量的に評価できた。図5（右図）に示すように、送信シンボル情報に基づいて色分けした受信端シンボルの頻度分布と比較した結果、本提案手法で推定した結果にて十分な精度で各シンボルの分布を推定できた。

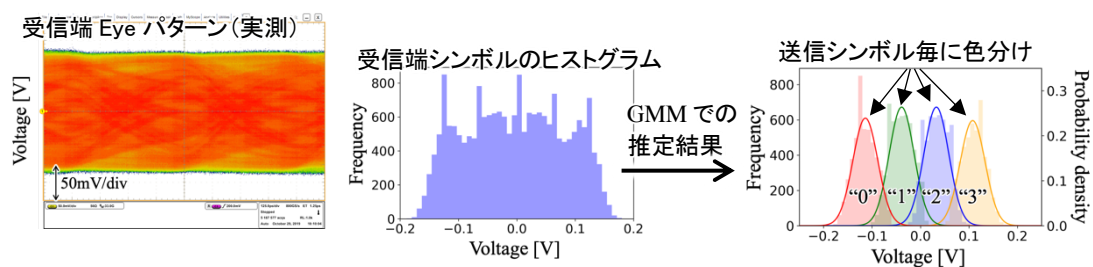


図5 開発した伝送歪み評価手法による実測評価（左：受信端 Eye パターン、中央：受信端シンボルの頻度分布、右：シンボル推定結果（折れ線：推定結果、棒グラフ：送信シンボル毎の頻度分布））

(3) 上記(2)成果の伝送歪み評価手法を適用し、開発したデジタル・アナログハイブリッド波形整形回路について伝送路環境に応じた自動パラメータ調整を実現した。受信端でサンプリングした情報のみを用い、歪み評価の結果にて Eye が完全に閉じた状況からのパラメータ調整を実施した。その結果、伝送路に応じたパラメータ調整を実現し、図6に示すようにパラメータ調整と共に受信端 Eye が改善でき、多値伝送における波形整形回路のリアルタイム調整手法の基礎技術を構築できた。

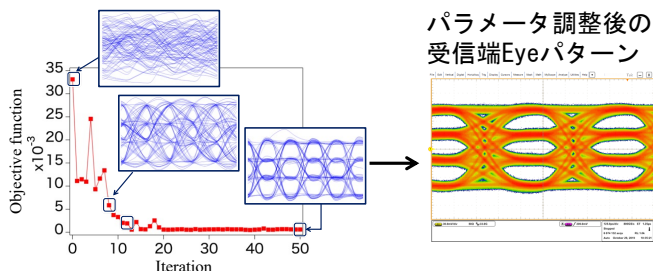


図6 提案手法による波形整形回路のパラメータ調整の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasushi Yuminaka, Yosuke 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 Communications 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 該当する

1. 著者名 Iijima Yosuke, Yuminaka Yasushi	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 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Waveform Shaping Transmitter Combining Digital and Analog Circuits for Multi-Valued Signaling
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iijima, K. Taya, 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 (TJCAS 2019)（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 第33回多値論理とその応用研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯島洋祐, 弓仲康史
2. 発表標題 多値高速伝送に向けたデジタル/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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Waveform Shaping Technique for Multi-Valued Data Transmission Combining Digital/Analog Equalization Circuit
3. 学会等名 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Keigo Taya, Yasushi 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 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keigo Taya, Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Evaluation and Optimization Method for Multi-Valued Transmission Equalizer Using Genetic Algorithm
3. 学会等名 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Efficient PAM-4 Data Transmission with Closed Eye using Symbol Distribution Estimation
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Keigo Taya, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 PAM-4 Eye-Opening Monitoring Techniques Using Gaussian Mixture Model
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic 2020 (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 Keigo Taya, Yasushi Yuminaka, Yosuke Iijima
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 System (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 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43回 多値論理フォーラム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>小山高専 電気電子創造工学科 情報通信エネルギー研究室ホームページ  <a href="https://www.oyama-ct.ac.jp/gakka/ee/faculty_list_ee_link/gkg-denki_07_lab/">https://www.oyama-ct.ac.jp/gakka/ee/faculty_list_ee_link/gkg-denki_07_lab/</a></p>
---

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
研究協力者	弓仲 康史  (Yuminaka Yasushi)		

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
---------	---------