

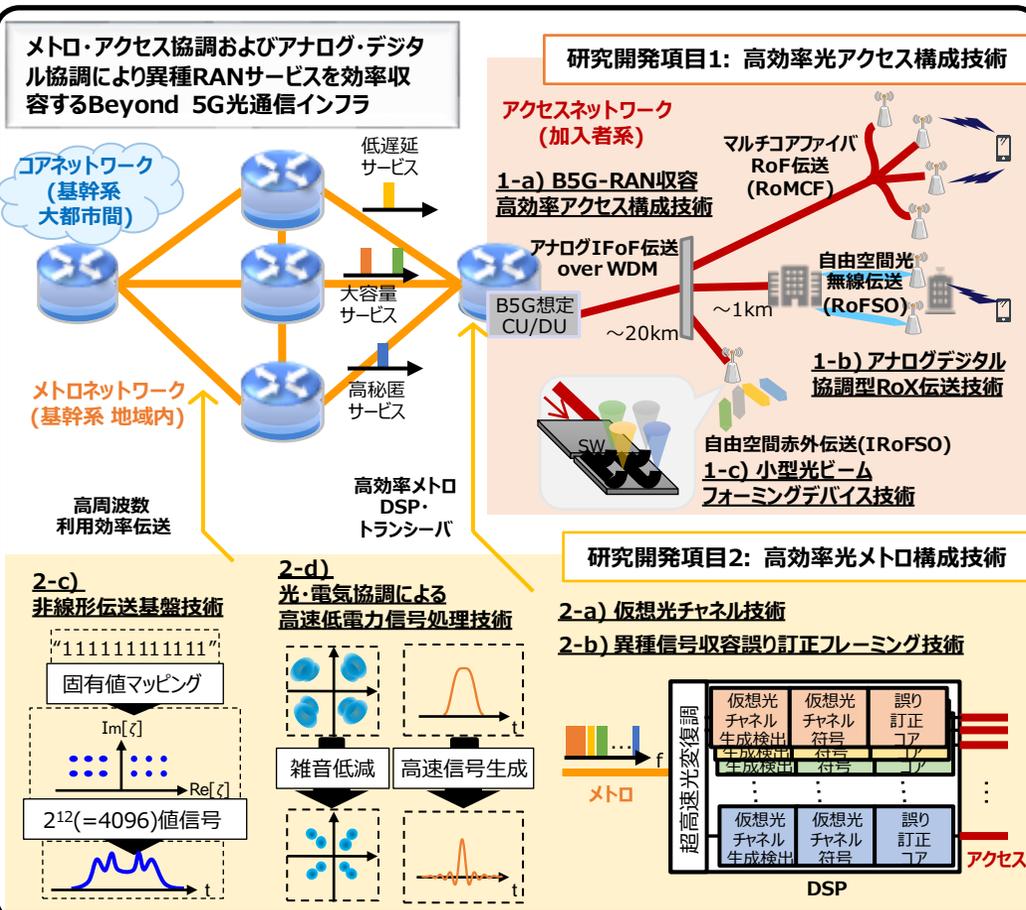
1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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)大阪府立大学
- ◆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3年度282百万円)

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



研究開発成果1-a B5G-RAN収容高効率アクセス構成技術
 IF多重信号を扱える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。RAN機能調達とIF多重信号処理部の方式検証、8拠点MFH多重伝送構成の仕様検討を完了。また波長多重、IF多重と組み合わせた無線信号576ch(1.3Tbps)のRoMCF伝送に成功。

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。>2ch/ADC・DACにて信号収容可能な基本構成についてADC/DAC・FPGA内蔵チップに実装可能である見込みを得た。ΔΣRoF方式について、sub6帯での部分実験を完了した。また、RoFSO方式について、基本構成検討および実装候補となる光学部品の基本特性評価を実施し、装置製作の見通しを得た。

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
 「シリコンフォトリソニック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の送信・受信アルゴリズムの一次選定を実施し、周波数多重部と可変サンプリングレート変換によるクロック同期方式の要素評価を完了。FPGA集積DAC/ADCの波形観測し、DAC・ADCが機能していることを確認。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。

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
 FPGAに搭載できるアーキテクチャで異種信号収容誤り訂正フレームを実現することが課題。複数の異種信号を収容するためのフレームフォーマットと制御用に検討している短符号長の誤り訂正符号構成について基礎検討を実施し、フレームフォーマット案の作成を完了した。

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
 高速信号発生では消費電力の増大が課題。数値解析により、入力電気信号比4倍高帯域な光ルートナイキストパルス発生に成功し、実験系の構築を進めた。また基本ソリトンのみを用いた振幅多値伝送を提案した。

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。

・2021年度目標：①B5G-RAN機能部：疑似CU-DU機能、および複数IF信号の多重部分の設計試作を行い、RAN機能ベース機能の試作を完了する。②モバイルフロントホール(MFH)部：小型光送受信機の基本設計を完了する。4コアMCFの調達、および片方向アナログIFoF信号伝送時の特性評価を完了する。

・2021年度実施内容：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。②MFH部：双方向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、中間ノード用伝送機材を調達した。また、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。

・結果：①B5G-RAN機能部：100MHz幅信号で4MIMO信号分の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。また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で消費電力・サイズ・重量等の試算・比較の一次検討・分析を実施した。②MFH部：双方向波長多重光アナログ光伝送MFHの小型光送受信機(収容局側・アンテナ側)の一次設計を完了した。また中間ノード用伝送機材の調達を完了した。更に、4コアMCFを用いた片方向アナログIFoF信号伝送特性評価では、400MHz幅64QAM OFDM信号を576ch(4コア×8波長×18IF多重)、計1.3Tbpsの伝送に成功した(図1-a-1)。

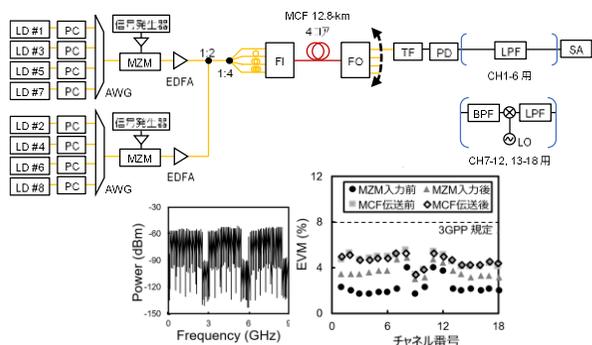


図1-a-1：4コア×8波長×18IF多重伝送実験

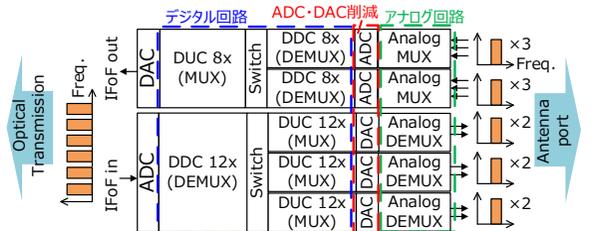
1-b アナログデジタル協調型RoX伝送技術

・最終目標：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100Gbps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への伝送において、2方式以上における各種性能劣化・制約要因を明らかにし、信号を高効率に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の根拠を示す。

・2021年度目標：ADC/DAC数を低減しつつ広帯域性と高分解能性を両立するIFoF分離・多重方式を検討し、実装用途を立てる。また、中間的なノードから隔離した場所に配置されたアンテナへの2方式以上の伝送方式について検討し、性能劣化・制約要因等を明らかにする。

・2021年度実施内容：本年度目標達成に向け、理論検討・シミュレーション、基本検討モデル構築および部分実験、回路規模評価等を実施し、基本検討を完了した。

・結果：2ch/ADC・DACにて信号収容可能な回路基本構成を検討した(図1-b-1)。各種回路のシミュレーションにより所望の分離・多重動作を確認し、試作結果から回路規模を評価した結果、ADC/DAC・FPGA内蔵チップに実装可能である見込みを得た。また、 $\Delta\Sigma$ RoF方式について伝送評価を実施し(図1-b-2)、3.6~4.1GHz帯での動作を確認した一方で、最適動作周波数からの劣化量が3.2%以下となることを明らかにした。さらに、RoFSO方式について、装置の基本構成を検討した。基本構成における主要光学部品の基本特性を評価した結果、所望の特性を確認し、次年度の装置製作の見通しを得た。



DDC/DUC: Digital Down/Up Conversion
図1-b-1：>2ch/ADC・DACの多重・分離回路基本検討結果

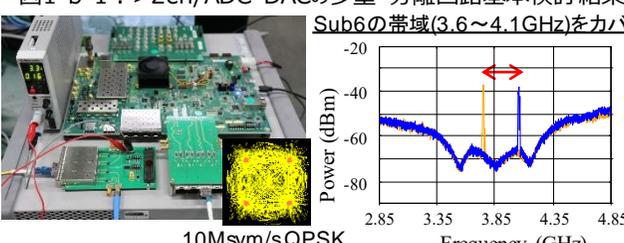


図1-b-2：伝送最適制御技術の $\Delta\Sigma$ RoF方式の評価結果

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。

・2021年度目標：シリコンフォトリソニック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。

・2021年度実施内容フェーズドレイ方式(図1-c-1(a))とスイッチ方式(図1-c-1(b))のビームフォーミング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た。

・結果：産総研半導体パイロットラインでの試作を開始したことで、今年度の目標を達成した。

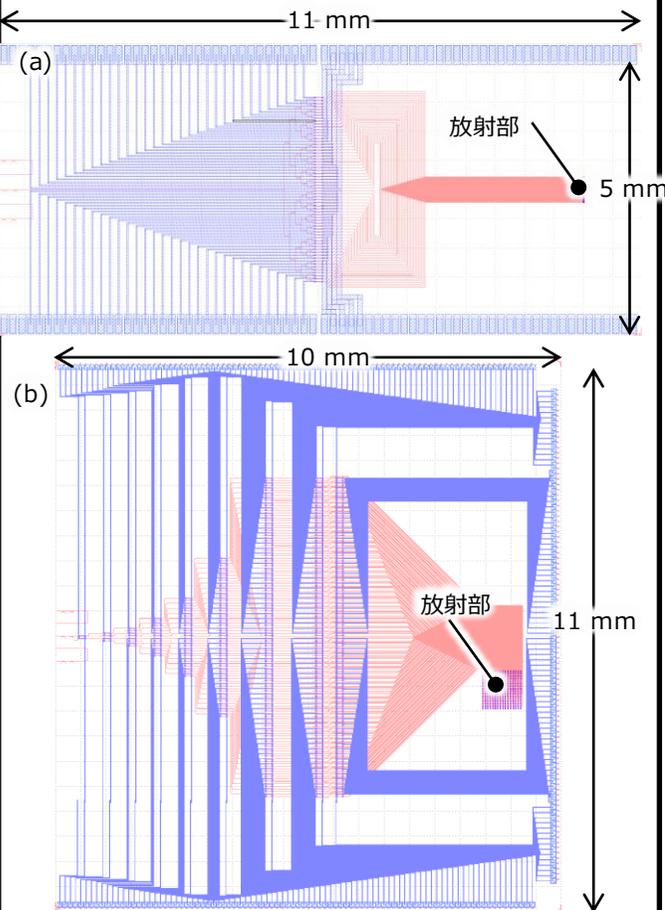


図1-c-1：ビームフォーミングデバイスの構造
(a) フェーズドレイ方式、(b) スwitch方式

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。

・2021年度目標：仮想光チャネルDSP向け候補アルゴリズム抽出、主要要素評価の完了。

・2021年度実施内容：(1)DSPの①送信・②受信アルゴリズム候補の抽出。(2)DAC/ADC集積FPGA等の機材の動作試験。

・結果：(1)アルゴリズムの一次選定を完了。複数の仮想光チャネル信号の生成・検出に特に重要な①周波数多重部と、②可変サンプリングレート変換によるクロック同期方式の要素評価を完了。送信側隣接チャネル抑圧比40dB以上(図2-a-1)と受信クロック周波数差補償性能100ppm以上を達成(図2-a-2)。(2) DAC入力波形とADC出力波形を観測し、DAC・ADCが機能していることを確認(図2-a-3)。

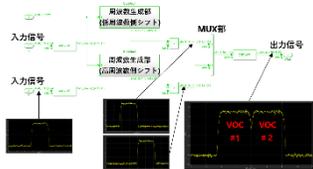


図2-a-1：仮想光チャネル生成のシミュレーション

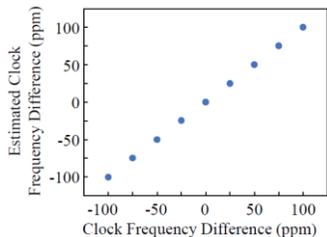


図2-a-2：Tx/Rxクロック周波数差の推定

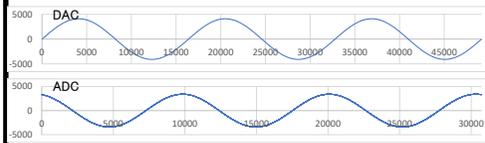


図2-a-3：FPGA集積DAC/ADCの波形観測

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。

・2021年度目標：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、LSI化を想定した要求仕様の検討を行い、その上位仕様からFPGAで実現すべき機能の抽出と仕様の抽出を行う。

・2021年度実施内容：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・復号回路の構成を行うためのフレームフォーマットの検討および実証実験に向けた設計検証環境の構築を行った。

・結果：複数の異種信号を収容するためのフレームフォーマットと制御用に検討している短符号長の誤り訂正符号構成について基礎検討を実施しフレームフォーマット案を作成した(図2-b-1)。

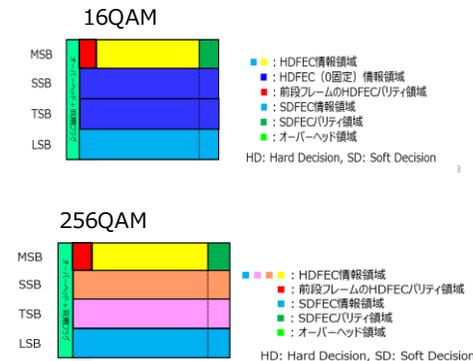


図2-b-1：考案したフレームフォーマット

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超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。

・2021年度目標：12bit/symbol超級の雇値変調信号の設計完了。

・2021年度実施内容：三角格子状の固有値配置を用いた、4096値(=2¹²値)固有値変調信号を設計。研究室既存の設備を用いて50km伝送実験を実施。

・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。

・2021年度目標：導波路シミュレーションによる構想設計完了。

・2021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、シリコンリチウム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)の調査を実施。

・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。

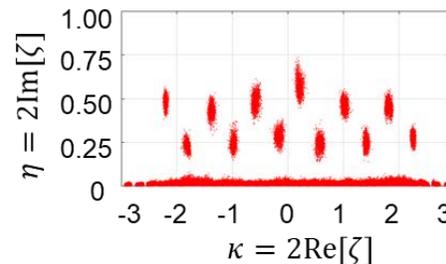


図2-c-1：50km伝送後の固有値パターン

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。

・2021年度目標：光ルートナイキストパルス発生法は2022年度以降に広帯域なパルス発生器の試作・評価実施の準備として、数値解析により変調波形・ファイバ条件について基礎検討を行う。非線形パルス伝送は数値解析により基本ソリトンのみを用いた振幅多値ソリトンの原理確認を行う。

・2021年度実施内容：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た。非線形パルス伝送では、数値解析により振幅多値ソリトンの原理確認を行い、振幅・位相変調での検討を行うためのプログラムの導入を行った。

・結果：数値解析のみではあるが電気信号比4倍広帯域な光ルートナイキスト入力パルス発生に成功し(図2-d-1(a))、実験系の構築を行った。振幅変調時に基本ソリトンを保つようにパルス幅を変化させる方式の可能性を確認した(図2-d-1(b))。

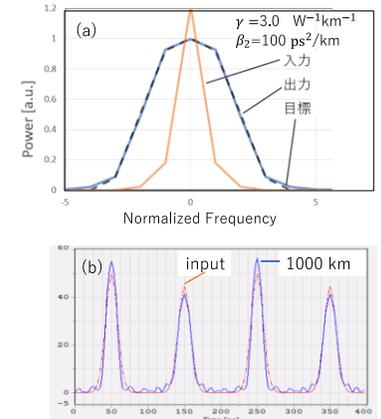


図2-d-1(a)HNLFFによるパルス帯域拡大
(b)振幅多値ソリトンの伝搬波形

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
2 (2)	5 (5)	0 (0)	18 (18)	0 (0)	1 (1)	1 (1)	0 (0)

※ 成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) スタートアップミーティングを開催(2022年1月31日(オンライン)): 評価委員・専門委員、総務省担当課、NICT関係者、受託者間で研究開発の前提条件、進め方、到達目標等の認識共有
- (2) 研究開発運営委員会を開催(2022年3月17日(オンライン)): 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
- (3) 受託者間調整会議を開催(2022年1月18日(オンライン)): 受託者間で研究開発の進捗状況を共有
- (4) 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
7件の国内外特許出願を完了(国内2件、PCT 5件)
国際会議OFC2022: 2022年3月6日～10日、米国サンディエゴ/オンラインハイブリッド開催
国際会議ICSOS2022: 2022年3月28日～31日、オンライン開催
光ネットワーク産業・技術研究会: 2021年11月16日、オンライン開催
第35回光通信システムシンポジウム: 2021年12月14日～15日、オンライン開催
レーザー学会講演会年次大会: 2022年1月12日～14日、オンライン開催
電子情報通信学会CS/OCS研究会: 2022年1月13日～14日、KDDI 維新ホール(山口市)/オンラインハイブリッド開催
電子情報通信学会OFT研究会: 2022年1月20日～21日、オンライン開催
電子情報通信学会OCS/OFT/OPE研究会: 2022年2月24日～25日、オンライン開催
電子情報通信学会関西支部学生会研究発表講演会: 2022年3月10日、オンライン開催
電子情報通信学会総合大会: 2022年3月15日～18日、オンライン開催

- (5) 展示会にて成果を発信
第35回光通信システムシンポジウム展示会: 2021年12月14日～15日、オンライン開催

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: B5G-RAN機能部、モバイルフロントホール(MFH)部とも2022年度中に一次試作を行い基本動作の確立、二次試作に向けた課題抽出を行う。2024年度にかけて改良試作を行い、両者を組合せたMFH構成で無線信号を含むEtoEでの双方向100Gbps超データ通信能力を実証する。
- 1-b アナログデジタル協調型RoX伝送技術: 次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、および離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。
- 1-c 小型光ビームフォーミングデバイス技術: 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。
- 2-a 仮想光チャネル技術: 仮想光チャネル対応符号、仮想光チャネル生成、及び仮想光チャネル検出の基本回路の試作を行うとともに、試作回路にて光伝送実験及び仮想光チャネル技術におけるアルゴリズム・回路の評価を行う。
- 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基づいて、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Back-to-back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、計算機シミュレーションにより多波長一括波長変換のシステム実証を行う。
- 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、実験検討を開始するとともに、数値解析による高次効果の影響などの検討を進める。非線形パルス伝搬では、雑音低減法とそれによりエラーレートの変化に関して数値解析を行っていく。