

採択番号 01401
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収容し、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収容可能な 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収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 サービス収容と、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収容する仮想光チャネル技術を確立する。また、同時収容される異種 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収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 3 年度から令和 6 年度 (4 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 大阪府立大学

(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 600 百万円 (令和 3 年度 282 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 収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 大阪府立大学)

(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	2	2
	外国出願	5	5
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	18	18
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	1	1
	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 高効率光アクセス構成技術の研究開発

各研究開発項目において、方式検討・シミュレーション・回路設計・一次試作に着手し、基本設計や基本動作の確認、2022 年度の試作方針策定を行った。

研究開発項目 1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

①B5G-RAN 機能部

5G NR ベースのコア・RAN 機能を具備する疑似基地局装置および対向する疑似端末装置の調達、IF 多重分離処理部の試作に向けた方式検討を行った。100MHz 幅で 4MIMO 分の無線信号を通じてデータ送受信が可能な疑似基地局装置および疑似端末装置の調達を完了するとともに、IF 多重分離処理部について、フルアナログ・フルデジタル両方式における消費電力・サイズ・重量等の試算・比較の一次検討・分析を実施した。

②モバイルフロントホール部

双方向波長多重光アナログ光伝送を行う小型光送受信機の一次試作に向けた方式設計を行い、収容局側・アンテナ側装置の試作仕様設計を完了した。また中間ノード用伝送機材の調達を完了した。また、標準外形非結合型 4 コア MCF を用いた片方向アナログ IFoF 信号伝送特性評価を行った。400MHz 幅 64QAM OFDM 信号を 576ch (4 コア×8 波長×18IF 多重)、伝送容量換算で約 1.3Tbps の大容量・多拠点収容伝送実験を行い、全チャネルで 3GPP 規定の品質基準 EVM<8%を満足することを確認した。

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

1-b-1) 双方向高分解多重・分離技術

広帯域 IFoF 信号に対して、アナログ領域・デジタル領域双方でチャンネル分離・多重する処理回路の基本構成を検討した。理論検討およびシミュレーションにより本回路の動作を確認し、本回路により ADC/DAC1 つあたり 2ch 以上の無線信号を収容可能である見込みを得た。また、本回路の基本検討モデルの試作結果から回路規模の評価を実施し、アナログ回路の基板規模とデジタル回路の回路リソース見通しを得た。

1-b-2) 伝送最適制御技術

$\Delta \Sigma$ RoF 方式について、市販の SFP モジュールを使用した Sub6 帯(3.6~4.1GHz)での変調信号伝送評価を行い、当該周波数帯域にて変調信号が伝送できることを確認した。また、伝送品質について評価を行った結果、 $\Delta \Sigma$ DAC の最適動作周波数(3.223GHz=fs/4)における

EVMが2.6%であるのに対し、Sub6帯におけるEVMは4.7~5.8%であることが分かった。

RoFSO方式について、光空間通信用の光送受信ターミナルの基本構成を検討した。ターミナルに実装するチップチルトミラーなど、主要光学部品の基本特性を評価し、所望の特性を確認し、次年度の装置製作の見通しを得た。

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

「シリコンフォトリソグラフィビームフォーミングデバイスの方式を基本検討し、必要な試作を開始する」という目標に対し、スイッチ方式とフェーズドアレイ方式のデバイスを設計して、産総研半導体パイロットラインでの試作を開始し、本年度の目標を達成した。

研究開発項目 2 高効率光メトロ構成技術の研究開発

各研究開発小項目にて、研究環境を立ち上げ、必要機材を調達した。仮想光チャネル技術および異種信号収容誤り訂正フレーミング技術については、デジタル信号処理に関する基本検討およびアルゴリズム検討を行った。また、非線形伝送基盤技術、光・電気協調による高速低電力信号処理技術については、理論検討および基本設計を行った。

研究開発項目 2-a) 仮想光チャネル技術

DSP当たりの光チャネル数を現行の1チャネルに対して、異種RANを含めて10倍可変とする仮想光チャネル技術についてTx/Rx DSPのアルゴリズム候補の選定を完了した。特に、異なるクロック周波数で生成される複数の仮想光チャネル信号を単一のクロック源で受信可能な、可変サンプリングレート変換によるクロック同期方式を適用したアルゴリズムを検討し、シミュレーションによるTx/Rx間のクロック周波数差を推定する要素評価を実施し、送信側隣接チャネル抑圧比40dB以上と受信クロック周波数差補償性能100ppm以上を達成した。また、DAC/ADCを集積するFPGA評価ボードのDAC入力波形とADC出力波形を観測し、DAC・ADCの動作確認を完了した。

研究開発項目 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術

FPGAを用いた異種信号収容誤り訂正フレームによる適応可変誤り訂正符号化・復号基本回路の実証実験に向けて、異種信号を収容するためのフレームフォーマットについて基礎検討を行ない、フォーマット案の作成を完了した。フレームフォーマットにおいて制御情報用の短符号長の誤り訂正回路構成の基本検討を実施し、実現可能性について見通しを得た。また、2022年度以降に計画している異種信号収容誤り訂正フレーミング・パラレルDSPコアに対応した実証実験の評価環境評価の環境の立ち上げを完了した。

研究開発項目 2-c) 非線形伝送基盤技術

① 超多値光変復調技術

理論検討、および、計算機シミュレーションにより固有値配置最適化を行った。雑音耐性の高い三角格子状の固有値配置を用いて、 $4096 (=10^{12})$ 値固有値変調信号の設計を行った。研究室既存の実験設備を用いて、設計した4096値固有値変調信号の伝送実験を行い、50km伝送後の固有値変調信号が復調可能であることを示した。本実験で得られた成果は、国際会議OFC2022にて発表した。また、広帯域光送受信器等の必要実験機材の調達、実験系の立ち上げを行った。

② 超高効率非線形光信号処理

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、シリコンリッチ窒化シリコン導波路特性（群速度分散、および、非線形パラメータ）の調査を行った。計算機シミュレーションにより、適切な導波路サイズを設定することにより、広帯域に亘ってフラットな波長変換特性が得られることを確認した。本シミュレーション結果は、電子情報通信学会OCS研究会にて発表した。

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

今年度、パルス発生法では数値解析により設計等の基礎検討を行うとともに実験のための光

学系の準備を開始し、非線形パルス伝送では振幅・位相変調での検討を行うための解析ソフトウェアを導入し、数値解析により振幅多値ソリトンの原理確認を行った。高速信号発生では、数値解析により入力電気信号比 4 倍広帯域な光ルートナイキストパルス発生に成功した。また、本研究費により部品等の購入を行い実験系の構築を進めた。非線形パルス伝送では本研究費により購入した解析ソフトにより基本ソリトンのみを用いた振幅多値伝送の数値解析結果からその可能性を提案した。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目 1 高効率光アクセス構成技術の研究開発

2021 年度の試作、設計結果に基づき 2022 年度から 2023 年度にかけて試作・改良試作を行い、2024 年度に評価を完了する。また、研究開発項目 1-a、1-b の成果については、これらを組み合わせた高効率光アクセスシステムプロトタイプを構成した統合試験を 2024 年度に実施し、End-to-End のデータ伝送試験を完了する。

研究開発項目 1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

①B5G-RAN 機能部

2022 年度までに RAN 機能のベースとなる疑似 CU-DU 機能、IF 多重信号生成部分をそれぞれ開発し、DU 部の少なくとも 1ch 分の信号生成部と IF 多重信号生成部を接続した RAN 機能の基本動作を確立する。更に、最終年度の 2024 年度に向けては、400MHz の 12 倍となる 4.8GHz 幅の広帯域 IF 多重信号を扱うことが可能な RAN 機能（既存 5G 仕様に基づく CU+DU+RU 相当機能）を開発する。

②モバイルフロントホール部

2021 年度の試作検討内容に基づき、2022 年度までに、光アナログ変調に適した小型光送受信機を開発し、送受信各 8 波長で異なる 8 拠点を 1 本の光ファイバで収容可能な構成でのアナログ IFoF 信号伝送特性の一次評価を完了する。2024 年度までに改良を加え、64QAM 伝送時のエラーベクトル誤差 (Error Vector Magnitude, EVM) 8%以下、および①の B5G-RAN 機能部と組み合わせた無線信号を含む End-to-End での双方向 100Gbit/s 超のデータ通信能力を実証する。また、アナログ RoMCF 伝送技術については、2022 年度までに双方向アナログ IFoF 伝送時の基本性能評価を行い、コア間干渉を考慮した高品質化のため信号条件を明らかにする。

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

2022 年度に計画している試作および実装検討では、本年度の基本検討結果に基づき、実機動作する実装用回路の作製を進め、ADC/DAC 数をアンテナの 1/2 以下で 2ch 以上収容する技術、および隣隔アンテナを想定した各種伝送方式の信号処理アルゴリズムの確立を目指す。

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

2022 年度はビームフォーミングデバイスの試作を進め、作製したビームフォーミングデバイスの基礎特性を測定する。またそれを基に、改良試作（第二次試作）の設計を行い、ビームフォーミングデバイスチップの設計を完成させる。

研究開発項目 2 高効率光メトロ構成技術の研究開発

DSP に関連する研究開発項目 2-a、2-b では、2021 年度に行った基本検討、アルゴリズム検討を基に、2022 年度に一次設計および一次試作を完了する。先進的な基盤技術に関連する研究開発項目 2-c、2-d では、2021 年度に行った方式検討や数値解析を基に、2022 年度に実験系の立ち上げや回路設計、特性評価を行う。

研究開発項目 2-a) 仮想光チャネル技術

2022 年度には仮想光チャネル対応符号、仮想光チャネル生成、および仮想光チャネル検出の基本回路の試作を行う。また、試作した基本回路を用いた光伝送実験を行い、仮想光チャネル

技術におけるアルゴリズムおよび回路の基本的な評価を行う。2023年度は、2022年度に実施した評価結果からのフィードバックを基に、アルゴリズムおよび回路の改良設計を行い、2024年度に実証実験による評価を完了する。

研究開発項目 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術

2022年度には異種信号収容の誤り訂正フレーミング仕様にもとづいて、異種 RAN サービスの最大収容数 4 チャンネル、5Gb/s 級の最大伝送速度の誤り訂正符号化・復号回路の一次試作を行う。また、誤り訂正符号化・復号回路単独での FPGA における実装の実現性の評価を行ない、2023年度は2022年度の評価結果をフィードバックさせて、改良設計を行い、2024年度に連携評価を行ない、評価を完了する。

研究開発項目 2-c) 非線形伝送基盤技術

① 超多値光変復調技術

広帯域光送受信器、および、120GSa/s 高速任意波形成形器を用いて、4096 値固有値変調信号の生成および Back-to-back 伝送の実証実験を行う。実験で得られた成果を国内学会や国際会議、学術雑誌論文等にて発表する。また、2023年度の 100km 級伝送実験に備えて、必要実験機材の調達、実験系の立ち上げ、基本データの取得を行う。

② 超高効率非線形光信号処理

非線形光信号処理システムの基本設計を行い、計算機シミュレーションにより多波長一括波長変換等のシステム実証を行う。システム基本設計に関して、国内学会、および、国際会議に参加し、国内外の最新の光デバイスの試作・応用技術を調査する。また、システム実証で得られた成果を国内学会や国際会議、学術雑誌論文等にて発表する。そして、翌年度の光回路試作評価に備えて、評価機器の調達を行う。

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

ルートナイキストパルス発生では、2022年度に光信号発生用の変調器や計測器を用いて DAC 帯域より 4 倍広帯域なパルス発生の実証実験を行う。実験で得られた成果を国内学会や国際会議、学術雑誌論文等にて発表する。また、2023年度以降のナイキスト OTDM (Optical Time Division Multiplexing) 伝送の送受信実験および DAC 帯域より 10 倍広帯域化パルス発生に備えて、パルスの評価、改善手法、必要機器の仕様詳細についての数値解析による検討を進める。

非線形パルス伝搬では、2022年度に非線形パルスの特性を利用した雑音低減技術に関して数値解析を行う。また、モード多重伝送のためのモードクリーナーの検討を開始する。また2023年度以降実施するパルス伝搬に向けた信号発生部の構築を行う。