

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：52201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11819

研究課題名（和文）超高速多値伝送に向けた統計的伝送歪み評価技術を駆使した多値符号判定手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Multi-Valued Symbol Detection Method Utilizing Statistical Evaluation Techniques for High-Speed Multi-Valued Data Transmission

研究代表者

飯島 洋祐 (Yosuke, Iijima)

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、大規模集積回路システム内の高速伝送手法として採用されるPAM(Pulse amplitude modulation)-4などの多値伝送方式に対して、新概念での多値符号判定手法の構築を検討した。特に、多値伝送特有のシンボル遷移パターンによる受信端特性の特徴に着目し、2次元マッピングによる新しい伝送評価方法と、それに基づく符号判定手法を検討した。本研究期間では、上記の実現に向けた要素技術を考察し、従来のアイパターン評価では符号判定が困難な状況下での符号判定の実現性を検討した。さらに、提案の符号判定手法に基づく高速伝送システムの構築に向けた基礎的評価を実施し、その有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高速な通信システムにおける通信品質の評価に用いられる従来のアイパターン評価に加えて、新たな評価手法を提案するものである。本研究の手法は、未知の送信データにて符号間干渉の影響を評価することができ、受信端でのサンプリング値のみを用いることから伝送システム上でのリアルタイムでの評価も期待できる。さらに、この評価手法に基づく新たな概念での伝送システムの構成に向けた要素技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated a novel multi-valued symbol determination method for high-speed transmission techniques within large-scale integrated circuit systems, focusing on the PAM-4 (Pulse Amplitude Modulation-4) data transmission scheme. We examined the unique symbol transition patterns of multi-level transmission and their impact on receiver characteristics. A new transmission evaluation method using two-dimensional mapping was developed, along with a corresponding symbol determination approach. Throughout the research, we explored the elemental technologies necessary for implementation and assessed the feasibility of symbol determination in situations where traditional eye pattern evaluation was challenging. We also conducted a fundamental evaluation of a high-speed transmission system based on the proposed method, demonstrating its effectiveness.

研究分野：デジタル信号処理

キーワード：高速デジタル伝送 多値伝送方式 伝送歪み 多値符号判定 統計的評価 2次元マッピング Linear mixture model

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体素子の高性能化およびイーサネットの大容量化に伴い、電気配線での超高速通信の要求は高まってきている。通信の大容量化に向け、従来の 0/1 の 2 値でのバイナリ伝送から 00/01/10/11 の 4 値での多値伝送方式である PAM (Pulse Amplitude Modulation) - 4 が採用されてきている。PAM-4 では 2 bit を 1 シンボルとして情報伝送が可能のため、同じ伝送速度でもナイキスト周波数をバイナリ伝送の 1/2 にできる。一方で、バイナリ伝送に比べてシンボル間隔が 1/3 になる事でノイズ耐性は悪化し、正確な閾値での符号判定のための SNR (Signal to noise ratio) の改善が問題となる。特に、通信の高速化に伴って増加する電気配線上での信号減衰と符号間干渉等の影響がこの問題を深刻化させている。

上記の背景に対し、計算機システムの高性能化やアプリケーションの多様化によって、高速伝送技術への要求は複雑化してきている。本研究では多値伝送における伝送歪みの特徴に着目し、その特徴に基づく高速伝送の多値化に対応した新たな伝送技術の要素技術開発を進める。

2. 研究の目的

本研究では、統計的手法による受信端歪み評価技術を応用し、受信端でのシンボル値から得られる伝送歪みの特徴に着目し、その特徴に基づくシンボル判定手法の構築と、その基礎的評価および回路実装方法などの要素技術確立を目的とする。

申請者のこれまでの検討から、伝送歪みの影響を受けた受信端シンボル値のばらつき分布が混合ガウス分布で近似可能な点に着目し、観測した受信信号から統計的手法を駆使した受信シンボルの分布解析に基づく新たなシンボル判定手法を新規の着眼点とする。本研究では、伝送歪みの影響で受信端でのアイパターンが完全に閉じ、従来の閾値での符号判定が困難な状況においても、伝送歪みを許容した上での統計的な特徴に基づく多値シンボルの分類および判定を検討する。この新概念にて、受信端で完全な歪み除去の必要がない、符号間干渉を許容した上での高速伝送システムの実現を目指し、受信端 SNR の改善要求が減ることで波形整形処理の簡素化やハードウェア実装コストの低減等への貢献を目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、PAM-4 での多値伝送に対して、多値伝送に特有な受信端歪みの特徴に基づくシンボル判定手法の検討、およびそれに基づく高速伝送システムの要素技術について、以下のサブテーマに分けて検討した。

(1) 受信端多値シンボル分布に基づく PAM-4 シンボル判定手法の開発

一般的な伝送波形の評価手法として用いられるアイパターンは、受信端での受信波形に基づいて生成され、伝送波形を評価できる。これに対して、本研究では受信端での受信シンボル値の統計的な特徴を用いた伝送評価、および PAM-4 シンボル判定手法の検討を行う。特に、多値伝送特有のシンボル遷移パターンに着目し、その特徴に基づく PAM-4 シンボルの判定手法に向けた基礎検討を実施し、その要素技術を構築する。

(2) 提案シンボル判定手法に基づく高速伝送システムの構築

波形整形手法である FFE (Feed Forward Equalizer) を用いる高速伝送システムでは、受信端での伝送波形における符号間干渉を除去し、受信端でのアイパターンを改善できる。本研究では、受信端シンボル分布の改善を主目的とし、PAM-4 伝送を対象とした多値シンボル遷移パターンの特徴によるシンボル判定手法に基づく高速伝送システムの基礎的考察を実施し、その効果を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 受信端多値シンボル分布に基づく PAM-4 シンボル判定手法の開発

従来のアイパターンでの評価では、符号間干渉の影響でアイが完全に閉じた状況ではシンボルを分類、判定する事が困難である。アイパターンを改善するには、FFE などの波形整形手法によって受信端での符号間干渉を除去する必要がある。本研究では、受信信号を伝送レートでサンプリングした値を 2 次元にプロットした 2 次元マッピングでの新たな伝送評価手法を実現し、それに基づくシンボル判定手法を開発した。図 1 に示すように、2 次元マッピングでは前後のサンプリング値に応じて 2 次元マップ上にプロットする。2 次元マッピングを用いることで、アイ

パターンが完全に閉じた状況でも、受信シンボルの特徴を2次元マップ上で可視化する事ができ、シンボルの分類が実現可能な事を明らかにした。

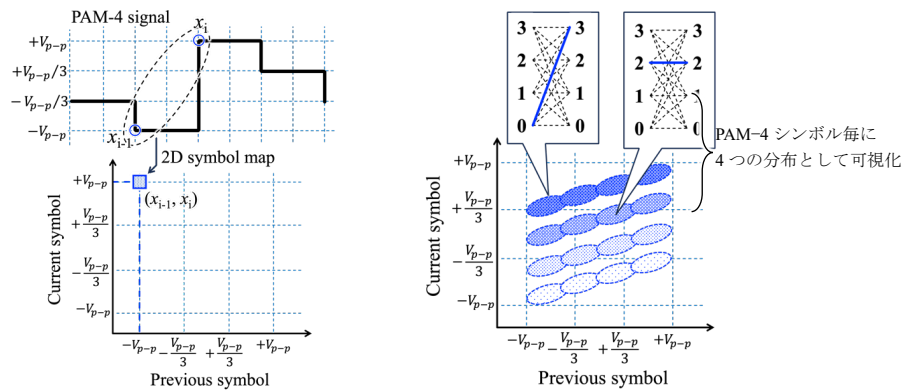


図1：2次元マッピングの原理と多値伝送評価の概要

さらに、2次元マッピングでのシンボル判定の実践的検証として、図2に示す評価システムを構築し、実測でのシンボル判定を検証した。本研究では、受信信号から2次元マップ上でのシンボル分布の特徴をLinear mixture model (LMM) にてモデル化し、LMMで特徴化した多値伝送の特有のシンボル遷移パターンから未知の受信端シンボルの判定手法の検討を行った。

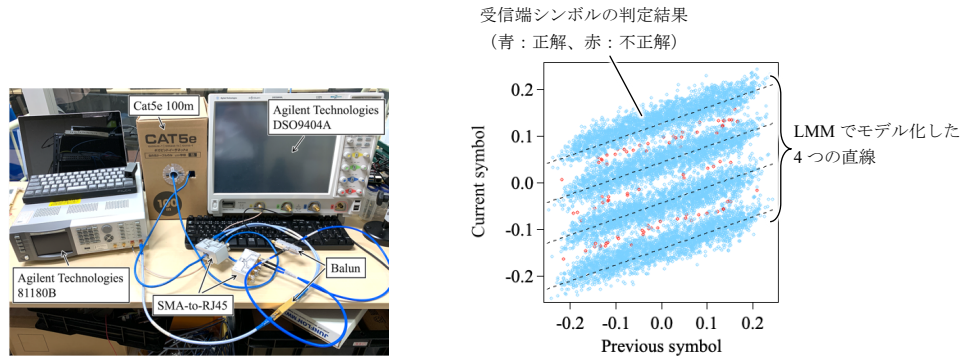


図2：2次元マッピングによる評価システムとシンボル判定の実測評価

(2) 提案シンボル判定手法に基づく高速伝送システムの構築

2次元マッピングでの符号判定を基準とした高速伝送システムとして、従来のFFEを用いた伝送システムをベースとした高速伝送システムの実現を考察した。具体的には、2次元シンボルマップ上でのシンボル判定に基づく高速伝送システムの構成およびFFE係数設定方法を検討した。図3に示すように、送信側FFEの係数設定にて2次元マップ上でのシンボル分布を制御可能であることを検証し、2次元マップ上でのバラツキを抑制できる事を明らかにした。これによって、図3に示す2次元マップ上での正確なシンボル判定が可能になる。さらに、2次元マップ上でのバラツキ低減を調整した結果、FFE適用後の受信端でインパルス応答は指数関数的な特徴を示す事を明らかにし、その原理検証および具体的なFFE係数設定方法の要素技術を検討した。

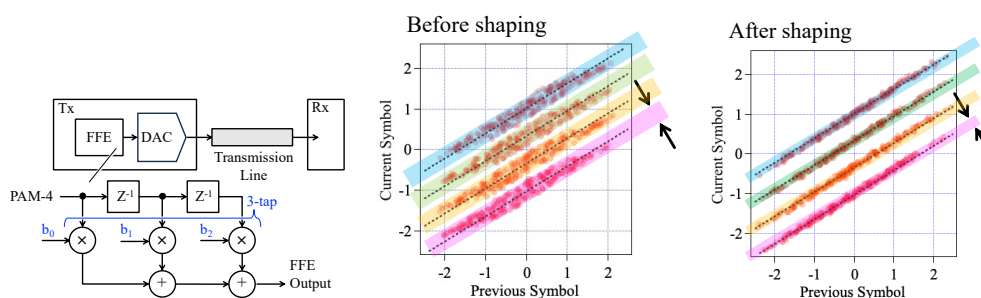


図3：2次元マッピングでのシンボル判定に基づく波形整形による伝送システム

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Efficient PAM-4 Symbol Estimation Using Soft Clustering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Logics	6. 最初と最後の頁 675-690
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 Yosuke IIJIMA , Atsunori OKADA , Yasushi YUMINAKA	4. 巻 Vol. E107-D, No. 8
2. 論文標題 Evaluation of Multi-valued Data Transmission in Two-Dimensional Symbol Mapping using Linear Mixture Model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Information and 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） 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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 中嶋 一晴、弓仲 康史、飯島 洋祐
2. 発表標題 受信シンボルの3次元マッピングによるPAM-4信号伝送品質評価
3. 学会等名 第45回多値論理フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Kazuharu Nakajima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Evaluation and Symbol Classification of Multi-Valued Signaling Using Two-Dimensional Symbol Mapping with Linear Mixture Model
3. 学会等名 2023 IEEE 53rd International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Yuminaka, Kazuharu Nakajima, Yosuke Iijima
2. 発表標題 PAM-4 Data Transmission Quality Evaluation Using Two- and Three-Dimensional Mapping of Received Symbols
3. 学会等名 2023 IEEE 53rd International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中嶋 一晴 , 弓仲 康史 , 飯島 洋祐
2. 発表標題 受信シンボルの2次元マッピングによるPAM-4信号の符号間干渉評価
3. 学会等名 第12回 電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2022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 2021 IEEE 51st International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Kazuharu Nakajima and Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Two-Dimensional Symbol Mapping for Evaluating Multi-Valued Data Transmission Quality
3. 学会等名 2022 IEEE 52st International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukihiro Sugiyama, Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Experimental Results of Symbol Classification Using Two-dimensional Mapping on FPGA
3. 学会等名 32nd International Workshop on Post-Binary ULSI System (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡田篤典, 飯島洋祐, 弓仲康史
2. 発表標題 多値遷移特徴に基づく波形整形手法に関する検討
3. 学会等名 第37回多値論理とその応用研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Kazuharu Nakajima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Evaluation and Symbol Classification of Multi-Valued Signaling Using Two-Dimensional Symbol Mapping with Linear Mixture Model
3. 学会等名 2023 IEEE 53rd International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Yuminaka, Kazuharu Nakajima, Yosuke Iijima
2. 発表標題 PAM-4 Data Transmission Quality Evaluation Using Two- and Three-Dimensional Mapping of Received Symbols
3. 学会等名 2023 IEEE 53rd International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yosuke Iijima, Atsunori Okada, and Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Equalization for Compensation of Intersymbol Relationship of Multi-Valued Signaling Using Two-Dimensional Symbol Mapping
3. 学会等名 2024 IEEE 54th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yasushi Yuminaka, Hayate Hasegawa, Nagito Ishida, and Yosuke Iijima
2. 発表標題 Specialized Waveform Equalization Techniques for Multi-Valued Data Transmission
3. 学会等名 2024 IEEE 54th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Atsunori Okada, Yosuke Iijima, Yasushi Yuminaka
2. 発表標題 Multi-valued transmission evaluation by two-dimensional mapping using a digital oscilloscope
3. 学会等名 33rd International Workshop on Post-Binary ULSI Systems (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小山工業高等専門学校 電気電子創造工学科 情報通信エネルギー研究室 https://www.oyama-ct.ac.jp/gakka/ee/faculty_list_ee_link/gkg-denki_07_lab/ 情報通信エネルギー研究室 https://www.oyama-ct.ac.jp/gakka/ee/faculty_list_ee_link/gkg-denki_07_lab/

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