

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

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 1,220 百万円
(令和 5 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)

(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	13	5
	外国出願	19	12
外部発表等	研究論文	7	4
	その他研究発表	70	32
	標準化提案・採択	10	5
	プレスリリース・報道	3	2
	展示会	5	2
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

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)

【目標】

4 または 12 コア MCF を実装した試作長尺 (5 km) ケーブルの光学特性評価を実施し、それぞれのコア数で $20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下の空間モード分散 (SMD : Spatial Mode Dispersion) 係数の制御性を実証する。また、研究開発項目 2) 連携検討用の 12 コア MCF 素線を試作し提供する。

【実施内容および成果】

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。また、研究開発項目 3-a) 連携実験用に短尺ケーブルを提供した。結合型 4 コアまたは 12 コア MCF を実装した長尺 (5 km) ケーブルの試作を完了し、それぞれのコア数で最終目標である $20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以下の SMD 係数を実証した。また、研究開発項目 2-a)、2-b) 連携検討用 12 コア MCF 素線の試作を完了し、項目間連携実験用として提供した。さらに、試作した長尺ケーブルの検証設備への移設・敷設を完了した (研究開発項目 3-a) と連携)。

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)

【目標】

令和 4 年度までに検討した結合型 MCF ケーブルに適用可能な融着接続技術およびコア拡大技術を、商用ケーブルの接続に適用するための融着接続装置を開発する。

【実施内容および成果】

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、モード依存損失 (MDL : Mode Dependent Loss) $\leq 0.1 \text{ dB}/\text{接続}/4 \text{ コア}$ を実証した。また、結合型 12 コア MCF およびこれを実装した敷設前ケーブルの融着接続を行い、30 点以上の接続において $\text{MDL} \leq 1.0 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ を 70 km 超の伝送長で実証することで、当初の最終目標を前倒して達成した。

さらに、研究開発項目 3-a) 連携に向けて敷設後の結合型 MCF の融着接続においても $\text{MDL} \leq 1.0 \text{ dB}/30 \text{ 接続}/4 \text{ コア}$ を実現できる融着接続装置の準備を完了した。

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)

【目標】

研究開発項目 1) で試作したケーブルを用いた 4 多重を超える増幅中継空間モード多重伝送路を構築し、チャンネル動的変動特性の把握、ならびにリアルタイム検証用プラットフォームへの低負荷 MIMO 信号処理方式への実装可能性検討を行う。

【実施内容および成果】

研究開発項目 1-a) との連携の下、試作した 12 多重まで多重可能な心を含む短尺光ケーブルを用いた増幅中継空間モード多重伝送路を構築完了。動的変動特性の評価を行い、新規提案し

た低負荷・高精度・高速追従 MIMO 方式を用いて MHz 級動的変動下で 4 コア 2.6 Tbps/λ の伝送が可能なことを実証。研究開発項目 2-b) との連携の下、回路実装パラメータを考慮した動的評価を追試し、追従性向上 MIMO 処理方式を提案。さらに、MDL 存在下で頑健に収束する再帰最小二乗型周波数領域低負荷 MIMO 方式を提案・実証し、計算量 40 % 低減かつ世界最長の 10 モード 1560 km 伝送に成功。また、ファンイン・ファンアウト (FI/FO : Fan-In/Fan-Out) を含めた結合型 12 コア MCF 伝送路の基礎評価結果を研究開発項目 2-b) 連携実験に提供した。研究開発項目 2-b) と連携し、低負荷 MIMO 信号処理方式のリアルタイム検証用プラットフォームへの適用可能性の見極めを行った。

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)

【目標】

結合型 MCF のコア数を 10 程度まで拡張して、長距離オフライン伝送評価を実施し、大洋横断級の伝送に向けた課題抽出を行う。また、リアルタイム検証プラットフォームを MIMO 処理に必要な前段処理まで構築し、その基本動作を確認する。

【実施内容および成果】

結合型 12 コア MCF で長距離伝送系を構築し、初期伝送評価により、長距離伝送の制限として伝送ファイバおよび FI/FO の接続で生じる MDL という課題を抽出した。課題解決に向けて、研究開発項目 1-a)、2-a) との連携の下、改良した FI/FO を接続し、低減された MDL 値により、空間多重チャネルあたり 1.2 Tbps 信号の 7280 km の長距離伝送を確認した。また、MDL 耐力の向上のための非線形演算を含む MIMO 受信アルゴリズムを開発した。MIMO 信号処理計算量低減のための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、9/8 倍オーバーサンプリングで計算量を 40.7 % 削減し、かつ長距離伝送性能にほとんど劣化がないことを確認した。リアルタイム検証プラットフォームを MIMO 処理に必要な前段処理まで構築して基本動作を確認した。

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)

【目標】

空間モード制御型光ファイバ/ケーブル、リアルタイム検証プラットフォーム、コネクタ、増幅器等を統合した項目間統合連携実験に向けた空間多重光増幅中継伝送リンクの構築に着手する。

【実施内容および成果】

項目間統合連携実験構成案を策定完了。研究開発項目 1-a)、3-b) との連携により、短尺ケーブルと一括光増幅器の項目間統合連携検証系による 4 空間多重光増幅中継伝送評価を実施し、良好な空間多重パラメータ制御性と信号特性を確認。研究開発項目 3-c) との連携により、結合型 MCF 用光コネクタの伝送評価試験を完了。研究開発項目 1-a) との連携により、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を完了。各研究開発項目成果を統合した項目間統合連携実験系の構築に着手 (研究開発項目 1-a)、1-b)、3-b)、3-c) と連携)。外部有識者から構成されるアドバイザリ委員会を 2023 年 10 月、2024 年 2 月の合計 2 回開催。

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)

【目標】

増幅器のコア数増大検討を進め、10 程度のコアを増幅するためのデバイス要求事項の整理を行う。4 コアで使用した各部材に対してコア数を増やしたときの難易度を見極め、開発ポイントを整理するとともに、必要に応じて特性向上のため施策を追加する。

【実施内容および成果】

モード多重増幅器としての基礎特性の評価を完了した。モード多重増幅器に対する要求特性として、利得の均一化と遅延の均一化に加えクロストーク (XT) の均一化を図るため、パッシブ状態での測定を行い、従来行われてきたアクティブ状態での XT 値との比較を行い、傾向に差がないことが分かった。これにより、コア間 XT の調整の難易度を下げることができる見通しを立てた。この技術に加え、モード間遅延、モード間利得差の制御技術を加え、4 コアのモー

ド多重増幅器を完成させ、研究開発項目 3-a) との連携実験に提供した。4 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。さらに、MC-EDF (Multi Core 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化を実現し、消費電力削減の見通しを立てた。12 コアのモード多重増幅器に必要な技術見極めを完了した。

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)

【目標】

- ①結合型 MCF に取り付けられた光コネクタについて、光コネクタ単体で接続損失と反射減衰量を評価できる手法を確立するとともに、コネクタ付きケーブルを作製して項目間統合連携実験に提供する。
- ②国際電気標準会議 (IEC : International Electrotechnical Commission) TC86/SC86B において MCF 用光コネクタ光学互換標準公開仕様書 (PAS : Publicly Available Specification) の委員会原案 (CD : Committee Draft) 回覧を目標とする。

【実施内容および成果】

下記記載内容は、令和 5 年度目標および最終年度である令和 6 年度目標について、すべて 1 年前倒しで令和 5 年度中に完遂した成果である。

- 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。また、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。さらに、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、一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立した。反射減衰量については、非結合型 4 コア MCF と同様にシングルモード光ファイバ (SMF : Single Mode Fiber) と接続して FI/FO を使わずに評価できることを確認した。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)。
- ②MCF 用光コネクタ光学互換標準 PAS が 2023 年 11 月に発行された。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) は 2023 年 5 月に IEC 61300-3-4 として発行済み。

(8) 今後の研究開発計画

令和 6 年度は、研究開発項目間連携により空間モード一括増幅光中継技術を含む空間モード制御光伝送路を構築し、MIMO 信号処理の適用性を確認し、空間モード制御光伝送基盤を実証する。