

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 08001

研究開発課題名 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発

(1) 研究開発の目的

エラーフリーPOF により、多値変調方式による 1 レーン 50 Gbps 級のデータ通信を、現在必要とされている FEC (Forward error correction) 等の誤り訂正機能を用いずに実現する通信技術の確立を目指す。さらに、エラーフリーPOF の一括成型による多心化技術を確立する。既存の誤り訂正方式を採用した通信システムとの性能比較を行い、信頼性、転送性能、消費電力、通信遅延等の点において、エラーフリーPOF 伝送システムが優れていることを実証する。

(2) 研究開発期間

令和 6 年度から令和 7 年度 (2 年間)

(3) 受託者

学校法人慶應義塾<代表研究者>

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 6 年度 100 百万円

※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発 (学校法人慶應義塾)

研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立

研究開発項目 1-b) エラーフリーPOF のための新規光トランシーバーの開発

研究開発項目 1-c) Beyond 5G に向けた分散 MEC 環境の構築

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	5	5
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	19	19
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	6	6
	受賞・表彰	3	3

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1 エラーフリーPOF による革新的通信システムの開発

研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立

本年度は、マルチコアシートの多心化技術の研究開発項目に取り組み次の成果を得た。

- ・マルチコアシートの試作及び改良により、①断面形状とコア・クラッド配置精度の向上、②GI 分布制御の実現、③連続生産性の向上を達成した。

具体的には、①は、コア、クラッド、オーバークラッドの合流するダイスの流路設計を改良し、マルチコアシート試作ダイス改良を繰り返し行うことでマルチコアシートの矩形断面及びコア・クラッドの配置精度向上を確認した。②は、新規拡散管を設計し、拡散管の長さや温度条件を変えることで、GI 分布の制御を行い、理想的な拡散分布を制御する条件を見出した。③は、マルチコアシート量産化を見据えて、窒素ガス圧と、コア、クラッド、オーバークラッド、拡散管の温度条件を検討し、気泡混入のない連続成型技術の向上を達成した。

- ・マルチコア GI POF の PAM4 伝送特性評価

上記試作と並行して、本研究室が開発してきた円形マルチコア GI-POF (61 心) の PAM4 伝送特性を評価し、コア間でばらつきのない FEC 無しエラーフリー伝送として当初目標である 1 レーン 53.125 Gb/s PAM4 伝送を確認した。さらに、最先端データセンター向けの 1 レーン 106.25 Gb/s PAM4 伝送の実証に初めて成功した。

- ・新規 MT コネクタの提案

マルチコアシート用の新規 MT (Mechanically Transferable) コネクタの試作を行い、市販の MT コネクタ製品に比べ、コスト優位性のあるマルチコアシート用新規 MT コネクタを提案した。

研究開発項目 1-b) エラーフリーPOF のための新規光トランシーバーの開発

本年度の研究開発において、以下の成果を得た。

- ① エラーフリーPOF の優位性の原理実証
- ② 多レーンでの FEC 無しエラーフリー伝送の実証

まず、①について、53.125 Gbps の PAM4 伝送評価環境を構築し、エラーフリーPOF の雑音耐性を評価した。その結果、石英系マルチモード光ファイバと比較し、同条件下でビットエラーレートを 4~5 桁以上低減できることを実証した。この結果は、エラーフリーPOF を用いることで、石英系マルチモード光ファイバに必要な高価かつ煩雑なノイズ対策なしに、安定した高品質なデータ伝送が可能であることを示している。この特性は、光トランシーバー設計において、性能とコストの両面で大きな優位性をもたらす。本成果は、光通信分野で最も権威のある国際会議 OFC 2025 に採択された。

次に、②について、QSFP 光トランシーバー等を想定した多レーンでのエラーフリー伝送を実証するため、多心エラーフリーPOF ケーブルを試作した。このケーブルでは、最大 12 本のエラーフリーPOF を VCSEL のピッチ間隔 (250 μm) に高精度に位置合わせできる構造を採用している。本ケーブルを 200G QSFP (50 Gbps PAM4 $\times$ 4 レーン) に接続し、各レーンのビットエラーレートを測定した結果、すべてのレーンで FEC 等の誤り訂正を適用せずとも、ビットエラーレートが 10^{-12} を下回り、エラーフリー伝送を達成したことを確認した。以上により、本年度の目標である多レーンでのエラーフリー伝送の実証を達成した。

- ✓ エラーフリーPOF 用ネットワークチップの設計および検証を行う。

本項目では、エラーフリーPOF 用 codec を研究開発し、スループット向上、通信遅延削減、低消費電力を実現する。エラーフリーPOF 用ネットワークチップにおいては、Ethernet 互換 codec と、エラーフリーPOF の性能を最大限に発揮する新規設計の POF 専用 codec を選択可能にし、また誤り検出機能や訂正機能の有無を自由に設定可能にすることで多様な検証を可能にする。今年度はネットワークチップ試作用に FPGA を用いた通信回路検証環境の整備を行い、FPGA ボード上で 53.125 Gbps (26.5625 Gbaud PAM4) での通信が可能であることを実機にて確認した。また通信環境の検証としてエラーパターン (PRBS31) と、実際の通信を模した Ethernet 信号パターンを用いてビットエラーレート(BER)の測定を行った。その結果、BER が 10^{-15} 以下という極めて低い BER を実機(FPGA ボード)にて確認した。また、符号化率 99%程度のスループットが極めて高く低消費電力を実現するエラーフリーPOF 用 codec の設計を行い、設計した POF 用 codec を用いて実機(FPGA ボード)上で通信評価を行った。

- ✓ 開発したシステムで転送試験を行い、その時点で可能なソフトウェアシステムの構築を行う。

MEC 構築においては、場所・電力・処理能力の制約が大きく、エラーフリーPOF を用いた、集約マイクロクラスタが想定される。MEC においては、ソフトウェア更新が MEC に集約されるが、問題となるのは、暗号化処理である。端末とクラウドが TLS など暗号化通信を行っている場合、通常は MEC でサービスを処理できない。透過的なアドオンを効果的にデプロイするには、通信をエッジでやはり透明に復号化する必要がある。そこで、クラウドと MEC サービスが結託し、通信に用いている秘密暗号鍵を MEC サービスと別の TLS セッションで共有することで、ネットワークストリームコンテンツにアクセスできるようにする仕組みを構築した。この仕組みは TLS1.3 に対応しており、安全に処理することが可能である。この仕組みを構築することで、2 つの新たな問題が提起された。一つが、処理遅延の問題、一つが、一度鍵を共有すると、いつまでもデコードすることが可能となり、そのデコード権限を別途はく奪する手法が追加が必要となることである。まず、遅延については DPDK などの技術により、ネットワークパスにルーターを 1 つ追加することによる遅延と同等の 200μ 秒であり、当該機構が遅延において大きな障害とならないことがわかった。また、権限を得た MEC に対して、そのダウンストリームとアップストリームにある 2 つの対となる MEC が、クラウドからの指示により新たな TLS1.3 セッションを構築、2 重に暗号化することで、権限をはく奪したい MEC がデコードできない状態とし、その後、元々の 1 重目の鍵が交換された後に、新たに構築した 2 重目の暗号化を解除すると、MEC はデコード可能な鍵を持たないため、権限がはく奪されるという仕組みを構築、そのプロトコルも決定した。この時、対となる MEC は当該ストリームのデコード権限を獲得しない点も重要である。これらの研究成果は、それぞれ IECON2024 および POF2024 で発表されている。

(8) 今後の研究開発計画

令和 7 年度の年度計画は以下の通りである。

- 研究開発項目 1-a) エラーフリーPOF の多心化技術の確立
 - ✓ マルチコアシートの規格化を進める (IEC 60793、IEC 60794 等)。
 - ✓ 新規 MT コネクタの規格化を進める (IEC 61754 等)。
- 研究開発項目 1-b) エラーフリーPOF のための新規光トランシーバーの開発
 - ✓ エラーフリーPOF 用新規光トランシーバーの規格化を進める (IEEE 802.3、MSA 等)。
- 研究開発項目 1-c) Beyond 5G に向けた分散 MEC 環境の構築
 - ✓ エラーフリーPOF のための通信方式 (Codec) の規格化を進める (IEEE 802.3、MSA、IEC 等)。
 - ✓ エラーフリーPOF を利用したマイクロ分散データセンターのプロトタイプ上で、この機能を実証できる AI アプリケーションを実装し、全体としての性能、コスト、信頼性、電力を評価する。
 - ✓ エラーフリーPOF 用ネットワークチップの設計および検証を行う。