

令和 4 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

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 920 百万円  
(令和 4 年度 530 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	8	6
	外国出願	5	5
外部発表等	研究論文	3	3
	その他研究発表	38	29
	標準化提案・採択	5	2
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	3	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 ~ 10 程度のコア数を有する結合型 MCF の空間モード数と伝送特性の関係を解析的に体系化するとともに、実際の結合型 MCF を実装した短尺ケーブルにおいて、空間モード分散 (SMD : Spatial Mode Dispersion) 係数の制御性を実証する。

特性目標 : SMD 係数 < 40 ps/√km

【実施内容および成果】

結合型 MCF 伝送特性のコア数依存性の計算検討を完了。ステップ型構造に加え、低屈折率領域を有する W 型構造も検討対象とし、4、8、12 コア MCF の設計・試作を完了。各種伝送特性のコア数依存性および屈折率プロファイル依存性を確認するとともに、曲げ損失の曲げ方向依存性について計算と実験との整合性を確認。ケーブル実装技術について、製造プロセスと構造パラメータの制御範囲を実験的に明らかにし、短尺ケーブル (1 km) の試作を実施。ケーブル状態での 40 ps/√km 以下の SMD 係数を実験的に確認。また、研究開発項目 2) 検討用 12 コア MCF の設計・試作・評価を完了し、令和 5 年度の研究開発項目 2) における検討加速に寄与。

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 3 年度に検討した融着接続技術およびコア拡大技術を用いて 4 ~ 10 程度の空間モードを有する MCF の融着接続を行い、1 接続あたり 0.1 dB/4 コア以下のモード依存損失 (MDL : Mode Dependent Loss) を実証する。

【実施内容および成果】

スクランブル法による MDL 測定技術を 4 コアから 12 コアへ拡張するとともに、4、8、12 コアの MDL エミュレータを作製し、エミュレータ設定値に対して RMS (Root Mean Square) 誤差 9 % 以内で MDL を測定できることを示した。4、8、12 コア MCF の融着接続を行い、融着部前後の MDL を測定し、1 接続あたり 0.1 dB/4 コア以下が実現されていることを実証した。

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】

空間多重数 10 程度までスケールかつチャネル動的変動に追従可能な低負荷 MIMO 信号処理構成・アルゴリズムの提案/選定を行う。また、結合型 4 コア MCF 伝送路および増幅器を組み合わせた長距離伝送オフライン実験により、選定アルゴリズムによる 25 kHz までの動的追従性能試験を実証する。

#### 【実施内容および成果】

10 空間多重以上にスケール可能な信号特性評価系の構築、ならびに同評価系を用いた 10 空間モード多重増幅中継伝送の世界最長記録となる 1300 km 伝送を実証。MIMO 信号処理の低負荷化を可能にする伝送リンク設計方式および信号処理実装方式をそれぞれ新たに提案し、低負荷化の実験実証を完了。研究開発項目 2-b) との連携の下、ハードウェア実装性を考慮した動的特性評価を進め、4 空間多重度、動的特性 25 kHz、3000 km の伝送実験における提案信号処理方式の動的特性追従性を確認。

#### 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 4 コア MCF において、長距離伝送を可能とする高スループット受信側 MIMO 処理方式を策定し、6000 km 程度の長距離伝送を実験的に確認し、コア数に対するスケール性を明確化する。

##### 【実施内容および成果】

- 6000 km 程度の長距離オフライン伝送に向けて、令和 3 年度に構築した結合型 4 コア MCF 伝送系における光増幅方式を見直し。見直した伝送系を用いて 6000 km 伝送を実証。今後のコア数拡大における課題抽出のために高多重数対応結合型 MCF 伝送シミュレータの構築完了。
- 機械学習ベースの信号整形技術に関して、結合型 4 コア MCF へ拡張し、シングルモード光ファイバ (SMF : Single Mode Fiber) 伝送の場合と同様の効果を確認。また機械学習技術を活用した MIMO 等化の MDL 耐力の改善について検討し、シミュレーション評価により伝送距離にして数十%の改善効果を確認。
- MIMO の方式として、制約なし周波数領域等化 (FDE : Frequency Domain Equalization) -MIMO と制約あり FDE-MIMO のゲート数を試算。空間モード分散 (SMD : Spatial Mode Dispersion) 20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 、90 GBaud、4 コア制約なし FDE-MIMO で必要となるゲート数は、現在の最先端 LSI のゲート数と同程度であることを確認。

#### 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】

各研究開発項目間の接続方式 (インタフェース) を検討し、項目間連携実験に向けて策定する。

##### 【実施内容および成果】

研究開発項目 1) の試作・評価、研究開発項目 2) の MIMO 信号処理プラットフォームの実装性検討、研究開発項目 3) の空間モード多重光増幅器/コネクタの構成を考慮し、伝送リンク構築の実装容易性に関する課題を抽出、空間多重光増幅中継伝送リンク構成を項目間/項目内実証に向けて策定した。

##### 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)

##### 【目標】

結合型 4 コア MCF から入力された信号を増幅し、結合型 MCF に出力する構成の増幅器構成を確定させる。クラッド励起技術を用いた一括励起を採用し、結合型 4 コア MCF にて直接入力可能なモード多重光増幅器を実現させ、その評価方法を示す。

##### 【実施内容および成果】

4 コアモード多重増幅器の要素技術を完成させた。増幅器の入出力に 4 コアの結合型ファイバを用いた結合型の 4 コア増幅器の特性確認を行った。増幅器の内部は、クラッド励起型のマルチコア増幅器と、コア間利得差補償のためにコア励起モジュールを加えたハイブリッド型励起を採用した。さらに、遅延量補償器を追加することによりモード間遅延差を解消し、伝送実験にてその効果を実証した。結合型 4 コア MCF と増幅部の入出力部に使用するファンイン・ファンアウト

(FI/FO : Fan-In/Fan-Out) をファイバ型で実現する検討を開始し、低損失化の見通しを立てた。

#### 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 接続点に要求される MDL およびモード間 XT を明らかにし、目標性能を実現可能な光コネクタ構造を設計する。また、コネクタ単体での接続特性評価法を確立する。

##### 【実施内容および成果】

- 目標性能を達成可能な MCF 用光コネクタ組立て治具の改良を行い、必要精度を実現可能であることを確認した。FI/FO を用いずに各コアの反射減衰量 (RL : Return Loss) 測定方法を考案し、非結合型 MCF を用いて確認した。また、結合型 MCF 用光コネクタ試作を行うとともに、接続損失のシミュレーションを実施し、目標性能を達成できる見通しを得た。
- MCF 用光コネクタ光学互換標準について、国際電気標準会議 (IEC : International Electrotechnical Commission) に提案し、公開仕様書 (PAS : Publicly Available Specification) 開発の開始について 2022 年 11 月の IEC TC86/SC86B プレナリー会合で承認された。非結合型 MCF を盛り込んだ接続損失測定法の規格については、2023 年 4 月に国際規格 (IS : International Standard) 発行予定。

#### (8) 今後の研究開発計画

令和 5 年度は、長尺光ケーブルで空間モードの制御性を実証し、融着接続装置を開発すると同時に、コネクタ接続における光学互換基準を確立する。研究開発項目 1) で開発した光ケーブルへの MIMO 信号処理技術の適用性および空間モード数の拡張性を明らかにする。さらに、結合型 4 コアの一括増幅技術を基軸として、空間チャンネル数の拡張性を明らかにする。