

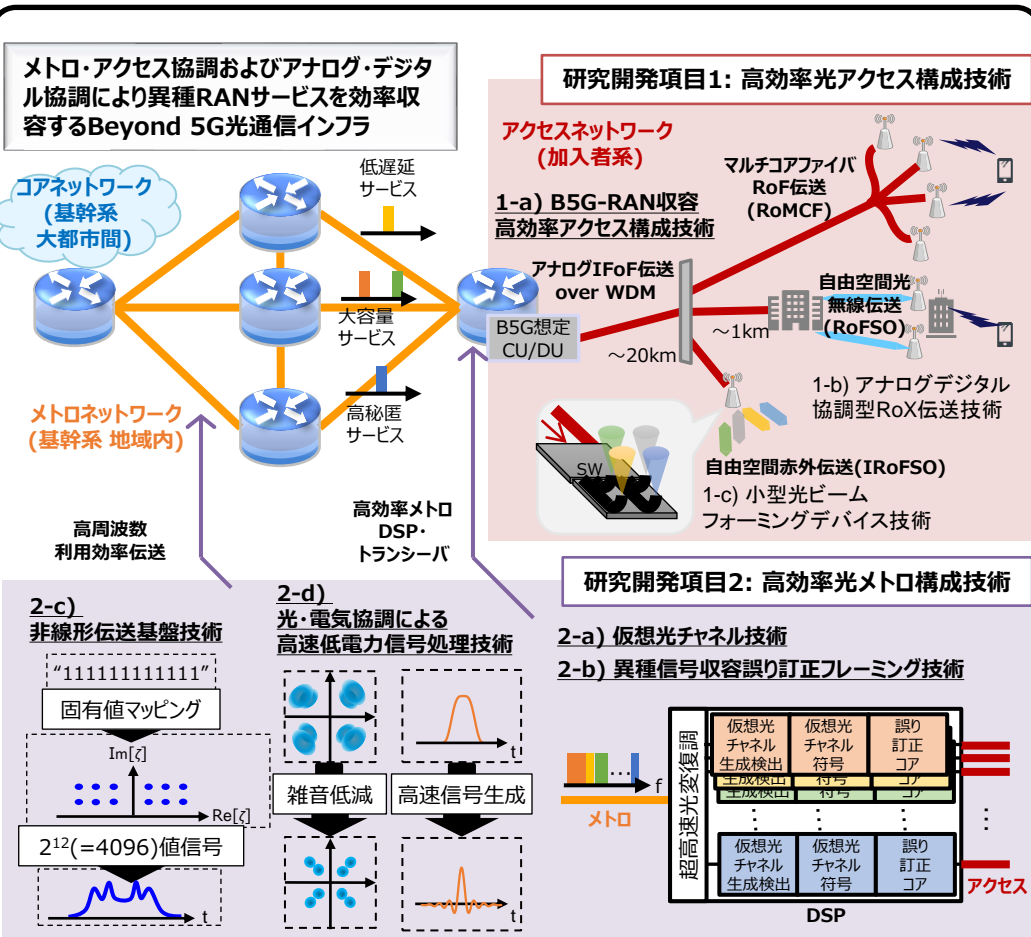
## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆受託者 三菱電機(株)、(株)KDDI総合研究所、(国研)産業技術総合研究所、(大)大阪大学、(大)大阪公立大学
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和5年度(3年間)
- ◆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)

## 2. 研究開発の目標

100Gbit/s超級高効率モバイルフロントホール伝送、仮想光チャネル数可変4倍以上の高効率メトロ伝送(同、10倍以上の回路合成)、両者を組み合わせたメトロアクセス伝送実証を完了する。

## 3. 研究開発の成果



**研究開発成果1-a B5G-RAN収容高効率アクセス構成技術**

IF多重信号を扱うRAN機能の確立、多拠点収容モバイルフロントホール(MFH)技術の確立が課題。本研究開発では、アナログIFoFに基づくMFHにおいてTDDベースのミリ波無線信号の送受信および遠隔装置制御のため同期・制御信号多重装置の試作を完了。また4x4分散MIMO信号のリアルタイム通信に成功

**研究開発成果1-b アナログデジタル協調型RoX伝送技術**

IFoFをベースとした光伝送部において、ハードウェアの低減、柔軟なアンテナ収容および品質担保が課題。ADC/DAC数を低減可能な回路により、ダウンリンク/アップリンク10km伝送において、64QAM(EVM8%以下)×10ch×300MHzの収容に成功。28GHz以上の周波数を想定したΔΣ-DACを用いたRF出力実験にてEVM10.9%(12.5MSym/s、中心周波数32 GHz)を確認。波長多重により10チャネル以上収容可能な光ターミナル試作器を用い、1.5mでのRoFSOによるRF信号伝送を行い設計妥当性を確認。

**研究開発成果1-c 小型光ビームフォーミングデバイス技術**

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、スイッチ部作製を完了した。また、1次試作デバイスを利用し、制御システムを構築した。これらを通じ、最終的に1ユーザーあたり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。

**研究開発成果2-a 仮想光チャネル技術**

光トランシーバ・DSPにおける資源利用の高効率化が課題。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、4倍可変とするデジタル回路の主要機能について改良設計、改良評価を完了した。

**研究開発成果2-b 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術**

4チャネルの異種信号を同時収容する回路をFPGAへの搭載し、変調方式ごとにエラー特性を取得し、回路の動作確認を行うことが課題。本研究開発では、ループバック試験により4チャネルの異種信号を収容したときの誤り訂正性能の取得を行ない、5Gb/sで4チャネル収容を行う回路の動作確認に成功。

**研究開発成果2-c 非線形伝送基盤技術**

12bit/symbol超級の超多値固有値変調信号の実現が課題。本研究開発では、三角格子状の固有値配置を用いて、4096(=2<sup>12</sup>)値固有値変調信号の設計を行った。設計した多値固有値変調信号の1200km伝送に成功。

**研究開発成果2-d 光・電気協調による高速低電力信号処理技術**

高速信号発生・伝送では回路規模の並列化・高速化に伴う消費電力や伝送遅延の増大が課題。本研究開発では、4倍広帯域幅の光ルートナイキストバルスの発生実験、および光ソリトン制御による雑音低減効果を強度変調のみでなく位相変調にも適用することに成功。

## 1-a B5G-RAN収容高効率アクセス構成技術

・最終目標：4.8GHz幅広帯域IF信号を扱うRAN機能の開発、および同信号を送受信可能な光アナログ送受信機を開発し、8拠点との間で双方向100Gbps超のデータ通信を実証する。RoMCFについては、4コア合計で500Gbps以上の光ファイバ無線信号伝送の拡張可能性を示す。

・2023年度目標：2022年度までに試作したB5G-RAN機能部にTDDベースのミリ波無線信号を送受信するために必要な同期・制御信号伝送機能の拡張を行う。また、提案方式に基づくMFH構成でEnd-to-Endの双方向データ通信を実証する。

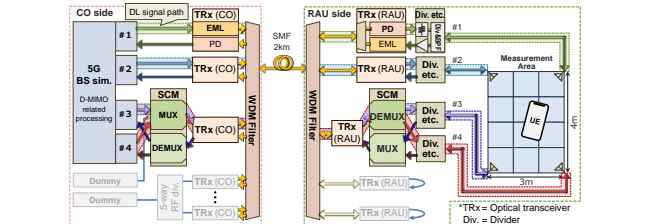
・2023年度実施内容：IF多重分離装置に同期信号・制御信号を多重する機能、およびアンテナ側でTDDタイミングを抽出する機能を追加する改修試作を実施。またアナログIFoFベースのMFHで4x4分散MIMOを収容する環境を構築し、5G基地局シミュレータと商用5G端末間での双方向リアルタイムデータ伝送実験を実施。

・研究開発期間全体の結果：IF多重分離装置の改修試作を完了し、同期信号の伝送、Ethernet信号の双方向伝送を実証。またアンテナ側で伝送された無線信号からTDDタイミングを抽出し5Gミリ波のフレーム構成に基づきTDD上下切替タイミング信号の生成を実証。またIF多重・WDMを組み合わせたアナログIFoFベースMFHを介し4x4分散MIMO環境を構築(n77/100MHz幅の信号を利用)。商用5G端末と上位サーバ間で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。



試作装置 (収容局側)

試作装置 (アンテナ側)



A3	395.6 (80.2)	396.1 (80.2)	396.2 (80.2)	395.6 (80.2)	A5 & no.1
	395.8 (80.2)	396.2 (80.2)	395.8 (80.2)	395.8 (80.2)	
A1	395.8 (80.2)	396.0 (80.2)	395.8 (80.2)	395.8 (80.2)	A5 & no.5 DL (UL)

図1-a-1：同期・制御伝送機能を実装したIF多重分離装置(上)アナログIFoF+4x4MIMO双方向リアルタイム伝送実験(中・下)

## 1-b アナログデジタル協調型RoX伝送技術

・最終目標：IFoF伝送においてADC/DAC数をアンテナの1/2以下とし、256QAM信号を10チャンネル以上収容するアナログデジタル協調型回路(AD協調回路)の設計およびFPGA実装による検証を完了し、トータルレート100Gb/s以上とする拡張性の根拠を示す。また、分散配置されたアンテナとの伝送2方式以上における各種性能劣化要因を明らかにし、信号を高効率収容する処理方式の設計手法を確立する。試作品検証により素子数256以上の伝送を可能とする拡張性を示す。

・2023年度目標：AD協調回路の改良評価を完了し、64QAMの変調信号10チャンネル以上を収容可能であることを実証する。また、アンテナとの信号伝送2方式以上について、アンテナ素子数10以上の信号を伝送する信号処理方式の設計手法を確立する。

・2023年度実施内容：①AD協調回路の改良評価、② $\Delta\Sigma$ RoF方式の設計・評価、③RoFSO方式の設計・評価

・研究開発期間全体の結果：①改良回路により双方向(DL:ダウンリンク/UL:アップリンク)64QAM×10ch×300MHzの収容実験(SMF10km伝送)を実施。EVM8%以下を確認(図1-b-1)。②22年度に実装検討した $\Delta\Sigma$ -DACを用いた32GHz帯(~12.5MSym/s)のRF出力実験にてEVM10.9%を確認(図1-b-2)。

③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5dBの光損失を確認。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(図1-b-3)。

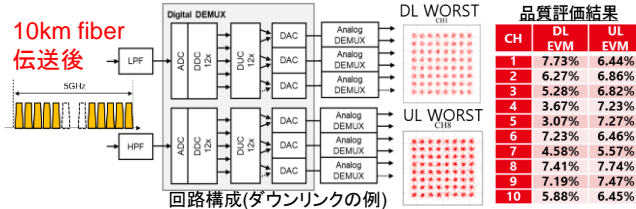


図1-b-1：①AD協調回路の10ch収容実験

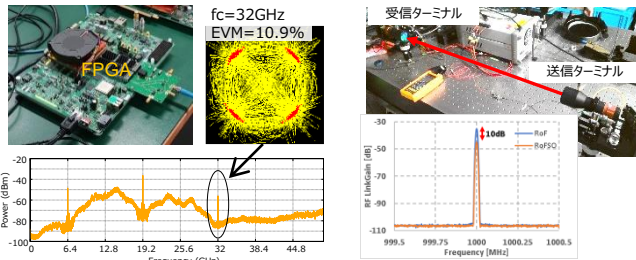


図1-b-2：②32GHz帯RF出力実験 図1-b-3：③RoFSO伝送実験

## 1-c 小型光ビームフォーミングデバイス技術

・最終目標：コンパクトで低コストな光ビームフォーミングデバイスを実現し、1ユーザあたりの伝送速度100 Gbit/s以上を達成する。

・2023年度目標：2022年度までの基本設計に基づき、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)に着手し、これを進める。また、連携評価を想定し、1次試作のデバイスを利用して、その制御システムの開発を進める。

・2023年度実施内容：昨年度完了した設計を反映させたフォトマスクを調達し(図1-c-1)、これらを用いて産総研半導体パイロットラインでの改良試作を進めた。また、予算縮小のため産総研所有資産を活用した制御システムの開発も進めた。

・研究開発期間全体の結果：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。エレファントカブラ部分の工程を進め完了次第実装工程に移る。また、デバイス制御システムの構築を完了した。これにより、255個のスイッチを個別に制御可能となった。

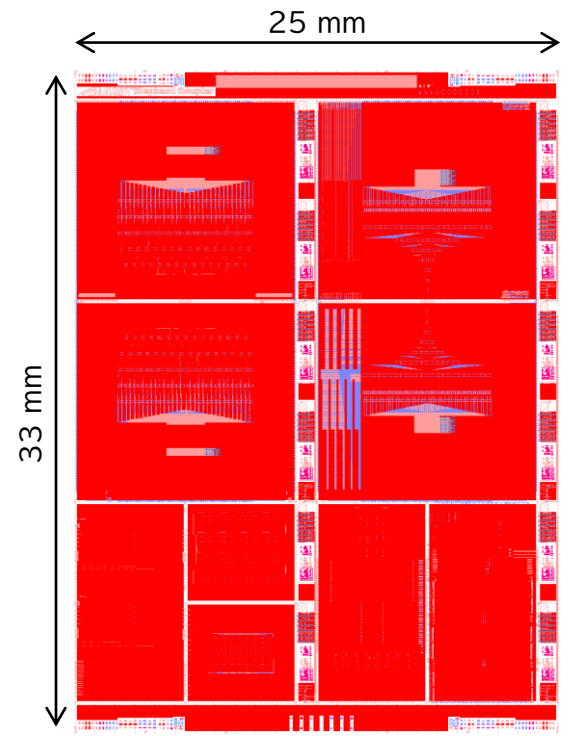


図1-c-1：調達したフォトマスクの全体図。試作には9枚のフォトマスクを用いる。

## 2-a 仮想光チャネル技術

・最終目標：DSP当たりの光チャネル数を異種RANを含めて10倍可変とするDSPについて、デジタル回路設計・検証を完了する。また、FPGAによりDSP当たりの4チャネル以上の光チャネル数可変について低速での原理実証を完了する。

・2023年度目標：仮想光チャネルのデジタル回路の改良設計、改良評価の完了。

・2023年度実施内容：(1) 送信・受信デジタル回路の改良とFPGA等の機材による改良評価。  
(2) 仮想光チャネル数4倍可変性の確認。

・研究開発期間全体の結果：(1)送信・受信デジタル回路の改良設計・検証を完了(図2-a-1)。デジタル回路を実装したDAC/ADC集積FPGAを接続し、2チャネル多重電気信号の変復調動作を確認(図2-a-2)。また、同FPGAを用いた光信号生成試験を実施(図2-a-3)。(2)複数FPGAで分散処理するデジタル回路構成において4チャネル搭載可能性を確認。デジタル回路の方式・実装パラメータを変数化し、大規模最適化を適用する開発手法を考案し、評価完了。



図2-a-1：仮想光チャネル生成・検出回路モデル

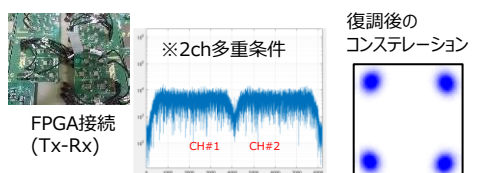


図2-a-2：FPGA実機検証(変復調動作)



図2-a-3：光信号生成試験

## 2-b 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術

・最終目標：異種RANサービス数10チャネル以上を同時収容する仮想光チャネル分割パラレル符号化誤り訂正フレーム構成とそのフレームに最適な適応可変誤り訂正符号を開発する。また、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・復号回路の基本回路の異種RANサービスの最大収容数4チャネル、5Gb/s級の最大伝送速度を実証し、将来の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。

・2023年度目標：異種RANサービスの最大収容数4チャネル、5Gb/s級の最大伝送速度の誤り訂正符号化・復号回路について、内部回路の改良設計ならびに動作検証を行なう。設計した回路で誤り訂正符号化処理したのに対して直接エラーを付加し、復号ブロックにループバックさせて入力させて動作することを確認できるようにすることを目標とする。

・2023年度実施内容：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。

・研究開発期間全体の結果：変調方式ごとのループバック試験による性能評価結果から、設計回路の動作確認ができた。

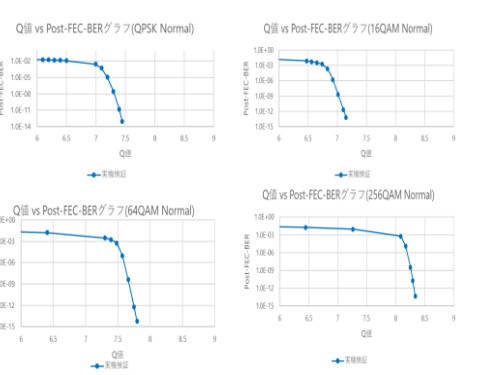


図2-b-1：ループバック試験による性能評価結果

## 2-c 非線形伝送基盤技術

### ①超多値光変復調技術

・最終目標：12bit/symbol級の非線形伝送を実験により実証する。また、100km級非線形伝送を実験により実証。

・2023年度目標：12bit/symbol級の固有値変調信号の100km級伝送完了。

・2023年度実施内容：設計した4096値(=2<sup>12</sup>値)固有値変調信号の伝送実験を実施。また、固有値変調信号へのSD-FECの適用を検討。

・研究開発期間全体の結果：SD-FECを適用することにより4096値固有値変調信号の1200km伝送に成功(図2-c-1)。

### ②超高効率光信号処理技術

・最終目標：集積型光信号処理デバイスを試作し、多波長チャンネル一括波長変換等の多チャネル一括光信号処理を検証。

・2023年度目標：デバイスの試作完了。

・2023年度実施内容：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の調査を実施。調査結果を基にデバイスを設計し、試作を完了。

・研究開発期間全体の結果：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。デバイスの試作完了。

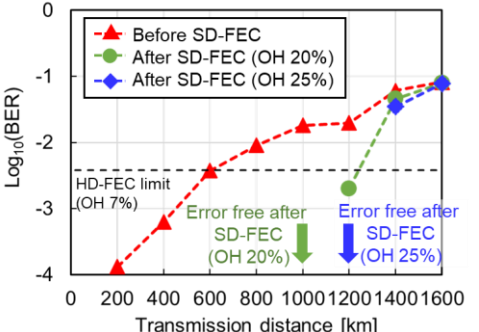


図2-c-1：伝送後のBER特性

## 2-d 光・電気協調による高速低電力信号処理技術

・最終目標：非線形光信号処理による高速信号発生、伝送ペナルティ、伝送S/N比改善量の評価、4モードレーティングの特性評価を行い、100GBaud超のメトロネットワークの実現に向けた非線形信号処理とモード交換器を用いた通信システムの基盤技術の原理実証を行う。

・2023年度目標：光ルートナイキストパルス発生器の改良と、送受信器特性測定方法の検討。符号間干渉を抑える相関検波法の原理検証。多値光ソリトンに対するソリトン制御効果の評価。マルチコアファイバのコアスイッチング技術とスイッチ部で発生するモードクロストーク評価。

・2023年度実施内容：4倍広帯域光ルートナイキストパルスの発生の実証と特性改善、光パルス列を用いた符号間干渉低減の原理検討。数値解析により各変調方式に対するソリトン制御効果の評価を実施。また、ファイバレーティングによるモード変換技術を応用した4コア光スイッチ、モードクリーナファイバレーティングの偏波無依存化の数値解析を実施。

・研究開発期間全体の結果：10GHz正弦波で駆動した強度変調器出力光から40GBaud用光ルートナイキストパルス発生とスペクトル非対称性の低減に成功(図2-d-1)。また、数値解析により符号間干渉低減法の効果を確認。2ASK, 4ASK, DPSK, およびDQPSK方式においてソリトン制御による雑音低減の可能性を数値解析により確認。ファイバレーティングの偏波無依存化を確認し、特許を出願。

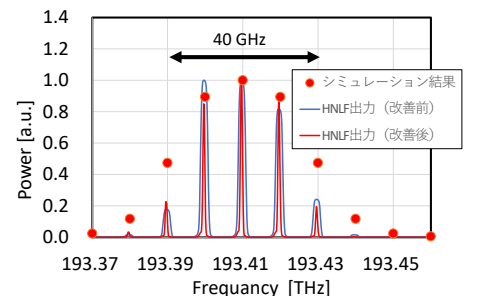


図2-d-1：特性改善前後の光ルートナイキストパルススペクトル

#### 4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
26 (9)	20 (2)	10 (7)	158 (64)	0 (0)	14 (0)	8 (2)	9 (2)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

- (1) 研究開発運営委員会をオンライン開催(2023年10月10日、2024年3月12日): 大学・企業からなる運営委員会メンバ、NICT連携オフィサー、受託者間で研究開発状況、到達目標、今後の進め方、成果発信の方法等を認識共有
- (2) 受託者間調整会議をオンライン開催(2023年8月1日、2023年8月23日、2024年1月15日、2024年3月12日): 全受託者で研究開発の進捗状況を共有(※個別会議は随時実施)
- (3) 主要成果の特許出願、国内外の論文・学会における発表を実施
  - 電子情報通信学会PN研究会: 2023年4月28日、慶応義塾大学新川崎タウンキャンパス
  - 国際会議CLEO2023: 2023年5月8日、米国カリフォルニア
  - 電子情報通信学会IEICE: 2023年5月11日
  - 電子情報通信学会CQ研究会: 2023年5月18日、高松市レクザムホール
  - 電子情報通信学会OCS研究会: 2023年6月9日、高松センタービル
  - 電子情報通信学会PN研究会: 2023年6月9日、高松センタービル
  - 国際会議CLEO/Europe-EQEC: 2023年6月28日~30日、米国カリフォルニア
  - 国際会議OECC2023: 2023年7月2日、中国 浦東シャングリラ上海
  - 電子情報通信学会MWPThz/OPE研究会: 2023年7月20日、室蘭工業大学
  - 電子情報通信学会CS研究会: 2023年7月27日、八丈町商工会
  - 電子情報通信学会サイエティ2023: 2023年9月12日~15日、名古屋大学東山キャンパス
  - 国際会議PSC2023: 2023年9月28日~29日、伊マントバ
  - 国際会議ECOC2023: 2023年10月4日~5日、英グラスゴー
  - 電子情報通信学会OFT研究会: 2023年10月12日、機械振興会館
- 電子情報通信学会OCS研究会: 2023年10月12日、YIC京都
- 電子情報通信学会OCS研究会: 2023年10月19日、高知共済会館
- IEEE Photonics Society Kansai Chapter: 2023年11月11日、オンライン開催
- 電気関係学会関西連合大会: 2023年11月25日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- 電子情報通信学会PDW2023: 2023年12月8日、機械振興会館
- 電子情報通信学会CS/OCS研究会: 2024年1月12日、鹿児島市勤労者交流センター
- レーザー学会講演会年次大会: 2024年1月17日~18日、日本科学未来館
- 電子情報通信学会OCS研究会: 2024年2月21日、鹿児島市勤労者交流センター
- 電子情報通信学会総合大会: 2024年3月6日~7日、広島大学 東広島キャンパス
- 電子情報通信学会学生会研究発表講演会: 2024年3月7日、関西大学千里山キャンパス
- 国際会議OFC2024: 2024年3月25日、米サンディエゴ
- 電子情報通信学会総合大会: 2024年3月25日、広島大学 東広島キャンパス
- (4) 広報発表・展示会にて成果を発信
  - OCSサマースクール2023展示会: 2023年7月20日、オンライン開催
  - 第37回OCSシンポジウム: 2023年12月14日、品川フロントビル
- (5) 国際会議・国内研究会にて受賞
  - IEEE Photonics Society Kansai Chapter Best Student Presentation Award: 2023年11月11日
  - IEEE Photonics Society Kansai Chapter Student Encouragement Award: 2024年1月11日

#### 5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- 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た活動の一環として、O-RAN nGRG(next Generation Research Group)やIOWN Global ForumのIMN-TF(IOWN for Mobile Network Task Force)における標準化活動を通じて、同技術の認知拡大・技術普及・参画企業の拡大に努める。
- 1-b) アナログデジタル協調型RoX伝送技術: AD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。
- 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100 Gb/sの伝送が可能なることを示す。
- 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。
- 2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術: 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チャンネル以上)および最大伝送容量 数Tbpsの実現性を示す。
- 2-c) 非線形伝送基盤技術: ①超多値光変復調技術については、復調処理の計算量削減、および、伝送距離のさらなる長延化を検討する。②超高効率非線形光信号処理については、試作したデバイスの評価を行う。
- 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、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。