

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

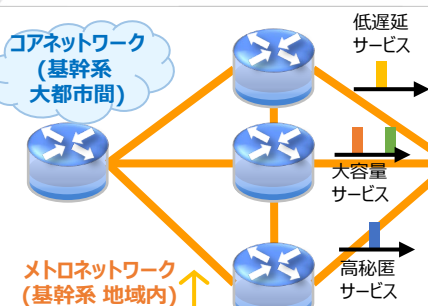
- ◆研究開発課題名 : Beyond 5G通信インフラを高効率に構成するメトロアクセス光技術の研究開発
- ◆受託者 : 三菱電機(株)、(株) KDDI総合研究所、(国研)産業技術総合研究所、(国)大阪大学、(公)大阪公立大学
- ◆研究開発期間 : 令和3年度～令和6年度(4年間)
- ◆研究開発予算(契約額) 令和3年度から令和4年度までの総額600百万円(令和4年度319百万円)

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(可変チャネル数可変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

メトロ・アクセス協調およびアナログ・デジタル協調により異種RANサービスを効率収容するBeyond 5G光通信インフラ



研究開発項目1: 高効率光アクセス構成技術

アクセスネットワーク (加入者系)

1-a) B5G-RAN収容高効率アクセス構成技術

アナログIFoF伝送 over WDM

B5G想定 CU/DU

マルチコアファイバ RoF伝送 (RoMCF)

自由空間光 無線伝送 (RoFSO)

自由空間光 赤外伝送 (IRoFSO)

1-b) アナログデジタル協調型RoX伝送技術

1-c) 小型光ビームフォーミングデバイス技術

研究開発項目2: 高効率光メトロ構成技術

2-a) 仮想光チャネル技術

2-b) 異種信号収容誤り訂正フレーミング技術

超高速光変復調

仮想光チャネル生成検出

仮想光チャネル生成検出

誤り訂正 コア

誤り訂正 コア

アクセス

2-c) 非線形伝送基盤技術

固有値マッピング

Im[z]

Re[z]

2¹²(=4096)値信号

t

2-d) 光・電気協調による高速低電力信号処理技術

雑音低減

高速信号生成

t

t

t

t

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、8chの無線信号を扱うIF多重信号処理部、BFアンテナ、波長多重伝送に基づき8拠点を収容するMFH部(光アナログIFoF送受信機)、4コアMCF用FIFOの一次試作を完了。

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を試作し、256QAM 2チャネル収容時に3GPP要求を満足する性能を達成。ΔΣRoX方式について回路規模見積もりを行い、FPGA1石で10以上の信号を同時収容可能であることを確認。また実機評価にて信号伝送2方式(RoF/RoFSO)を想定した受信電力で回線が成立することを確認。RoFSO方式について、回線計算から10ch WDM、200m伝搬可能なことを確認した。また、10cm角程度の小型な光ターミナル部の試作を完了。

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基本動作の確認が課題。本研究開発では光スイッチ型と光フェーズドレイ型の2方式を検討し、それぞれの基本動作の確認に成功。それを基に改良試作の設計をした。

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設計・検証を完了した。

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への搭載することが課題。本研究開発では、変調方式ごとの性能評価を実施し、エラーフロアが発生していないことを確認した。また、誤り訂正符号化回路と復号回路をFPGAボードに搭載できることが確認できた。

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。三角格子状の固有値配置を用いて、4096 (=2¹²) 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50km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・伝送では消費電力の増大が課題。本研究開発のパルス発生では数値解析により入力信号比10倍以上の帯域をもつ光信号を発生させる条件をみだし、DSPを使わないAPSK伝送にソリトンを使用できる可能性を示した。

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。

・2022年度目標：①B5G-RAN機能部：収容局側およびアンテナ側それぞれで動作するIF信号多重・分離部を試作し、少なくとも1ch分について、RAN機能の基本動作を確立する。②モバイルフロントホール(MFH)部：小型光送受信機および収容局側光アップの調達を完了し、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する構成で光アナログ伝送性能評価を完了する。

・2022年度実施内容：①B5G-RAN機能部：8ch分のIF信号を送受信可能なIF多重分離部の一次試作を実施。また各アンテナサイトで5Gミリ波を送受信するBFボックスを試作。②MFH部：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光アナログ送受信機の一次試作を実施。

・結果：①B5G-RAN機能部：400MHz幅の無線信号8ch分を多重分離できるフルデジタル方式のIF多重分離処理装置の試作装置仕様を検討し一次試作を完了。また、IF⇄ミリ波を相互に周波数変換する機能とミリ波信号のBF機能を有したBFボックスを試作し、各製品の消費電力からアンテナ側装置の消費電力机上試算を行い、現行装置比で約50%の電力削減効果が得られることを確認した。②MFH部：上り・下り各8波長、計16波長を用いてIF多重信号を双方向伝送することが可能な光アナログ伝送システム（収容局側・アンテナ側）の一次試作を完了し、帯域幅400MHzの64QAM無線信号を最大12ch分周波数多重した信号を一心双方向伝送で15km伝送可能なことを確認した。また、2021年度のIFoF多重伝送の容量を更に8倍に拡張し、伝送容量換算で約10.5Tbps・多重Ch数4608の大容量・多拠点収容IFoF伝送実験に成功した。

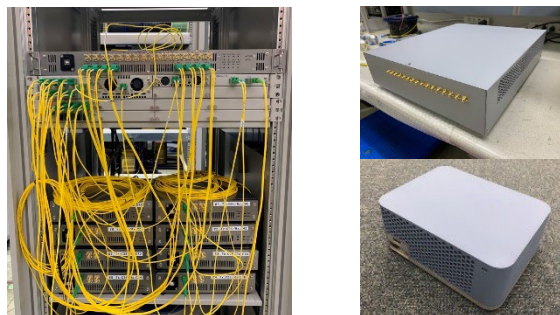


図1-a-1：光アナログ伝送システム(左)
IF多重分離装置(右上)およびBFボックス(右下)

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。

・2022年度目標：AD協調回路の設計・試作を完了し、256QAM信号を2チャンネル以上収容可能であることを確認する。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アルゴリズムを確立する。

・2022年度実施内容：①AD協調回路の試作、② $\Delta\Sigma$ RoF方式の実装検討、③RoFSO方式の実装検討

・結果：①試作回路を用いて2チャンネル収容時ループバック検証を行い、256QAM収容時に3GPP要求値3.5%以下を満足し、中間目標を達成した(図1-b-1)。さらに、光伝送部を含めた64QAM×4チャンネルの伝送試験を成功している。② $\Delta\Sigma$ RoX方式について回路規模見積もりを行い、FPGA1石で10以上の信号を同時収容可能であることを確認。伝送路損失がRF信号品質に与える影響を評価し(図1-b-2)、信号伝送2方式(RoF/RoFSO)を想定した受信電力で回線が成立することを確認した。③回線計算を実施し、光アンテナの開口径1cmにて、10chのWDM、200mの伝搬が可能なことを確認した。ターミナル部の空間光学系設計、機構設計を実施し、10cm角程度の十分小型なターミナルの試作を完了した。(図1-b-3)。

EVM評価結果 Ch1: 3.45%, Ch2: 3.19%



図1-b-1：①AD協調回路のループバック検証

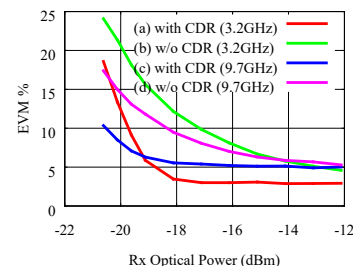


図1-b-2：② $\Delta\Sigma$ RoF方式の部分評価



図1-b-3：③RoFSO光
ターミナル試作結果

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 Gb/s以上を達成する。

・2022年度目標：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とともに、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。

・2022年度実施内容：ビームフォーミングデバイスとして光スイッチ型とフェーズドアレイ型の2種類を作製した(図1-c-1(a))。これらのデバイスの基礎特性を評価した。これらの結果と、技術開発運営委員会での議論を基に、光スイッチ型を軸に改良試作（第二次試作）の設計をした。

・結果：光スイッチ型とフェーズドアレイ型それぞれについてビームの偏向動作を確認した。光スイッチ型については信号伝送も評価し、10 GbpsのOOK信号の導通を確認した(図1-c-1(b))。フェーズドアレイ型についてはビーム偏向動作確認までだが、光スイッチ型にはない特徴を持つため、引き続きこちらについても開発を進める。ビームフォーミングデバイスチップの設計を完成させたことで、今年度の目標を達成した。

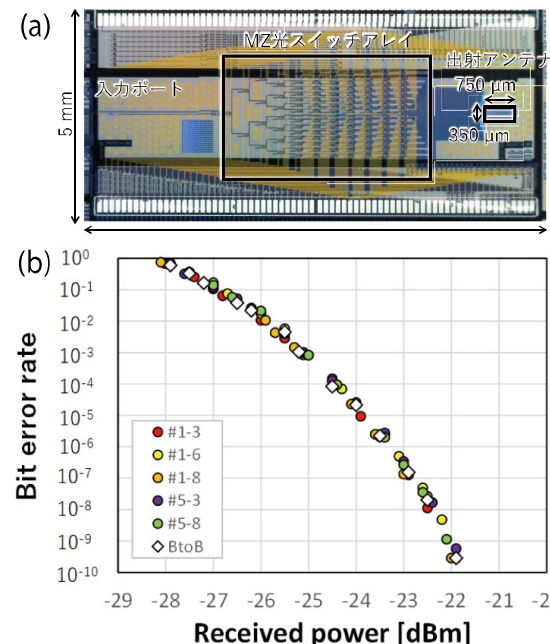


図1-c-1:(a) 作製したスイッチ型チップ。(b)10 Gbps
OOK信号のBERカーブ。

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。

・2022年度目標：仮想光チャネルの基本回路の設計試作と基本評価の完了。

・2022年度実施内容：(1)FPGAに搭載する送信・受信デジタル回路の設計試作。(2)FPGA等の機材による基本動作試験。

・結果：(1)送信・受信デジタル回路の基本設計・検証を完了(図2-a-1)。また、仮想化による効果検証で従来比1/3の物理トランシーバ数の削減効果の見積り(図2-a-2)。(2)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DAC出力・ADC入力動作を確認(図2-a-3)。また、一部機能を実装したリアルタイム伝送検証を実施。

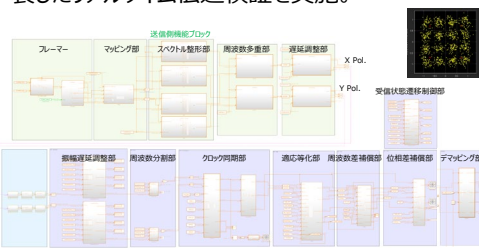


図2-a-1：仮想光チャネル生成・検出回路モデル

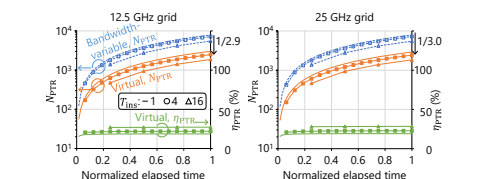


図2-a-2：必要な物理トランシーバ数の見積り

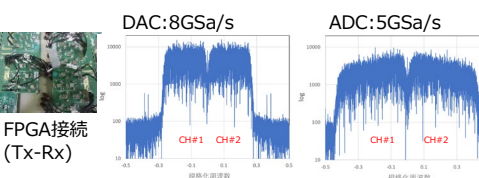


図2-a-3：DAC/ADC集積FPGAの波形観測

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。

・2022年度目標：異種信号収容の誤り訂正フレームを構成し、そのフレームに適した誤り訂正符号化・復号アルゴリズムと基本回路の一次設計と評価を完了する。

・2022年度実施内容：4チャネルを収容する誤り訂正符号化回路の設計ならびに4チャネルから1チャネル分を選択して復号回路の設計を行い、FPGAへの実装の実現性を検討した。

・結果：変調方式ごとの性能評価を実施し、エラーフロアが発生していないことが確認できた。また、誤り訂正符号化回路1ボードと復号回路3ボードに搭載できることが確認できた。

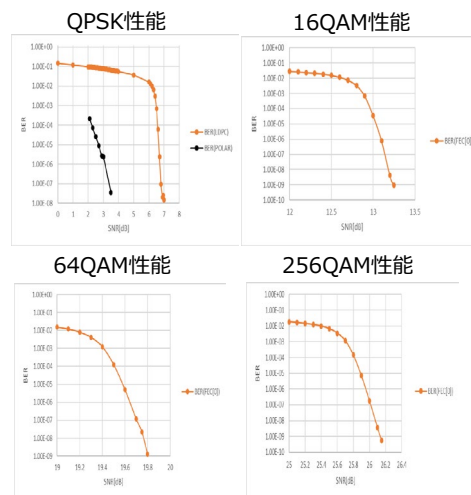


図2-b-1：変調方式ごとの性能評価結果

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級メトロアクセスネットワーク向け非線形伝送を実験により実証。

・2022年度目標：12bit/symbol級の固有値変調信号のBack-to-back伝送完了。

・2022年度実施内容：設計した4096値(=2¹²値)固有値変調信号の伝送実験を実施。また、長距離伝送に向けた伝送路設計を実施。

・結果：4096値固有値変調信号の50km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、多波長チャネル一括波長変換等の多チャネル一括光信号処理を実証。

・2022年度目標：導波路シミュレーションによるデバイス基本設計完了。

・2022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、シリコンリソ窒化シリコン導波路特性の調査を実施。また、製造誤差を含めたサイズ変化の影響を調査。

・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。±15nmのサイズ変化を許容可能なことを示した。

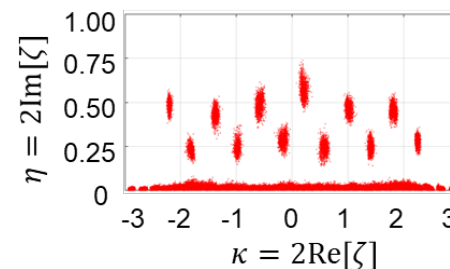


図2-c-1：50km伝送後の固有値パターン

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：100GBaud超のメトロネットワークの実現に向けた、非線形光信号処理による伝送ペナルティ、伝送S/N比改善量の評価、4モードルーティングの特性評価を行い、2028年までに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プロトタイプによる性能評価を行う。

・2022年度目標：DAC帯域より4倍広帯域なパルス発生器の設計を完了し、最適な条件の検討を行うとともに、光信号処理を併用したルートナイキストパルス発生の原理確認実験を行う。APSK変調した多値光ソリトンに対するソリトン制御の効果を数値解析による評価を実施するとともに、省電力光ネットワークを目指すマルチコアファイバのコアスイッチング技術を提案し、基礎実験を完了する。

・2022年度実施内容：DAC帯域より広帯域なパルス発生を行うパルス発生器の数値解析および実験を開始した。数値解析により振幅・位相多値光ソリトン伝送の評価を行なった。新しい原理のマルチコア光ネットワーク用のコアスイッチの提案と数値解析を行ない、実験を開始した。

・結果：光IQ変調器を用いた方式では入力光帯域幅の18倍の光ルートナイキストパルス発生の可能性を示した。コアスイッチは2コア・2モードおよび3コア1モードスイッチを数値解析した。

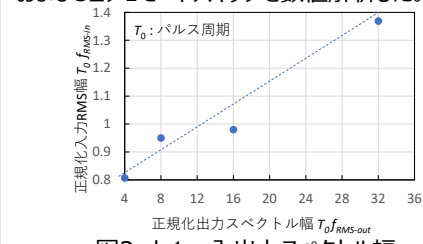


図2-d-1：入出力カスペクトル幅

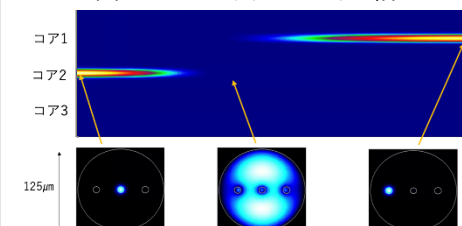


図2-d-2：3コア光スイッチの動作

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
17 (15)	18 (13)	3 (3)	94 (76)	0 (0)	14 (11)	6 (5)	7 (7)

※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(2022年8月22日、2023年3月27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(2022年6月21日、2022年8月22日、2022年11月25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
- 国際会議CLEO2022: 2022年5月19日、オンライン開催
国際会議OECC/PSC2022: 2022年7月3日～6日、富山国際会議場(富山市)
国際会議CLEO-PR/ISOM/ODF2022: 2022年7月31日～8月5日、札幌コンベンションセンター
国際会議ECOC2022: 2022年9月18日～9月22日、オンライン開催
国際会議IAC2022: 2022年9月18日～22日、オンライン開催
国際会議MOC2022: 2022年9月25日～28日、オンライン開催
国際会議OFC2023: 2023年3月5日～9日、米国サンディエゴ
光ネットワーク産業・技術研究会: 2022年5月13日、2023年1月24日、オンライン開催
第38回光通信システムシンポジウム: 2022年10月12日～13日、オンライン開催
レーザー学会講演会年次大会: 2023年1月18日～20日、オンライン開催
OPIE' 22: 2022年4月20日、パシフィコ横浜(横浜市)
電子情報通信学会PN研究会: 2022年4月25日、機械振興会館(東京都)
電子情報通信学会OCS研究会: 2022年6月10日、オンライン開催
電子情報通信学会CS研究会: 2022年7月14日～15日、屋久島環境文化村センター(屋久島町)
電子情報通信学会OFT研究会: 2022年8月25日～26日、オンライン開催
電子情報通信学会OFT研究会: 2022年10月13日～14日、かながわ県民センター
電子情報通信学会OCS/OPE研究会: 2022年10月20日～21日、松山市民会館
第66回宇宙科学技術連合講演会: 2022年11月1日～4日、熊本城ホール
電子情報通信学会PN研究会: 2022年11月7日～8日、高知歴史博物館

- 電子情報通信学会OCS/OFT研究会: 2022年11月10日～11日、フォレスト仙台
電気関係学会関西支部連合大会: 2022年11月26日～27日、オンライン開催
電子情報通信学会 光通信システムシンポジウム: 2022年12月13日～14日、オンライン開催
電子情報通信学会OCS/CS研究会: 2023年1月12日～13日、キャナルシティ博多
電子情報通信学会OFT研究会: 2023年1月19日～20日、キャンパスプラザ京都
電子情報通信学会PN研究会: 2023年1月23日～24日、オンライン開催
電子情報通信学会OPE/OCS/OFT研究会: 2023年2月16日～17日、くくる糸満
フォトニックネットワークシンポジウム2023: 2023年2月21日～22日、情報通信研究機構本部
電子情報通信学会総合大会: 2023年3月7日～10日、芝浦工業大学
電子情報通信学会PN研究会: 2023年3月1日～2日、沖縄県立博物館
- (4) 広報発表・展示会にて成果を発信
プレスリリース: 2022年7月19日、2023年3月28日(関連記事合計11件)
国際会議IPOP2022展示会: 2022年6月3日
国際会議OECC/PSC2022展示会: 2022年7月3日～6日、富山国際会議場(富山市)
OCSサマースクール2022展示会: 2022年7月22日、オンライン開催
第38回光通信システムシンポジウム: 2022年12月14日、オンライン開催
- (5) 国際会議・国内研究会にて受賞
国際会議OECC/PSC2022 Best Paper Award 1件: 2022年7月5日
コミュニケーションシステム研究会委員長賞: 2022年7月15日
令和4年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞・優秀論文発表賞: 2022年11月26日
電子情報通信学会2022年光通信システム研究専門委員会奨励賞: 2022年12月13日
電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会奨励賞: 2023年1月11日
電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究専門委員会2022年OFT研究会学生奨励賞: 2023年3月7日

5. 今後の研究開発計画

- 1-a B5G-RAN収容高効率アクセス構成技術: 22年度までに試作したB5G-RAN機能部をベースに、TDDタイミング信号の供給や遠隔制御・監視機能の拡張実装を行う。また、試作済の小型光アナログ送受信機を用いたアナログIfOfモバイルフロントホールと組み合わせ、双方向データ通信が実現可能であることを確認する実証実験を実施する。
- 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チャネル数増加した光伝送実験を行い、64QAMで10チャ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、処理回路の改良設計評価を完了する。評価結果に基づき、アンテナ素子数10以上の信号を通信における要求品質を担保した状態で高効率に収容する信号処理方式の設計手法を確立する。
- 1-c 小型光ビームフォーミングデバイス技術: 光ビームフォーミングデバイスの改良試作を、産業技術総合研究所が有する300 mmウェハ対応のパイロットラインと外部共用利用施設の装置を用いて進める。また、1次試作で作製した光ビームフォーミングデバイスを用い、それらを制御するシステムの開発に着手する。
- 2-a 仮想光チャネル技術: 2023年度は仮想光チャネル技術のアルゴリズムおよび回路の改良設計と、また改良試作した回路を組み込んだ光変復調評価用試作機を用いた光伝送実験によりアルゴリズムおよび回路の改良評価を行い、仮想光チャネル数可変4倍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: 2024年度の連携評価に向けて、2023年度には、2022年度に一次設計を行った結果からのフィードバックをもとに、仕様、アルゴリズムおよび基本回路の改良設計を行う。
- 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、広帯域光送受信器、および、高速任意波形成形器を用いて、4096値固有値変調信号の100km級伝送の実証実験を行う。②超高効率非線形光信号処理については、デバイスの試作(詳細設計および試作準備)を進める。
- 2-d 光・電気協調による高速低電力信号処理技術: ルートナイクストパルス発生器のロールオフ率可変実験およびパルス発生器を用いた信号の送受信特性に関する原理確認実験を実施する。2コアファイバのコアスイッチ、2モードファイバのモードクリーニング技術の原理確認実験を実施する。