

2025 年度 高度通信・放送研究開発委託研究

課題 242

結合モードを用いた空間多重伝送のための
多重数フレキシブルなソフトウェアによる
並列信号処理技術の研究開発

研究計画書



1. 研究開発課題

『結合モードを用いた空間多重伝送のための多重数フレキシブルなソフトウェアによる並列信号処理技術の研究開発』

2. 目的

半導体プロセスの微細化に伴い、専用集積回路(ASIC)に搭載可能なトランジスタ数は年々増加している。その一方、ASIC の開発コストや開発期間は増加の一途であり、無線などの分野ではその処理をソフトウェアへ切り替える流れがある。一方、既存のシングルモード光ファイバ(SMF)を用いた従来の光通信システムの物理的伝送容量限界（キャパシティクラッシュ）を克服する空間多重光通信システムにおいては、スケーラブル・フレキシブル（スケール限界以下で空間多重数を柔軟に変更可能）な空間多重数の拡張性が求められている。従来の光通信システムにおいては、デジタルコヒーレント信号受信用の信号処理を ASIC で実装してきたが、ASIC の微細化・大規模化に伴い開発リソースが急激に増大している。本課題では、GPGPU などの汎用計算機を用いた実装と並列計算性能向上を併用することで ASIC の開発リソース等を大幅に削減し将来の大容量光通信システム実現に資する光送受信信号処理基盤技術の確立をめざす。これまで国立研究開発法人情報通信研究機構（以下、「機構」という。）で研究論文の取組として行ってきた GPGPU を用いた光ネットワークの構成要素の実装方式について、商用ネットワークで使用可能な精度・安定性を確保しつつ導入障壁となるリソースを大幅に下げるための汎用計算機を用いた信号処理基盤の委託研究を行う。

3. 内容

本研究では、結合モード（数モードファイバ、結合マルチコアファイバなど）におけるモード分離に MIMO（Multiple-Input-Multiple-Output）信号処理を用いるスケーラブル・フレキシブルな空間多重光ファイバ通信における信号処理を、並列計算性能に優れる GPGPU や CPU などの様々な信号処理回路の適用領域の開拓として、汎用計算機で動作可能なソフトウェアとして実装可能にする空間多重数フレキシブルな並列信号処理技術の研究開発を行う。具体的には、機構で研究を進めている光ファイバ通信の信号処理向け GPGPU の実装をベースにした技術・知見等¹を利用して、結合モードを用いた空間多重伝送方式に拡張した信号処理システムの社会実装を目指した基盤技術に関する研究開発を実施する。将来的に空間多重システムに要求される 4 コア（ファイバコア）以上の空間多重数スケール性を鑑みた場合、空間多重システム特有の効率化手法の検討、および、単純に並列するだけではスケール出来ない信号処理ブロックへの対応について新たな検討も行う。

結合チャネルに対する空間多重数フレキシブルな信号処理回路アーキテクチャの確立と、実装する MIMO 信号処理を含む各信号処理ブロックの安定動作技術の確立を目指すために以下の研究開発を行う。なお、検討に当たっては ASIC による実装やアーキテクチャに対する、少なくとも開発リソースや消費電力などの面で有益性を検討すること。

研究開発項目 1 汎用/AI サーバを活用した柔軟な送受信信号処理技術の研究開発

¹ 機構が有する技術・知見等については、必要に応じて「応募要領」の「14 問い合わせ先」まで問い合わせること。

汎用/AI サーバの計算リソースと親和性の高い MIMO 信号処理・空間チャネル活用技術を確立する。GPGPU に代表される AI サーバだけでなく無線信号処理用サーバなども実用化されており、それらを総合的に検討した上で、構成およびそれに適した信号処理技術を研究開発する。なお、少なくとも空間多重数 4 までスケール可能なソフトウェア実装による計算機構成を考慮する。

研究開発項目 2 空間/周波数冗長を利用した超並列信号処理技術の研究開発

空間チャネルの結合性とサブキャリア化による空間/周波数冗長性に対し、汎用計算機が有する超並列処理機能を適用することで各 DSP 機能の効率化による信号処理回路規模削減を行い、結合チャネルに対する MIMO 信号処理を含む各信号処理ブロックの信号処理制御ループが外れることなく安定して動作する技術の確立を目指す。

4. アウトプット目標

研究開発期間終了時までに達成すべき目標は下記のとおりとする。

研究開発項目 1 汎用/AI サーバを活用した柔軟な送受信信号処理技術の研究開発

2025 年度末までに、結合モードを用いた空間多重フレキシブルな MIMO 信号処理技術の設計指針の確立、ならびに、少なくとも空間多重数 4 までスケール可能なソフトウェア実装による計算機構成を提案し、シンボルレートに対するスケール性を明確化すること。

2027 年度末までに、少なくとも空間多重数 4 までスケール可能かつ伝送距離 6000km まで対応可能な MIMO 信号処理ソフトウェア実装技術を確立すること。また本信号処理技術に対応するプロトタイプを構築し、MIMO 信号処理の空間多重数におけるスケーラビリティを実証し、汎用計算機を用いてこれまでに報告されている単一コア単一モードファイバでの 1Gbaud 信号処理と比較して 10 倍以上のスループットを達成すること。

研究開発項目 2 空間/周波数冗長を利用した超並列信号処理技術の研究開発

2025 年度末までに、効率的な並列信号処理方式を実装可能な汎用サーバ処理適用信号処理ブロックの選定を行うこと。

2027 年度末までに、選定した信号処理ブロックに対して各空間多重数用信号処理回路の単純実装時の回路規模を 1 として基準として、空間多重数を N としたときに $1/N$ 以上の信号処理回路規模削減化を達成可能な並列信号処理方式の提案、選定を行い研究開発項目 1 のソフトウェア実装プロトタイプへの統合化のための供与を完遂すること。

5. アウトカム目標

2030 年 実用化に向けて結合型の空間多重伝送システムの実現に必須となる周辺技術の研究開発を完了

2033 年 実際の光海底ケーブルを活用した信頼性検証、実用化検証、量産体制の構築完了

2035 年 結合型の空間多重伝送システムの実用化/商品化を実現

6. 採択件数、研究開発期間及び研究開発予算等

採択件数 : 1 件

研究開発期間：2025 年度（契約締結日）から 2027 年度

研究開発予算：各年度、総額 100 百万円（税込）を上限とする。

（提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。）

研究開発体制：単独の提案も可能であるが、産学官連携等による複数の実施主体からなる体制とすることを推奨する。その際、社会実装を考慮した体制とすること。

7. 提案に当たっての留意点

- 具体的目標に関しては、定量的に提案書に記載すること。
- 研究開発成果の情報発信を積極的に行うこと。
- 実施体制については、本研究開発の目的に則した実施体制を構築することとし、それぞれの役割を明記すること。
- 本研究開発成果の社会実装に向けて、アウトカム目標の項目に記載したマイルストーンを意識しつつ、具体的な時期（目標）、体制、方策等を記載すること。その際、持続的に自走するための計画等についても記載すること。

8. 運営管理

- 機構と受託者の連携を図るため、代表提案者は、プロジェクトオフィサーの指示に基づき定期的に連絡調整会議を開催すること。また、随時、コメント・要請に対応すること。
- 複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の運営管理を行い、受託者間調整会議を定期的に行うこと。
- 社会情勢や研究環境の変化等、必要に応じて、プロジェクトオフィサーが研究計画書を変更する必要があるので、留意すること。

9. 評価

- 機構は、2026 年度に中間評価を実施する。本評価結果により、当該年度で本委託研究を終了する場合がある。
- 機構は、2027 年度に終了評価を実施する。また、機構は、本委託研究終了後に成果展開等状況調査を行い、追跡評価を行う場合がある。
- 機構は、上記以外にも本委託研究の進捗状況等を踏まえて、臨時にヒアリングを実施することがある。

10. 成果の社会実装等に向けた取組

- GPGPU や汎用計算機の性能指数動向や空間多重ファイバ技術の研究開発の進捗状況を考慮しつつ、社会実装に向けた出口戦略を立案すること。
- 上記の出口戦略を実現するため、本委託研究で得られた成果の権利化、対外成果発表、成果

展示を通し、本課題の技術開発方針の妥当性を検証しつつ、成果の普及・社会実装等に向けて必要な取組を行うこと。

- 産学官連携体制の構築、研究開発の成果を参加企業等が社会実装にむけた枠組み形成に努めること。

11. プロジェクトオフィサー

ネットワーク研究所 フォトニック ICT 研究センター 淡路祥成

参考

[1] "Field Trial of a Flexible Real-time Software-defined GPU-based Optical Receiver," J. Lightwave Technol., vol. 39, no. 8, pp. 2358-2367, Apr. 2021.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9317695>

[2] "Real-Time 10, 000 km Straight-Line Transmission Using a Software-Defined GPU-Based Receiver," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 24, pp. 1519-1522, Dec. 2021.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9625945>

[3] "Real-time transmission of geometrically-shaped signals using a software-defined GPU-based optical receiver," Opt. Express, vol. 30, no. 15, pp. 27171-27179, Jul. 2022.

<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-30-15-27171&id=478818>

[4] "GPU-Based, Real-Time, Optical Subcarrier Multiplexing Directed Towards Distributed Neural Network Computing," European Conference on Optical Communication (ECOC2024), W4B.2, Frankfurt, Sep. 2024.

[5] "First real-time coherent MIMO-DSP for six coupled mode transmission," IPC 2015, PD4.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7323761>

[6] "Real-time strongly-coupled 4-core fiber transmission," OFC 2020, Th3H.2.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9083612>

[7] "Long-haul coupled 4-core fiber transmission over 7,200 km with real-time MIMO DSP," JLT 40(6), 1640 (2022).

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9699079>

[8] "Real-time MIMO transmission over field-deployed coupled-core multi-core fibers," OFC 2022, Th4B.8.

<https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ofc-2022-Th4B.8>

[9] "Real-time implementation of coherent receiver DSP adopting stream split assignment on GPU for flexible optical access systems," JLT 38(3), 668 (2020).

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8884709>