

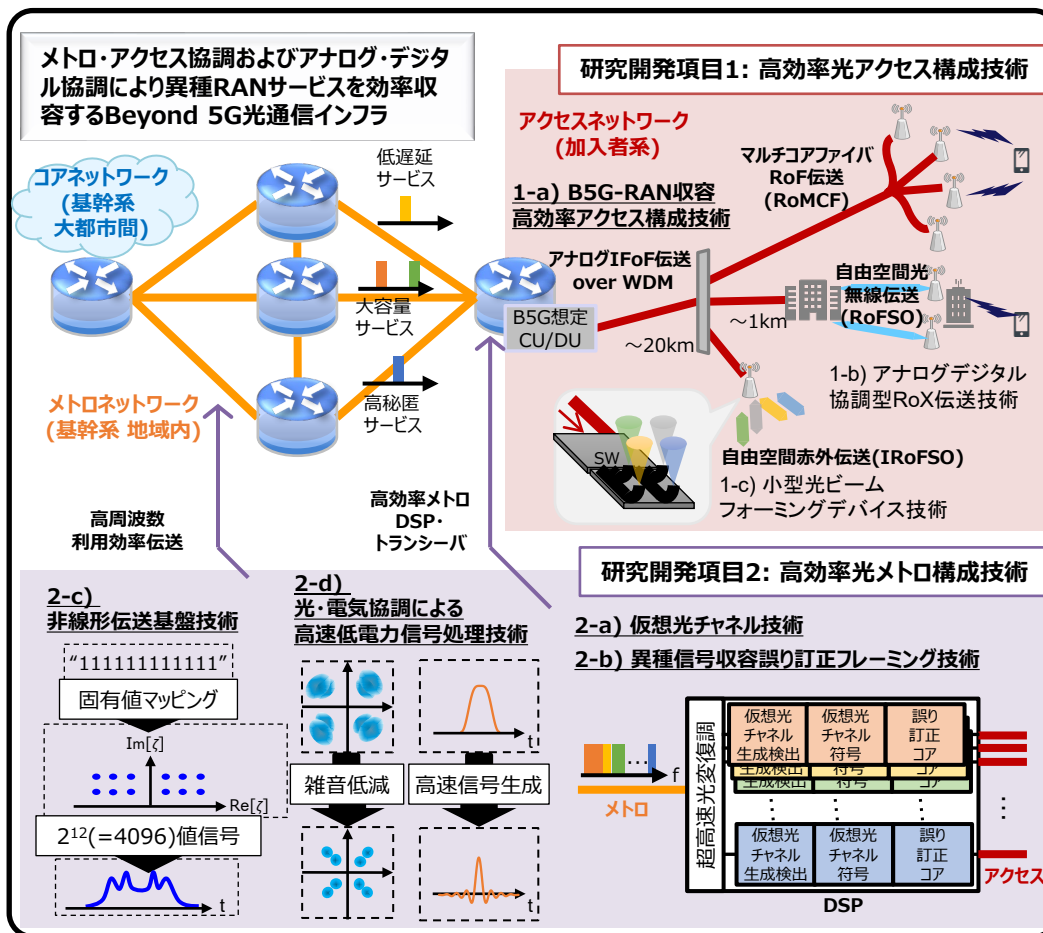
1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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 三菱電機株式会社、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
- ◆研究開発期間 令和6年度(1年間)
- ◆研究開発予算(契約額) 令和6年度84百万円

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、波長多重伝送に基づき8拠点分の無線信号を収容可能な光アナログ送受信機、最大8chの無線信号と遠隔装置の制御・同期信号を周波数多重可能なIF多重分離装置を試作。両装置により100G超無線信号を収容可能なアナログIFoFベースの多拠点収容高効率RAN構成技術を確立。

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。アナログデジタル協調型回路を用いたIFoF伝送により、最大10チャネル収容(ダウンリンク:最大256QAM、双方向:64QAM)に成功。 $\Delta\Sigma$ -RoFによるOFDM信号伝送評価を実施し、QPSKおよび64QAMに対する要求値を満足することを確認した。10cm角の小型光ターミナルを試作し、16波長多重収容と5G信号疎通を実現するRoFSO伝送を実証した。PAST-IFoFによる 6×64 MIMO信号の1芯ファイバ伝送に成功。

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

1次試作の小型光ビームフォーミングデバイスにて、1ユーザーあたり100 Gb/sの伝送容量を実証した。また、改良試作(第2次試作)を完了した。第2次試作デバイスについても実装完了し、 4.8° で二次元のビーム振り動作の実証に成功した。空間光信号伝送試験では1.5 mおよび10 mの距離で15.36 Tb/sの空間光信号伝送を達成した。

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。本研究開発では、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設計を実施し、FPGA実装のデジタル回路による2GBd偏波多重QPSK条件での光変復調試験から低速での原理検証に成功。他項目の信号データを同FPGAに組み込んだ連携評価を完了。

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誤り訂正回路をFPGAに搭載し仮想光チャネル部と連携評価を行ない、回路の動作確認を行うことが課題。本研究開発では、仮想光チャネル部において生成されるPCS符号化信号を疑似的に作成したうえで誤り訂正回路を動作させて各変調方式の性能評価を実施し、性能上問題がないことを確認し、異種信号を同時収容する回路をFPGAに実装することに成功。

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($=2^{12}$)値固有値変調信号を設計した。ニューラルネットワーク復調器および軟判定前方誤り訂正符号を用いることにより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、数値解析によりナキストパルス応用分野で相関受信器を用いた光FIRフィルタによる符号間干渉ペナルティ低減、ソリトン伝送分野で8APSKソリトンの位相ばらつき低減に成功。

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	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
8 (8)	25 (25)	4 (4)	56 (56)	1 (1)	0 (0)	2 (2)	7 (7)

※成果数は累計件数、（ ）内は当該年度の件数です。関連課題(01401)における令和6年度成果を含みます。

- (1) 研究開発運営委員会を対面にて開催(2024年12月3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し、KDDI総合研究所・三菱電機との接続実験を見学

(2) 受託者間調整会議をオンライン開催(2024年7月8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:2024年4月30日、古河電気工業株式会社 本社
2024年LQE5月研究会 LQE30周年記念研究会:2024年5月29日、沖縄県青年会館
電子情報通信学会OCS研究会:2024年6月6日、長崎商工会議所
電子情報通信学会PN研究会:2024年6月6日、長崎商工会議所
国際会議OECC2024:2024年7月2日、豪州メルボルン
電子情報通信学会MWPTHz/IEICE研究会:2024年7月11日、小樽市民会館
電子情報通信学会CS研究会:2024年7月12日、対馬市交流センター
国際会議CLEO-PR2024:2024年8月6日、韓国インチョン
電子情報通信学会PN研究会:2024年8月27日、函館湯の川観光ホテル祥苑
レーザ・量子エレクトロニクス研究会:2024年8月29日、弘前大学
国際会議ECOC2024:2024年9月24日、独逸フランクフルト
- 電子情報通信学会OCS研究会:2024年11月7日、高知城歴史博物館
電子情報通信学会OFT研究会:2024年12月22日、大阪iSiteなんば
国際会議SPIE PW:2025年1月28日、米国サンフランシスコ
IEEE論文Journal on Selected Areas in Communications(2025年2月)
IEEE論文Photonics Journal(2025年2月)
電子情報通信学会PN研究会:2025年3月4日、宮古島平良港ターミナルビル
IEICE論文Transactions on Communications(2025年3月)

(4) 広報発表・展示会にて成果を発信
OCSサマースクール2024展示会:2024年7月18日、オンライン開催
OCSシンポジウム2024展示会:2024年12月19,20日、中日ホール&カンファレンス現地開催

(5) 国際会議・国内研究会にて受賞
レーザー学会学術講演会第44回年次大会 優秀論文発表賞:2024年5月31日
第35回電波功績賞 電波産業会会長表彰:2024年6月25日
コミュニケーションシステム研究会委員長賞:2024年7月12日
IEEE Photonics Society Kansai Chapter, Best Student Presentation Award:2024年11月2日
2024年 光通信システム研究会 論文賞:2024年12月19日
学生ポスター賞(電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究専門委員会):2025年1月24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:**標準化に向けてO-RAN Allianceで活動を推進中。nGRG RS01にてミリ波分散アンテナのユースケースを分析し、IfOF/RoF技術の適用可能性を示したResearch Reportを発行済み。更なる議論の発展に向け、nGRG RS02にて分散アンテナアーキテクチャの定義・要件等を整理中。KDDIが主導するIOWN GF IMN-TFでは、IfOF/RoF技術の適用方法を示す文章の作成に着手。B5G基地局展開に向けた要件や動向などを見据えつつ、標準化に向けた検討を進める予定。
- 1-b)アナログデジタル協調型RoX伝送技術:**本プロジェクトの最終年度に得られた項目1-aとの接続実験結果などを継続的かつ積極的に学会発表を行い、開発技術の有用性を社会へアピールする。また、開発技術の深化を進め、実際のBeyond-5G向け基地局ニーズに応じた実装技術も継続的に検討を進める。
- 1-c)小型光ビームフォーミングデバイス技術:**具体的なアプリケーション(例えばデータセンターラック間/ラック内の光無線化による超低遅延インターコネクトなど)を見極め、損失、波長帯域、クロストーク、ビーム偏向角などの特性を改善しながら、新たな研究開発へ展開していく。
- 2-a)仮想光チャネル技術:**本研究開発における仮想光チャネル数の4倍可変とするデジタル回路の設計検証(=回路構成を考慮した機能シミュレーション)、実機検証および2-bと連携した評価の結果に基づいて、回路の並列処理の拡張化による将来のLSI化における10倍可変に向けた実装検討および誤り訂正フレーミング機能を含めた包括的なデジタル回路の設計検討を進める。
- 2-b)異種信号収容誤り訂正フレーミング技術:**将来的には開発した回路を並列化させて拡張させたいうえで、LSI化を行うことにより、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を実現する回路の実装を行なう。(三菱電機)
- 2-c)非線形伝送基盤技術:**本研究で得られた成果を基に、B5Gおよびさらにその先の情報通信システム基盤を支えるために、大学ならではの先進的な基盤技術であるさらなる超多値化・大容量化や光信号処理によるさらなる高効率化技術の確立を目指す。また、実装やプロトタイプ製作に向けた課題への対策検討を進める。
- 2-d)光・電気協調による高速低電力信号処理技術:**光FIR技術の実験検証や、PSAが汎用部品として使用できる時代を想定し、電子回路の一部を光技術に置き換える光電気協調技術を通して低消費電力な光伝送方式の高速化と発展を目指す。

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。

・実施内容：

- ①MFH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を試作。また、4コアおよび12コアのMCFを用いたアナログIFoF信号伝送特性評価を実施。
- ②B5G-RAN機能部：8ch分の400MHz幅無線信号をIF帯でリアルタイムに多重分離可能なIF多重分離装置、およびアンテナサイト側でIF信号をミリ波に変換して送受信するBFボックスを試作。更に、遠隔装置用にIF信号と同時に制御信号・同期信号を多重伝送できるようにする異種サービス共存機能拡張を実施。
- ③連携試験：研究開発項目1-a・1-bの成果物を連携させたEnd-to-End双方向データ通信試験を実施。さらに、B5G/6G向けの無線アーキテクチャであるユーザセントリックRAN（UC-RAN）の研究開発を行う課題004と連携した屋外試験を実施。

・結果：

①MFH部：400MHz幅64QAM無線信号×12 chを8WDMしたアナログIFoF伝送により、計219Gbpsの無線信号をEVM8%未満で異なる8拠間に双方向伝送できることを実証。更にMCF伝送と組合せ、4コア合計で576ch（計1.3Tbps）、12コア合計で4608ch（10.5Tbps）まで伝送容量を拡大できることを実証。

②B5G-RAN機能部：分散配置した複数アンテナサイトを試作した光アナログ送受信機・IF多重分離装置を用いて収容し、5G商用端末との間でリアルタイムの双方向データ通信が可能なことを実証。またEthernet信号と同期クロックを無線信号と同時に伝送し、遠隔のBFボックスのビーム方向を遠隔制御できること、転送された同期クロックでミリ波への周波数変換が可能であることを実証。

③連携実験：1-bの成果物であるRoFSOと①②との連携により、ファイバ敷設に地理的制約がある箇所に対してもEnd-to-Endの双方向データ通信が行えることを実証。課題004との連携により、高い同期精度が求められるUC-RAN向け分散アンテナの収容回線として本アナログIFoF方式が適用可能であることを実証。

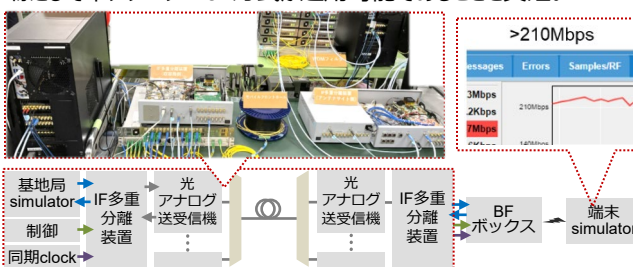


図1-a-1：MFH部とB5G-RAN機能部を組み合わせたRAN構成

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。

・実施内容：双方向高分解多重・分離技術関では、高効率なアンテナ収容と省電力化が可能なアナログデジタル協調型多重・分離回路を試作した。本回路を用いて最大10チャネル・256QAMのIFoF信号伝送試験を実施した。伝送最適制御技術では、無線信号の高効率収容を実現する特殊なRoF方式である $\Delta\Sigma$ -RoF方式、RoFSO方式、PAST-IFoF方式について基本検討、実装検討、設計を経て、各方式の実証実験を実施した。

・結果：アナログデジタル協調型多重・分離回路について、ダウンリンク伝送試験では、最大10チャネル・256QAM信号多重IFoF伝送を実証し、10チャネル・64QAM多重条件でより良好なデータレートとなる双方向伝送を実現した。また、8波長多重時のデータレート試算の結果、100Gb/s以上への拡張性を示した。 $\Delta\Sigma$ -RoFによるOFDM信号伝送評価を実施し、QPSKおよび64QAMに対する要求値である8%以下を満足することを確認した。10cm角の小型光ターミナルを試作し、16波長多重収容と5G信号疎通を実現するRoFSO方式による伝送を実証した。また、C帯波長全域で最大47チャネルの波長多重RoFSO伝送が可能な見込みを得た。PAST-IFoF方式について、6×64 MIMO信号の伝送に成功し、シミュレーションにより256素子への拡張性の根拠を示した。

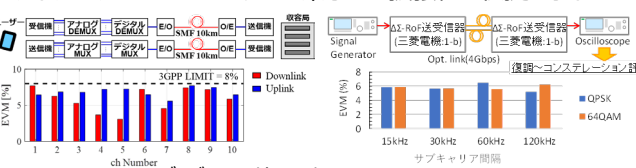


図1-b-1：アナログ・デジタル協調型 DEMUX・MUX実証実験

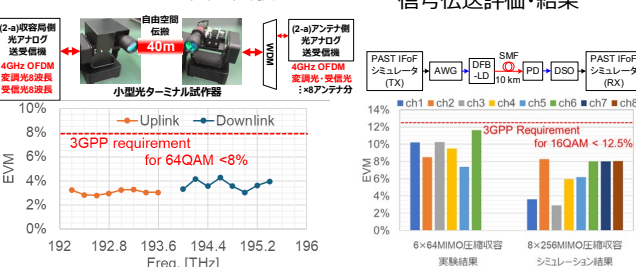


図1-b-2： $\Delta\Sigma$ -RoF方式のOFDM 信号伝送評価・結果

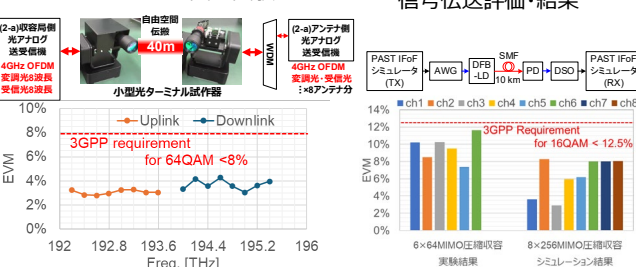


図1-b-3：RoFSO方式の16波長収容実験系・実験結果

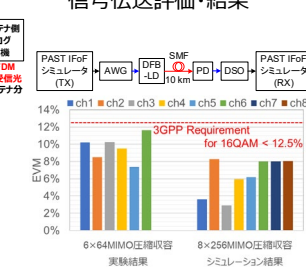


図1-b-4：PAST-IFoF方式の実証・シミュレーション構成・結果

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 Gbit/s以上を達成する。

・実施内容：1次試作デバイスを用いた空間光信号伝送試験を実施した。また、二次試作デバイスについてその試作を進め、完了した。完了後の試作チップの電気および光実装を完了した。この2次試作デバイスについて、昨年度完成させた制御システムを用いてビームの出射角度を制御し、それを評価した。さらには、3月末に向けて、この2次試作デバイスにて、1次試作デバイスよりも遠距離で大容量の光信号伝送試験を行う予定。

・結果：1次試作デバイスを用いた空間光信号伝送試験では、距離10 cmで25 Gb/s × 4波長で100 Gb/sの空間光信号伝送に成功した。また、二次試作デバイスについてはその試作を完了させ、完成したウェハから切り出したチップの実装を完了した (図1-c-1)。制御システムと組み合わせ、98% (251/255ポート) のポートから光が出ることを確認した。また、ビーム出射角評価では、水平垂直それぞれの方向に、0.32°の最小角度で4.8°程度の2次元のビーム振り動作に成功した。さらには1.5 mおよび10 mの距離で15.36 Tb/sの空間光信号伝送も実証した。

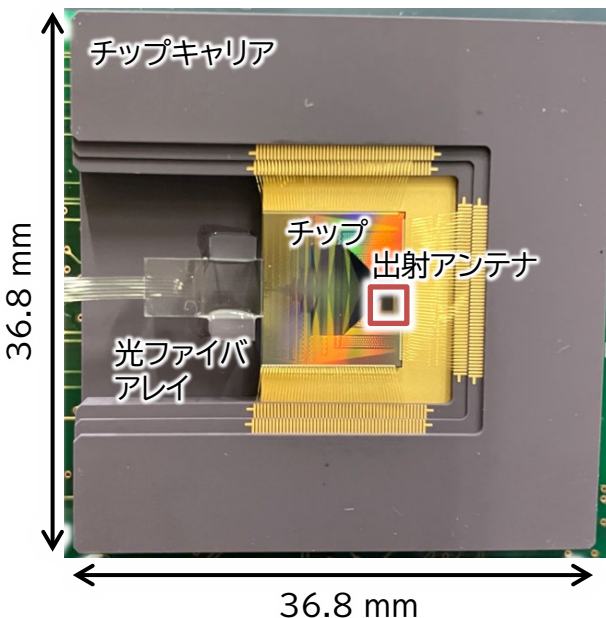


図1-c-1：実装後の2次試作デバイス

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DSPI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。

・実施内容：(1)送信・受信デジタル回路の改良設計に基づいたFPGAおよび光変復調器等の機材による低速での原理検証試験。(2)仮想光チャネル生成・検出部に項目1aおよび2bの信号データを組み込んだ連携評価。

・結果：(1)送信・受信デジタル回路を実装したDAC/ADC集積FPGAと光変復調評価用試作器を接続し、2サブキャリア多重条件DP-QPSK信号の光変復調動作を確認(図2-a-1)。また、半シンボレートによる4サブキャリア多重条件での光信号生成の原理確認を実施。(2)研究開発項目1a/2b-2a間の連携オフライン試験を実施し、外部入力の連携用信号データを仮想光チャネル生成検出部のRAM機能部に組み込み、同データの送受信を確認し、接続可能性を実証(図2-a-2)。

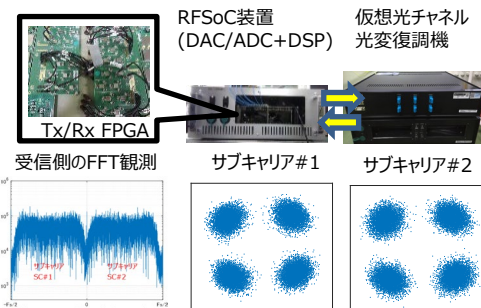


図2-a-1：仮想光チャネル生成・検出部の光接続実機試験(2GBd偏波多重QPSK)

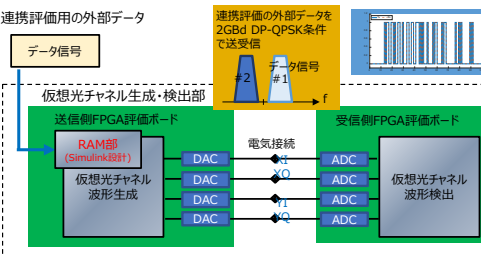


図2-a-2：連携試験

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レ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。

・実施内容：異種RANサービス4チャネル、5Gb/s級の伝送速度を実現する回路を構成し、単体評価用の実装基板を作成(図2-b-1)し、誤り訂正符号単体の性能評価を実施した。また、課題2-aとの機能連携評価として、仮想光チャネル技術によるPCS符号化を施した信号伝送に対する本技術の性能評価を実施した(図2-b-2)。

・結果：各変調方式の性能評価結果から、誤り訂正符号の性能はPCS符号化を行わない場合と比較して向上しており、性能上問題のないことを確認し、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できた。



RXスループット：5.83Gbit/s (QPSK)

図2-b-1：単体評価用基板構成

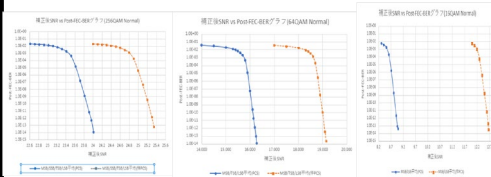


図2-b-2：PCS符号化による連携評価結果

2-c 非線形伝送基盤技術

・最終目標：①超多値光変復調技術では、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。②超高効率光信号処理技術では、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。

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。

・実施内容：①三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した。また、設計した多値固有値変調信号の周回伝送実験を実施した。②ポイント・マッチングを用いた導波路シミュレーションを行い、他波長一括波長変換システム向け光回路設計を行った。設計結果に基づきデバイス試作・評価を行った。

・結果：①分散パラメータがゼロに近いNZ-DSF、ニューラルネットワーク復調器、および、軟判定前方誤り訂正符号を用いることにより、超多値固有値変調信号の伝送距離の延伸化に成功した。最終的に1200km伝送が可能なることを実証した(図2-c-1)。②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。試作したデバイスでは変換効率が低下するため、高効率のシステム構築には分散や損失を考慮したプロセス改良・フィードバック設計が必要。これらの成果をOFC、ECOC等の国際会議で発表した。

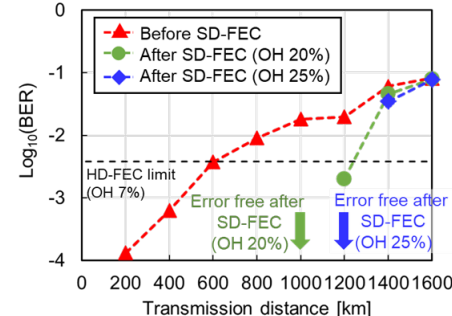


図2-c-1：超多値固有値変調信号の伝送後のBER特性

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：光ルートナイクストパルス(ORNP)発生法においては原理検証のための送受信性能の評価実験を目指す。また、伝送路の非線形光学効果に起因する信号間干渉ペナルティ低減法の検討を行う。ステージゲート時点での数値解析により当初進めていた方法によるソリトン伝送の特性改善が1割程度であることが明らかになったため、ソリトン制御等を併用することにより特性改善を検討し、2024年度末までに当初進めていた方法比2倍の伝送距離を目指す。

・実施内容：(1)位相変調、IQ変調の導入によるORNP発生効率化、(2)信号間干渉ペナルティ低減のための光FIRフィルタの提案と数値解析による非線形ペナルティ低減効果の確認、(3)数値解析によりAPSKソリトン伝送の送信パワー設定、ソリトン制御、PSAの使用などによるソリトンの位相揺らぎ低減によるQPSKソリトン伝送の確認。(4)ソリトン伝送の代替技術としてモード多重通信のモードクリーナーと中空FMFについて検討した。

・結果：(1)ロールオフ率可変のORNP発生に必要なIQ変調器の帯域幅は強度変調器の帯域の1.3倍程度であった。(2)光FIRフィルタの効果はEVMを指標として検討し、図2-d-1のように送信光パワーが大きい場合にEVMが28%から20%に改善した。(3)APSK変調ソリトン伝送の数値解析でソリトン制御とPSA併用により位相ばらつきを1/10に低減できた。(4)中空コアFMFの基礎検討で波長1.3 μm帯でのLP11モードの閉じ込め損失が3 dB/km以下の構造を見出した。

図2-d-1：光FIRフィルタによるEVMの改善