

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久化との両立や、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 5 年度 (3 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 3 年度から令和 5 年度までの総額 810 百万円 (令和 5 年度 210 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	26	9
	外国出願	20	2
外部発表等	研究論文	10	7
	その他研究発表	158	64
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	14	0
	展示会	8	2
	受賞・表彰	9	2

(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

各小項目（B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術、アナログデジタル協調型 RoX 伝送技術、小型光ビームフォーミングデバイス技術）について、それぞれ2022年度までに実施した一次試作、基本性能検証結果に基づく改良試作を通じ、これらの技術の組み合わせにより100Gbit/s級の伝送速度の実現可能性を示した。

研究開発項目1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

2022年度までに試作したB5G-RAN機能部をベースに、TDDベースのミリ波無線信号を送受信するために必要な機能の拡張を行った。具体的には、従来8ch多重していたIF多重信号のうち低周波帯の2ch分を同期信号・制御信号用に転用し、アンテナ側での周波数変換用基準クロック信号および、Ethernet信号（制御・監視用）をアンテナ側のIF多重分離装置との間で送受する機能についての改修試作を行った。また、アンテナ側で受信信号からTDDタイミング信号を生成する機能、周波数変換用クロックのジッタ低減機能も実装した。これらの追加した各機能について、単体・結合試験を通じそれぞれの機能が正常動作することを確認し、アナログIFoF伝送方式を実システム内で利用するために必要となる機能の実装手法としての有効性を明らかにした。

また、RAN機能と連携したEnd-to-Endデータ伝送の検証として、2022年度までに試作したIF多重分離装置およびWDM光アナログ伝送システムを組み合わせたアナログRoFベースのMFH上に、5G基地局シミュレータと商用5Gスマートフォンを組合せた4x4分散MIMO環境を構築で、物理層以上のプロトコルも含めた双方向リアルタイムデータ通信が成立することを実証した。

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

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ネル分離・多重する処理回路の改良および評価を実施した。ダウンリンク・アップリンク双方の構成にて改良回路を用いて、10kmの光伝送部を含めた64QAM 10チャンネルの伝送実験を実施し、3GPP規格であるEVM8%以下を確認した。

1-b-2) 伝送最適制御技術

$\Delta\Sigma$ RoF方式について、5G High-bandで利用される28GHz以上の周波数を想定したRF出力実験にてEVM10.9%（シンボルレート12.5MSym/s、中心周波数32GHz）を確

認した。

波長多重により 10 チャンネル以上収容可能な光送受信ターミナル試作器により、1.5m の空間伝搬時に送信出力端から受信入力までで 5dB の光損失を確認。また、光重畳した RF 信号は、RoF 伝送と RoFSO 伝送で 10dB の損失差を確認。伝送損失差が光損失の 2 乗であることから、設計の妥当性を検証できた。

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

これまでに作成した基本設計に基づき、小型光ビームフォーミングデバイスの改良試作（第二次試作）を進め、スイッチデバイス部分の試作を完了した。また、1 次試作のデバイスを利用して、デバイス制御システム構築を完了した。これらの開発を通じ、最終的に 1 ユーザあたり 100 Gb/s の伝送容量を実現するために必要なデバイスやシステムに関する知見を得た。

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 ではそれぞれの連携評価を可能とするレベルまで、先進的な基盤技術に関連する研究開発項目 2-c、2-d では最終的な改良と実証を完了できる水準まで要素技術の完成度を高めた。

研究開発項目 2-a) 仮想光チャンネル技術

DSP 当たりの光チャンネル数を現行の 1 チャンネルに対して、異種 RAN を含めて 10 倍可変とする仮想光チャンネル技術について、4 倍可変とするデジタル回路の改良設計を実施し、仮想光チャンネル生成・検出の主要機能を実装した DAC/ADC 集積 FPGA を接続し、2 チャンネル多重電気信号の変復調動作を確認した。また、同 FPGA と光部品を組み合わせることで光信号を生成した。また、複数 FPGA で分散処理するデジタル回路構成において 4 チャンネル搭載可能性を確認した。

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

誤り訂正ブロックの回路設計ならびに FPGA への実装を行い、回路検証としてループバック試験により誤り訂正単体性能評価を実施した。変調方式ごとの性能評価結果を通じ誤り訂正部の動作を確認し、性能上問題がないことを確認した。

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

4096 ($=2^{12}$) 値固有値変調信号にニューラルネットワーク復調および SD-FEC を適用することで伝送距離の長延化が可能であることを示した。また、伝送実験を行い、1200km 伝送後の固有値変調信号が伝送が可能であることを示した。これらの検討で得られた成果は、国際会議 OFC2024 等にて発表した。

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、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。また、デバイスの詳細設計を行い、デバイス試作を完了した。

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

広帯域光ルートナイキストパルス発生法では数値解析および原理確認実験及び特性改善を行った。当初の実験では発生した光ルートナイキストパルスに中心周波数に対して非対称なスペクトルを示す状況であったが入力光の調整により非対称性を改善することができた。また、数値解析により入力光波形を変化させることによりロールオフ率可変、光 IQ 変調器を用いた方式では入力光帯域幅の 1.8 倍、光強度変調器を用いる方式では入力光帯域幅の 4-16 倍の光ルートナイキストパルス発生の可能性に関する知見を得た。また、光相関受信器の参照光に用いる光ルートナイキストパルスをパルス列化することにより非線形光学効果に起因する符号間干渉によ

る信号品質劣化抑制方法を提案し、数値解析によりその効果を確認した。

多値変調ソリトンは 40 GBaud/振幅2値、20 GBaud/振幅4値、および位相2値の信号においてソリトン制御による信号品質劣化抑制を行う方法について数値解析を行いこの効果についての知見を得た。

MLPFG によるマルチコア光ネットワーク用の光スイッチを提案し、2 コア・2 モードおよび3 コア1 モードスイッチの数値解析を実施した。特許出願するとともに2 コア(1 モード)光スイッチの原理確認実験を実施したがファイバの制約により所望の特性は得られなかった。一方で特性評価のために実施した数値解析で MLPFG の偏波無依存化技術を見出したため特許出願を行った。

(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

高効率光アクセス構成技術については、研究開発の推進および標準化活動推進を通じて2030年頃のB5Gの社会実装を目指す。特にファイバ敷設に制約のある過疎地や密集地等においてB5G基地局の普及を加速し、幅広いエリアでB5Gサービスの提供を目指す。

研究開発項目1-a) B5G-RAN 収容高効率アクセス構成技術

アナログIFoF/RoF技術の社会実装に向け、標準化活動を通じた認知拡大・技術普及・参画企業の拡大に努める。O-RANでは、2023年度よりnGRG(next Generation Research Group)のRS01において「6Gミリ波分散アンテナのユースケース分析」に着手しており、今後は同ユースケースの実現手法としてアナログIFoF/RoF技術の適用可能性を示すことを予定している。2024年度にはアーキテクチャ検討、また2025-27年頃にかけてO-RAN内のWGにおける標準化議論を行うことを想定している。また、関連する案件としてIOWN Global ForumのIMN-TF(IOWN for Mobile Network Task Force)において同じく分散アンテナとアナログIFoF/RoF技術を使ったアーキテクチャ像の検討する活動を予定している。

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

双方向高分解多重・分離技術におけるアナログデジタル協調回路については変調多値度を256QAMとした光伝送実験を行い、10チャンネル以上の収容を目指す。また、広帯域IFoFを分離する中間ノードからさらに離隔した場所に分散的に配置されたアンテナとの信号伝送について、実装した試作品による検証を完了し、素子数256以上伝送を可能とする拡張性の根拠を示す。

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

継続課題の「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」(採択番号:08401)において改良試作を完了させ、コンパクトなビームフォーミングデバイスを実現する。また、本研究課題において作製したデバイスと制御システムにより、1ユーザあたり100Gb/sの伝送が可能であることを示す。

研究開発項目2: 高効率光メトロ構成技術の研究開発

継続課題(採択番号:08401)に引き継ぎ、元課題における最終目標達成に向けた研究開発を推進する。すなわち、DSPに関連する研究開発項目2-a、2-bでは相互の連携評価を行う。先進的な基盤技術に関連する研究開発項目2-c、2-dではこれまでの試作・伝送実験等に基づき最終的な改良と実証を行う。

研究開発項目2-a) 仮想光チャネル技術

2023年度における4倍可変とするデジタル回路の改良設計・検証(=回路構成を考慮した機能シミュレーション)の結果に基づいて、2-bと連携した評価を完了し、アルゴリズムおよび回路における仮想光チャネル数可変4倍、将来のLSI化時の10倍可変の実現性を確認することを目指す。

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

仮想光チャネルで生成されるデータに対して性能評価を実施し、最大収容数 4 チャネル、5Gb/s 級の最大伝送速度の誤り訂正符号化・復号回路の評価・改良を実施し、LSI 化時の異種 RAN サービス同時収容(10 チャネル以上)および最大伝送容量 数 Tbps の実現性を示す。

研究開発項目 2-c) 非線形伝送基盤技術

得られた研究成果は、速やかに光通信分野の主要国際会議 (OFC、ECOC、OECC 等) に投稿するとともに、論文誌 (Journal of Lightwave Technology、Optics Express、IEICE Transactions 等) への投稿も推進する。また、技術解説などを継続的に発信することで、研究への取組および研究成果の優位性を幅広い業界関係者に認知してもらい、商用化に向けた連携先開拓を目指す。

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

100 GBaud 超のメトロネットワークの実現に向け、継続課題 (採択番号: 08401) において本課題で作成した光ルートナイキストパルス発生器を用いた光ナイキスト時分割多重伝送の多重および分離実験、光ソリトン制御による伝送ペナルティ、伝送 S/N 比改善量の評価、モードクリーナーの特性評価のための LPFG 部の数値解析を行い、将来の非線形信号処理とモード多重化を用いた通信システムの実現可能性を示す。