

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 08401

研究開発課題名 Beyond 5G 通信インフラを高効率に構成するメトロアクセス光技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

超大容量 (eMBB)、超低遅延 (URLLC)、超多接続 (mMTC) のような B5G 時代の多様なサービスタイプのトラフィックを高品質に收容し、かつ多様な環境に稠密設置される B5G 基地局を効率的・低コストに展開可能な RAN の構成に向け、デジタルおよびアナログ両技術を活用・協調動作した柔軟かつ超高効率な B5G 向けメトロアクセスインフラ光技術を確立することを目的とする。

B5G 光アクセスネットワーク向けには、B5G/6G 基地局の展開にあたり、大容量性に加え、光ファイバ敷設における量的・地理的制約のあるような多様な設置環境を含め稠密に配置される基地局を高効率收容可能な B5G/6G 向けモバイルフロントホール構成技術および次世代 RAN 構成技術を確立する。B5G/6G モバイルフロントホールの信号伝送部における処理帯域と分解能を両立し、アンテナ接続におけるハードウェア数を低減する双方向高分解多重・分離技術を開発する。また、分散 MIMO アンテナへの各種アナログ中継伝送方式において、通信品質を担保し高効率に多数のアンテナを收容する伝送最適制御技術を開発する。さらに、ユーザあたり 100 Gb/s 以上の超高速・超低遅延無線通信の手段として、光ファイバを伝搬する赤外光を、ビームフォーミング (Beam Forming, BF) によって指向性を持たせ光空間多重するアクセス方式の実現可能性を検討し、適合領域を特定する。

B5G メトロネットワーク向けには、多様な異種 RAN サービス收容と、多接続化を高効率に実現するため、1 つの光トランシーバで仮想的に複数の光トランシーバを実現し、複数の仮想光チャネルを收容する仮想光チャネル技術を確立する。また、同時收容される異種 RAN サービスとそれらの仮想光チャネルに対して柔軟に訂正性能や処理遅延を決定可能な異種信号收容誤り訂正フレーミング技術を確立するとともに、その効率的回路実現のためパラレルデジタル信号処理 DSP コア技術を確立する。さらに、光波の物性に基づく先進的な技術を駆使し、変調信号の超多値化による高い周波数利用効率と、光ファイバ通信における根源的な劣化事象であるファイバ非線形光学効果による伝送品質劣化への高耐力化との両立や、光信号を光領域で一括処理することによる大幅な低消費電力化・低遅延化を実現する基盤技術の確立を目的とする。

(2) 研究開発期間

令和 6 年度 (1 年間)

(3) 受託者

三菱電機株式会社 <代表研究者>
株式会社 KDDI 総合研究所
国立研究開発法人産業技術総合研究所
国立大学法人大阪大学
公立大学法人大阪 大阪公立大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 6 年度 84 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 : 高効率光アクセス構成技術の研究開発

- 1-a) B5G-RAN 收容高効率アクセス構成技術 (KDDI 総合研究所)
- 1-b) アナログデジタル協調型 RoX (Radio-over-X) 伝送技術 (三菱電機株式会社)
- 1-c) 小型光ビームフォーミングデバイス技術 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

研究開発項目2：高効率光メトロ構成技術の研究開発

- 2-a) 仮想光チャネル技術（三菱電機株式会社）
- 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術（三菱電機株式会社）
- 2-c) 非線形伝送基盤技術（国立大学法人大阪大学）
- 2-d) 光・電気協調による高速低電力信号処理技術（公立大学法人大阪 大阪公立大学）

(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	8
	外国出願	25	25
外部発表等	研究論文	4	4
	その他研究発表	56	56
	標準化提案・採択	1	1
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	2	2
	受賞・表彰	7	7

※関連課題(O14O1)における令和6年度成果を含む。

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目1 高効率光アクセス構成技術の研究開発

研究開発項目 1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

①モバイルフロントホール部

8 拠点を 1 ファイバ(拠点あたり上下各 1 波長、計 16 波長)で収容可能な WDM 型双方向小型アナログ光送受信機を開発し、5G 形式の無線信号(64QAM OFDM 信号)12ch 分を IF 多重したアナログ IFoF 信号を EVM 8%以下で伝送できることを確認した。本方式により B5G で求められる 100Gbit/s 超級の伝送容量を上回る 219.0Gbit/s ($=380.16 \text{ MHz} \times 6 \text{ bit/s/Hz} \times 12 \text{ ch} \times 8 \lambda$) を双方向伝送可能なモバイルフロントホールを構成できることを実証した。また、4 コア MCF を用いた伝送実験により合計 1.314Tbit/s ($=380.16 \text{ MHz} \times 6 \text{ bit/s/Hz} \times 18 \text{ ch} \times 8 \lambda \times 4 \text{ コア}$) のアナログ RoMCF が可能であることを実証し、500Gbit/s 以上に伝送容量を拡張可能であることを示した。更なる拡張として 12 コア MCF を用いた検証も実施し、10.51Tbit/s ($=380.16 \text{ MHz} \times 6 \text{ bit/s/Hz} \times 24 \text{ ch} \times 16 \lambda \times 12 \text{ コア}$) の超大容量伝送の実現可能性も示した。

②B5G-RAN 機能部 (CU+DU+IF 多重信号送受信部)

B5G 向け RAN 機能については最大 3.2GHz 幅 ($=400 \text{ MHz} \times 8 \text{ ch}$) の広帯域 IF 多重信号を扱える双方向 IF 多重分離装置、及びミリ波帯への周波数変換機能とビームフォーミング機能を備えたアンテナを開発し、前述の WDM 型アナログ IFoF 伝送装置と組み合わせた構成で商用 5G スマートフォンとの間で End-to-End の双方向リアルタイムデータ通信が可能であることを実証した。また、遠隔設置される装置の制御・監視に必要なデジタル信号 (Ethernet 信号) 及び同期用クロックを広帯域 IF 多重信号と周波数多重して伝送するアナログ・デジタル異種サービス共存収容型の RAN アーキテクチャを考案・機能実装し、前述の双方向 IF 多重分離装置・WDM 型小型アナログ光送受信機と組み合わせた構成で、双方向データ通信に加えてアンテナサイト側の装置を遠隔で制御・同期するなど RAN システムと連携可能な多拠点収容モバイルフロントホールを構成できることを実証した。

③研究開発項目 1-b)との連携

1-b)の成果物である双方向高分解多重・分離装置および RoFSO 装置と 1-a) の成果物を連携させ、ファイバ敷設に地理的制約がある箇所に対しても End-to-End の双方向データ通信が行えることを実証した。さらに B5G/6G 向けの無線アーキテクチャであるユーザセントリック RAN の研究開発を行う課題 004 と連携した屋外実験を行い、高い同期精度が求められるユーザセントリック RAN 向け分散アンテナの収容回線として本アナログ IFoF 方式が適用可能

であることを実証した。

研究開発項目 1-b) アナログデジタル協調型 RoX (Radio-over-X) 伝送技術

IFoF 伝送において ADC/DAC 数をアンテナの 1/2 以下とするアナログデジタル協調型多重・分離回路の設計および伝送試験を実施した。ダウンリンク伝送試験では、最大 256QAM 信号の 10 チャンネル多重 IFoF 伝送を実証し、10 チャンネル・64QAM 多重条件でより良好なデータレートとなる双方向伝送を実現した。また、8 波長多重時の転送レート試算の結果、100Gbps を超えるトータルレートが達成できることを示した。

$\Delta\Sigma$ -RoF による OFDM 信号伝送評価を実施し、QPSK および 64QAM に対する要求値を満足することを確認した。10cm 角の小型光ターミナルを試作し、16 波長多重収容と 5G 信号疎通を実現する RoFSO 方式による伝送を実証した。また、C 帯波長全域で最大 47 チャンネルの波長多重 RoFSO 伝送が可能な見込みを得た。PAST-IFoF 方式について、6×64 MIMO 信号の伝送に成功し、シミュレーションにより 256 素子への拡張性の根拠を示した。

研究開発項目 1-c) 小型光ビームフォーミングデバイス技術

1 次試作デバイスを用いて空間光信号伝送試験を実施した。距離 10 cm で 100 Gb/s の空間光信号伝送に成功した。また、2 次試作デバイスについて試作とその実装を完了した。水平垂直それぞれの方向に、0.32° の角度分解能で 4.8° の 2 次元のビーム偏向動作に成功した。また、1.5 m および 10 m の距離で 15.36 Tb/s の信号の導通を確認した。

研究開発項目 2：高効率光メトロ構成技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 仮想光チャネル技術

仮想光チャネル生成・検出部として設計した送信／受信側デジタル回路を実装した DAC／ADC 集積 FPGA と光変復調評価用試作器を接続し、2 サブキャリア多重条件での 2Gbaud 偏波多重 QPSK 信号の光変復調動作を確認することにより、仮想光チャネル生成・検出部の低速での原理検証を完了した。また、DAC／ADC の帯域内において観測可能な 1Gbaud・4 サブキャリア多重条件での光信号生成・コヒーレント検波試験を実施し、4 チャンネル以上の条件に対する開発したデジタル回路の適用可能性を確認した。また、項目 1a および 2b との間の連携オフライン試験を実施し、他項目からの外部入力信号データを仮想光チャネル生成部デジタル回路に組み込み、リアルタイムでのデータ送受信を確認することで、仮想光チャネル技術の誤り訂正フレーミング技術およびアクセス技術との接続可能性を示した。同時に、変数化された仮想光チャネル生成・検出部デジタル回路のモデルを用いた信号品、回路品質の最適化を実施し、提案する最適化手法により開発工程を大幅に圧縮しながら最適解を抽出することに成功した。

研究開発項目 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング・パラレル DSP コア技術

制御フレームは Polar 符号、パイロードフレームには LDPC 符号と BCH 符号の接続符号を用いた構成の異種 RAN サービスを同時収容可能と符号フォーマットの開発を行った。上記フォーマットに対して、計算機シミュレーションにより変調方式ごとの性能評価を実施した。また、FPGA に異種 RAN サービスの最大収容数 4 チャンネルに制限した回路を実装し、5Gb/s 級の最大伝送速度を実証し、仮想光チャネルとの連携を考慮して PCS 信号を生成して入力したときの評価を実施し、異種 RAN サービス同時収容および最大伝送容量 数 Tbps の実現性を示し、目標を達成した。

研究開発項目 2-c) 非線形伝送基盤技術

- ① 三角格子状の固有値配置を用いた、4096 値 ($=2^{12}$ 値) 固有値変調信号を設計した。分散パラメータがゼロに近い NZ-DSF、ニューラルネットワーク復調器、および、軟判定前方誤り訂正符号を用いることにより、1200km の伝送が可能であることを実証した。
- ② ポイント・マッチング法を用いた導波路シミュレーションを行い、他波長一括波長変換システム向け光回路設計を行った。設計結果に基づきデバイス試作・評価を行った。これらの成果を ECOC や OFC 等の国際会議で発表した。

研究開発項目 2-d) 光・電気協調による高速低電力信号処理技術

(1) 位相変調、IQ 変調の導入により HNLFF を用いた光ルートナイキストパルス発生に使用する変調器帯域を最大 $1/4.7$ に低減、(2) 信号間干渉ペナルティ低減のための光 FIR フィルタの提案と数値解析による非線形ペナルティ低減効果の確認、(3) APSK ソリトン伝送の送信パワー設定、ソリトン制御、PSA の使用などによるソリトンの位相揺らぎ低減による QPSK ソリトン波形の 4000 km 伝送の確認を行った。(4) ソリトン伝送の目標達成ができなかった場合の代替技術としてモード多重通信のモードクリーナーと中空 FMMF について検討した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

研究開発項目 1 高効率光アクセス構成技術の研究開発

O-RAN や IOWN の取り組みを通してアナログ IFoF/RoF システムの標準化を進めるとともに、特性改善や実装技術等の検討を継続して行うことで実用化を目指す。また、これらの成果を国際会議などで発信し、その有用性を広くアピールする。

研究開発項目 1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

標準化に向けて O-RAN Alliance で活動を推進中。nGRG RS01 にてミリ波分散アンテナのユースケースを分析し、IFoF/RoF 技術の適用可能性を示した Research Report を発行済み。更なる議論の発展に向け、nGRG RS02 にて分散アンテナアーキテクチャの定義・要件等を整理中。KDDI が主導する IOWN GF IMN-TF では、IFoF/RoF 技術の適用方法を示す文章の作成に着手。B5G 基地局展開に向けた要件や動向などを見据えつつ、標準化に向けた検討を進める予定。

研究開発項目 1-b) アナログデジタル協調型 RoX (Radio-over-X) 伝送技術

本プロジェクトの最終年度に得られた項目 1-a との接続実験結果などを継続的かつ積極的に学会発表を行い、開発技術の有用性を社会へアピールする。また、開発技術の深化を進め、実際の Beyond-5G 向け基地局ニーズに応じた実装技術も継続的に検討を進める。

研究開発項目 1-c) 小型光ビームフォーミングデバイス技術

具体的なアプリケーション (例えばデータセンターラック間/ラック内の光無線化による超低遅延インターコネクトなど) を見極め、損失、波長帯域、クロストーク、ビーム偏向角などの特性を改善しながら、新たな研究開発へ展開していく。

研究開発項目 2: 高効率光メトロ構成技術の研究開発

Beyond 5G における光メトロアクセスネットワークに適用可能な装置・技術として、DSP-LSI やそれを搭載した波長多重光通信装置、光・電気協調技術を搭載した光電気デバイスの実用化を目指し、これまでに確立した要素技術を基に国際標準化を進め、2030 年頃の社会実装を狙う。特に高効率光メトロ構成技術については、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) Global Forum 等の国際協調枠組みに参画し、また、通信キャリア等との連携関係を構築するとともに、市場精査や仕様のオープン化を進める。開発技術を活用した LSI デバイスや光電気デバイスなどのキーデバイス・装置の試作開発を図るとともに、設計・製造可能なベンダとの連携を推進する。本研究開発およびその後の商用化開発を経て社会実装を行うことで、電波資源の有効利用の促進にも大きく資することができると考える。

また、本研究開発で得られた成果・重要技術については、論文発表・学会発表を通じた技術普及を図りつつ、民間への技術移管や、取得特許に基づくライセンス展開などの可能性も検討・推進する。

研究開発項目 2-a) 仮想光チャネル技術

本研究開発における仮想光チャネル数の 4 倍可変とするデジタル回路の設計検証 (= 回路構成を考慮した機能シミュレーション)、実機検証および 2-b と連携した評価の結果に基づいて、回路の並列処理の拡張化による将来の LSI 化における 10 倍可変に向けた実装検討および誤り

訂正フレーミング機能を含めた包括的なデジタル回路の設計検討を進める。

研究開発項目 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング・パラレル DSP コア技術

将来的には開発した回路を並列化させて拡張させ、LSI 化を行うことにより、異種 RAN サービス同時収容(10 チャンネル以上)および最大伝送容量 数 Tbps を実現する回路の実装を行う。

研究開発項目 2-c) 非線形伝送基盤技術

本研究で得られた成果を基に、B5G およびさらにその先の情報通信システム基盤を支えるための先進的な基盤技術の確立を目指す。具体的には、さらなる超多値化・大容量化を実現する伝送技術や光信号処理によるさらなる高効率化技術の確立を目指す。また、実装やプロトタイプ製作に向けた課題への対策検討を進める。

研究開発項目 2-d) 光・電気協調による高速低電力信号処理技術

光 FIR 技術の実験検証や、PSA が汎用部品として使用できる時代を想定し、電子回路の一部を光技術に置き換える光電気協調技術を通して低消費電力な光伝送方式の高速化と発展を目指す。