

令和 5 年度研究開発成果概要書

採択番号 07101

研究開発課題名 大電力伝送光ファイバ無線による高効率無線通信システムの構築

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、現在広く利用されているシングルモードファイバ (SMF: Single Mode Fiber) ではなく、新規に開発が進められている光ファイバである空孔コアファイバを伝送媒体とすることで、多数のアンテナへの給電という課題を解決することを目指す。空孔コアファイバは、従来の 1/1000 の低非線形性、1000 倍の光損傷しきい値、低遅延特性を有している。このため、高 Signal to Noise Ratio (SNR) で大電力のアナログ-Radio over Fiber (RoF) が構成可能となる。さらに、別の波長帯を利用して給電用の光の伝送も可能となる。技術的には、空孔コアファイバを伝送媒体とする大電力伝送光ファイバ無線技術を確立し、基地局の Radio Unit (RU) -アンテナ群を無給電 (光給電アンテナ) で経済的に接続する高効率無線通信システムを実現することを目的とする。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 6 年度 (3 年間)

(3) 受託者

学校法人慶應義塾<代表研究者>  
国立大学法人電気通信大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 5 年度までの総額 200 百万円 (令和 5 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 大電力伝送光ファイバ無線用光ネットワーク構成法の研究  
研究開発項目 1-a) 大電力多波長光ファイバ無線用光回路の研究 (学校法人慶應義塾)  
研究開発項目 1-b) 大電力多波長光ファイバ無線用光伝送システムの研究 (国立大学法人電気通信大学)  
研究開発項目 2 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究  
研究開発項目 2-a) 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究 (学校法人慶應義塾)

(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	4	4
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	1	0
	その他研究発表	23	20
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	4	4
	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 大電力伝送光ファイバ無線用光ネットワーク構成法の研究

#### 研究開発項目1-a) 大電力多波長光ファイバ無線用光回路の研究

石英導波路を利用して4波長で動作する遅延回路を集積した遠隔ビームフォーミング用多波長遅延制御光回路を設計試作し、光信号の遅延特性を確認した。アレイ導波路回折格子も集積している。シリコン導波路を利用して変調器、波長合分波器と遅延回路を集積した遠隔ビームフォーミング用多波長遅延制御光回路を設計した。25GHzの周波数間隔の光周波数コムを発生できる光学系をセットアップした。遅延回路、光合分波回路と組み合わせて、波長毎に遅延制御できることを確認した。光コムのコム線を選択し、周波数間隔を広げる光回路の設計と試作を実施した。波長多重光を空孔コアファイバに入力するための光バンドパスフィルタの試作、光学系の詳細設計、装置組み立てを行った。空孔ファイバへの結合の最適化を実施し、ミラーによる位置調整、結合効率などの基本評価を実施した。

#### 研究開発項目1-b) 大電力多波長光ファイバ無線用光伝送システムの研究

光伝送システムに使用する1 km空孔コアファイバを用い、誘導ブリルアン散乱および四光波混合の詳細な特性評価を実施し、その有効性を明らかにした。さらに実際のキャリア周波数5.2 GHz、28 GHz (5G NR) 信号を用いた1 km空孔コアファイバの伝送実験を行った。これにより、従来のシリカコアで構成された光ファイバでは困難であった光ファイバ入力パワー +30 dBm を超える光ファイバ無線伝送に初めて成功した。また、光給電アンテナについては、光給電で駆動するアンテナモジュールを設計・製作し、給電性能および動作確認を行った。実際に、光ファイバ無線信号を入力し、外部電源を用いないフル光給電において、RF 信号への光電変換および、その性能評価を行い、高い信号品質が得られることを実証した。

### 研究開発項目2 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究

#### 研究開発項目2-a) 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究

階層化マルチセルモバイルフロントホールアーキテクチャを明らかにし、階層化された未使用セルへの波長割当を停止することにより基地局の低消費電力化を図るセルスリープ方式を複数提案した。シミュレーションにより、端末が局在したとき、スリープを行わない場合と比較してセル使用率を最大で90%以上削減できることを確認した。スイッチド RoF に対する省電力効果評価を数値シミュレーションを実施し、有効性の確認できる光スイッチサイズ、周波数群の大きさといったパラメータを明らかにした。マルチスポット RoF に対する上り伝送方式の検討を行い、WiFi を利用した実験により、端末から複数アンテナが見える場合の上り伝送の実現可能性を確認した。スイッチド RoF に対する、500 m 敷設空孔コアファイバと市販アナログ光ファイバ無線装置を用いた伝送実験により、光スイッチ挿入による伝送品質への影響が軽微であることを確認した。実験環境整備として、ローカル 5G 実験設備に対する5G 基地局ソフトウェアの導入と調整を行い、電波遮蔽箱内での市販スマートフォンとの疎通確認、ローカル 5G アンテナ分離と光ファイバ無線伝送システムの挿入、光スイッチを挿入した状態での1 kmファイバ伝送での動作確認によりスイッチド RoF コンセプト実証実験環境準備を完了した。

## (8) 今後の研究開発計画

### 研究開発項目1 大電力伝送光ファイバ無線用光ネットワーク構成法の研究

#### 研究開発項目1-a) 大電力多波長光ファイバ無線用光回路の研究

- (i) シリコン導波路を利用して変調器、波長合分波器と遅延回路を集積した遠隔ビームフォーミング用多波長遅延制御光回路を試作する。遅延回路の動作検証を実施する。
- (ii) シリコン光回路による遠隔多チャンネルアンテナ用光回路の設計と試作を行う。年度内に試作が可能であれば、改良設計を行い、2次試作を行う。
- (iii) シリコンフォトリクス回路を利用し、8チャンネル以上の大規模ビームフォーミング回路の設計を行い、スケールアップの見通しを得る。
- (iv) シリコンフォトリクス回路を利用した波長選択光スイッチ型と空間光スイッチ型の遠隔

多チャンネルアンテナ用光回路を構成する。

(V) 空孔コアファイバ結合装置は、波長数4として、各入力+30 dBm 以上、合波出力+36 dBm 以上の大電力信号を送出可能とする。

#### 研究開発項目 1-b) 大電力多波長光ファイバ無線用光伝送システムの研究

##### (i) 光給電 RoF 伝送系の構築・評価

昨年度製作した光給電アンテナモジュールを使用し、RoF 信号および給電光が空孔コアファイバを同時伝送するための伝送系を構築する。給電光は伝送後に光給電アンテナモジュールに入力することで、外部電源なしで駆動する光給電アンテナを実証する。併せて、RoF 信号の伝送特性評価も実施し、空孔コアファイバを用いた光給電 RoF 伝送の有効性を明らかにする。

##### (ii) 偏波無依存変調器を用いた上り RoF 伝送系の構築・評価

偏波無依存性を有する PLZT 光変調器を用いた上り RoF 伝送系の構築を行う。この構成では、上り RoF 信号の生成に必要な種光源は Radio Unit に配備し、アンテナサイトには変調器だけを配備し、リモート変調を行うことで、アンテナ側の省電力化および簡素化を実現する。実際に PLZT 光変調器を組み込んだリモート変調構成を導入し、2.5 GHz のキャリア周波数を用いた基礎伝送実験を実施し、伝送特性評価によって、その有効性を明らかにする。これと併せて、最適な変調器構成や下り伝送で実施するキャリア周波数 5G NR 信号への適用可能性についての検討も行う。さらに、汎用光変調器と偏波ダイバーシティ構成を活用した上り RoF 伝送系の構築・評価も行い、提案手法との比較評価も実施する。

##### (iii) 光給電 RoF・ビームフォーミング無線伝送系の構築・評価

光給電 RoF を 4 チャンネル構成にし、光給電 RoF・ビームフォーミング伝送系を構築し、空孔コアファイバの伝送特性評価を実施する。また、伝送した無線信号を用いて、5G NR 信号のビームフォーミング無線伝送実験を行い、その有効性を明らかにする。さらに、研究開発項目 1-a) で構成される光周波数コム生成回路や遅延制御光回路を組み込んだ統合実験を行い、本研究開発を介して、空孔コアファイバの光ファイバ無線伝送への有効性を実証する。

#### 研究開発項目 2 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究

##### 研究開発項目 2-a) 高機能光無線融合型高効率無線通信システム構成法の研究

##### (i) 階層化マルチセルモバイルフロントホールアーキテクチャ制御アルゴリズム検討・評価

令和 5 年度までに構築したシミュレータを用いて、省電力アルゴリズムを用いない場合と比較して 1/10 以上の省電力効果が得られる条件を明確にするとともに、端末移動やユーザ収容率を考慮したより効率的なアルゴリズムの検討を行う。また、階層化セルを用いたネットワーク冗長化による高信頼アプリケーションのシミュレーション評価を行う。

##### (ii) 高機能 RoF (スイッチド RoF システム・マルチスポット RoF システム) プロトタイプ構築

階層化マルチセルモバイルフロントホール・スイッチド RoF・マルチスポット RoF の制御実験 PoC 及び 5G 環境での実証実験 PoC を拡張し、研究開発項目 1 と連携可能な環境を構築する。

##### (iii) 総合制御実験実施

オーケストレータプロトタイプと高機能 RoF PoC を連携させ、RoF のパワーと光ネットワークによる空間的なアンテナの選択により、論理的階層化マルチセルモバイルフロントホールネットワークが実現できることを実証する。研究開発項目 1 と連携して、空孔コアファイバもしくは SMF を用いた階層化マルチセルモバイルフロントホールの統合実証を行う。5G 環境において信号を疎通させ、端末の移動と連携させたセルの切替が行われることを検証する。

##### (iv) PoC を利用したオープンイノベーション推進

けいはんな情報通信オープンラボにおいて、相互接続性検証ワーキンググループの新設プロジェクト活動を実施し、慶應大学新川崎タウンキャンパスに構築する総合実験を利用した通信キャリア、システムベンダーとの実用化に向けた議論を実施する。