

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 01001

研究開発課題名 Beyond 5G 時代に向けた空間モード制御光伝送基盤技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

B5G 時代の超高速無線アクセスシステムを支える大容量・長距離基幹光ネットワークを実現する空間多重光伝送システムにおいて、空間モードを制御可能な標準クラッド外径を有する結合型マルチコア光ファイバ (MCF : Multicore Fiber) / ケーブル設計・実装・接続技術と、それに適合する光増幅中継技術、加えて、伝送リンクの動的変動に追従可能な新たな低負荷 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号処理技術を検討することで、空間多重数 4 かつ 3000 km 以上の伝送距離に相当する領域に適用可能な空間モード制御光伝送基盤技術の確立を目指す。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

日本電信電話株式会社<代表研究者>

住友電気工業株式会社

日本電気株式会社

古河電気工業株式会社

学校法人千葉工業大学【令和 3 年度 ～ 令和 5 年度】

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 6 年度までの総額 1,520 百万円 (令和 6 年度 300 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) 空間モード制御光ファイバ実装技術

項目 1-a) ケーブル伝送路設計・実装技術 (日本電信電話株式会社)

項目 1-b) ケーブル伝送路接続・構築技術 (住友電気工業株式会社)

研究開発項目 2) 長距離ダイナミック低負荷 MIMO 処理構成基盤技術

項目 2-a) 低負荷ダイナミック MIMO 信号処理方式基盤技術 (日本電信電話株式会社)

項目 2-b) 長距離 MIMO 処理検証基盤技術 (日本電気株式会社)

研究開発項目 3) 空間モード多重光増幅中継基盤技術

項目 3-a) 空間モード制御伝送統合検証技術 (日本電信電話株式会社)

項目 3-b) 空間モード多重光増幅設計・評価技術 (古河電気工業株式会社)

項目 3-c) 空間モード多重伝送コネクタ設計・評価技術 (学校法人千葉工業大学)【令和 3 年度 ～ 令和 5 年度】

(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	19	5
	外国出願	30	11
外部発表等	研究論文	12	5
	その他研究発表	91	21
	標準化提案・採択	13	3
	プレスリリース・報道	4	1
	展示会	6	1
	受賞・表彰	2	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1) 空間モード制御光ファイバ実装技術

研究開発項目 1-a) ケーブル伝送路設計・実装技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

4 ～ 10 程度のコア数を有する結合型 MCF を実装したケーブルにおいて、空間モード分散（SMD：Spatial Mode Dispersion）係数（特性目標：SMD 係数 $<20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ）の制御性を実証、ならびに試作した長尺ケーブルを用いて、空間モード制御光ケーブル伝送路を構築し、項目間統合連携実験用として提供する。

【最終成果】

- ①ステップ型構造に加え、低屈折率領域を有する W 型構造の結合型 MCF における曲げ損失・漏えい損失・遮断波長のコア数依存性、および各屈折率構造の結合型 MCF 設計領域を明らかにした。
- ②ケーブル実装技術について、バンドルテープを用いた実効的な曲げ半径・ねじれの制御を活用し、4・8・12 コア MCF を実装した短尺（1 km）ケーブルを用いて、ケーブル構造の最適化による広波長域な SMD 低減効果を確認した。
- ③結合型 4・12 コア MCF を実装した長尺（5 km）ケーブルを試作し、フィールド検証設備への敷設用として提供した（研究開発項目 3-a と連携）。ケーブル敷設後の基本特性を評価し、最終目標である $20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下の SMD 係数を実証した。さらに、損失・SMD 係数特性のフィールド環境における季節変動評価を完了し、長期安定性を確認した。
- ④研究開発項目 2-a・2-b 連携検討用 12 コア MCF 素線の試作を行い、ファンイン・ファンアウト(FI/FO:Fan-In/Fan-Out)を含めて低損失・低モード依存損失(MDL:Mode Dependent Loss)な線路を構築し、研究開発項目 2 における検討を加速した。

研究開発項目 1-b) ケーブル伝送路接続・構築技術（住友電気工業株式会社）

【最終目標】

4 ～ 10 程度の空間モードの制御性を有する融着接続およびファイバ設計を、数 10 km 超の伝送長で実証する。特性目標：接続ファイバにおけるモード依存損失（MDL：Mode Dependent Loss） $<1.0 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ 。さらに、上積み最終目標として、海底用途へも適用可能な引張りずみ 2 % 以上に耐える高強度と $\text{MDL} \leq 0.5 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ を実証する。

【最終成果】

- ①融着接続装置を開発して 4・8・12 コア MCF の融着接続を行い、 $\text{MDL} \leq 0.1 \text{ dB}/\text{接続}/4 \text{ コア}$ を実証するとともに、結合型 12 コア MCF およびこれを実装したケーブルの融着接続を研究開発項目 1-a・3-a と連携して行い、31 点の接続において $\text{MDL} \leq 0.13 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ を 68.5 km の伝送長で実証し、当初の最終目標を達成した。
- ②さらに、海底用途へも適用可能な引張りずみ 2.1 % の高強度接続を 30 接続実施し、 $\text{MDL} \leq 0.11 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ を実証し、上積み最終目標も達成した。

研究開発項目 2) 長距離ダイナミック低負荷 MIMO 処理構成基盤技術

研究開発項目 2-a) 低負荷ダイナミック MIMO 信号処理方式基盤技術 (日本電信電話株式会社)

【最終目標】

10 空間モード程度までスケールかつ 3000 km 程度の長距離陸上システムで発生するチャネル動的変動に追従可能な信号処理構成・アルゴリズムの提案およびオフライン評価による方式選定を行う。また、時間と空間の両軸がスケールされた MIMO 信号処理構成において、既存のシングルモード光ファイバ (SMF : Single Mode Fiber) リンクにおけるデジタルコヒーレント信号処理回路と同等以上の動的追従性能の確保を可能にする、空間多重数 4 以上の結合型 MCF リンクにおいて動的追従速度 25 kHz まで対応可能な MIMO 処理構成基盤技術の検討を行う。

【最終成果】

- ①低負荷かつ高速追従を指向した種々の MIMO 信号処理構成を提案し、性能の実験検証を行った (世界最長 10 モード 1560 km 伝送の実現などを含む)。一部の実験については、研究開発項目 1-a との連携の下、ケーブル化された結合型 MCF 伝送路にて性能向上を実証した。
- ②研究開発項目 2-b との連携の下、特にリアルタイム実装に適したアルゴリズムである回路遅延補償バッファによる追従性向上方式と、帯域外除去による計算負荷低減方式を選定した。研究開発項目 1-a・1-b・2-b・3-a・3-b との連携の下、34 km のフィールド敷設された空間多重数 12 のケーブル伝送路において、提案方式の有効性を確認したほか、40 kHz までの動的変動下での信号伝送追従性を実証した。

研究開発項目 2-b) 長距離 MIMO 処理検証基盤技術 (日本電気株式会社)

【最終目標】

10 程度の空間多重数かつ 6000 km 程度の海洋横断級の結合型 MCF 伝送システムにおいて、空間多重チャネルあたり 1 Tbps 程度のスループットで動作する MIMO 信号処理、および MIMO 伝送システムの基盤を実現する。また、10 程度の空間多重数を処理する MIMO 信号処理の LSI (Large Scale Integration) 用アーキテクチャを検討し、回路への実装性や空間多重数に対するスケール性を明確化する。

【最終成果】

- ①研究開発項目 1-a・2-a との連携の下、結合型 12 コア MCF 長距離伝送実験で、当初の目標を上回る、1.2 Tbps 空間多重信号の 9360 km までの FEC (Forward Error Correction) 後エラーフリー伝送を確認した。
- ②長距離伝送で重要となる MDL 耐力向上のため、非線形演算を含む MIMO 受信アルゴリズムを開発した。
- ③MIMO 信号処理の計算量低減に向けて、低サンプリングレート動作に基づいた周波数領域適応 MIMO フィルタを提案した。10000 km 級結合型 MCF 長距離伝送向けの MIMO 信号処理を含む信号処理の計算量見積りを行い、SMF 伝送向け 2×2 MIMO を含む 130 GBaud 用信号処理を基準として、結合型 4 コア MCF 向け 32 GBaud 用信号処理で同程度、結合型 12 コア MCF 向け 32 GBaud 用信号処理で約 3.7 倍の計算量となることを確認し、回路実装性を明確化した。
- ④研究開発項目 2-a との連携の下、FPGA (Field-Programmable Gate Array) 上で動作する研究開発項目 2-a・2-b 方式の MIMO 信号処理リアルタイム検証プラットフォームを構築し、項目間統合連携実験でのリアルタイム動作および結合型 12 コア MCF 長距離伝送でのセミリアルタイム動作を実証した。

研究開発項目 3) 空間モード多重光増幅中継基盤技術

研究開発項目 3-a) 空間モード制御伝送統合検証技術 (日本電信電話株式会社)

【最終目標】

空間多重光増幅中継伝送リンクを構築し、動的 MIMO 指数 $K \geq 800$ の領域において、研究開発項目 2-b で開発するリアルタイム検証プラットフォームを用いて、空間モード制御型光ファイバ

/ケーブル、コネクタ、増幅器等で構成される空間多重光増幅中継伝送リンクにおける MIMO 信号処理基盤技術を実証する。

【最終成果】

- ①項目間統合連携実験へ向けた長尺ケーブルのとう道および架空区間への敷設、伝送評価が可能な項目間統合連携実験系の構築を完了した。
- ②研究開発項目 1-a・1-b・3-c 連携の下、結合型 12 コア MCF 実装長尺ケーブルでの統合実験を実施し、53.5 km にて伝送容量 455.4 Tbps、1017 km にて伝送容量 389.3 Tbps をそれぞれ達成した。
- ③研究開発項目 3-b 連携の空間分割多重 (SDM : Space Division Multiplexing) 一括光増幅器を統合したフィールド検証系を構築し、3317 km にて伝送容量 266.2 Tbps を達成した。
- ④全研究開発項目 (1-a・1-b・2-a・2-b・3-a・3-b・3-c) 連携の下、フィールド敷設ケーブル検証環境を用いた信号伝送評価を実施し、68 km 伝送後、全 12 コア信号における長時間安定した伝送特性を確認した。これにより、動的 MIMO 指数 $K=1187$ を得て、最終目標を上積みのかたちで達成した。

研究開発項目 3-b) 空間モード多重光増幅設計・評価技術 (古河電気工業株式会社)

【最終目標】

結合型 MCF を介して入力された 10 程度のコアからの信号を増幅することができる光増幅器を実現する。4 コア増幅器で確立した技術を 10 程度のコアに拡張したときの課題を抽出し、解決することにより、項目間統合連携実験に供与可能な増幅器を実現する。

【最終成果】

- ①結合型 MCF を介して入力された 12 コアからの信号を増幅することができるモード多重光増幅器を実現した。
- ②利得・遅延の均一化に加えクロストーク (XT : Crosstalk) の均一化を図るため、パッシブ状態での XT 測定を行い、従来のアクティブ状態での測定値と比較して、傾向に差のないことを明らかにし、コア間 XT 調整の難易度を下げることができる見通しを立てた。この技術に、モード間遅延、モード間利得差の制御技術を加え、12 コアのモード多重光増幅器を完成させ、研究開発項目 3-a との連携実験に提供した。
- ③4 コア増幅器に適用可能な 4 コア結合型 FI/FO の挿入損失低減に取り組み、挿入損失 < 1 dB に低減した。
- ④MC-EDF (Multicore Erbium-Doped Fiber) のクラッド径を縮小または非円形化することにより出力増大を実現し、19 コアエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier) の C 帯での出力を 18 dBm まで増大させた。また、六角クラッド型 19 コア EDFA の増幅特性のコア間偏差測定を完了した。

研究開発項目 3-c) 空間モード多重伝送コネクタ設計・評価技術 (学校法人千葉工業大学)

【令和 3 年度 ~ 令和 5 年度】

【最終目標】

多重数 4 ~ 10 程度、3000 km 相当の超長距離伝送可能な結合型 MCF 用光コネクタに要求される接続特性の要求値を明らかにし、要求条件を満たす MCF 用光コネクタを実現するとともに、接続特性を光コネクタ単体で測定可能な評価方法確立する。また、MCF 用光コネクタ光学互換標準の開発を進め、新業務項目提案 (NP : New Work Item Proposal) 文書回覧を目標とする。

【最終成果】

- ①極性を持たない結合型 MCF (4・8・12 コア) に適用可能な MCF 用 SC 形光コネクタを試作し、ランダム接続損失を測定した結果、3 種の結合型 MCF に対して Grade B (IEC 61755-1) の特性を確認するとともに、軸ずれに対する電磁界解析シミュレーションの結果と整合することを確認した。

- ②通光時引張試験の結果、本コネクタ構造が光配線盤における実使用に耐えることを確認した。
- ③結合型 MCF 接続損失測定時、FI/FO のどのポートから入力しても同じ損失を示すことを確認し、1 つのコアに入力する簡易な構成による接続損失評価方法を確認した。反射減衰量については、非結合型 4 コア MCF と同様に SMF と接続して FI/FO を使わずに評価できることを確認した。
- ④ケーブルに取り付け可能な本光コネクタを作製し、項目間統合連携実験用に提供した（研究開発項目 3-a 連携）。
- ⑤国際電気標準会議（IEC：International Electrotechnical Commission）において、提案内容を反映した MCF 用光コネクタ接続損失測定法に関する国際規格（IS：International Standard）が 2023 年 5 月に IEC 61300-3-4 として発行された。また、MCF 用光コネクタ光学互換標準の公開仕様書（PAS：Publicly Available Specification）が 2023 年 11 月に IEC PAS 63503-3-30 として発行された。

（8）研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

関連する光ケーブル技術および光接続技術の国際標準制定に向けた取り組みを引き続き進めるとともに、SDM 光物理基盤を対象とした光信号処理技術のデファクト標準、およびこれに関連する光伝送システムインタフェースのデジュール標準の議論を主導することで、本研究開発課題の目指す空間モードを制御可能な SDM 技術の社会実装を目指す。