

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

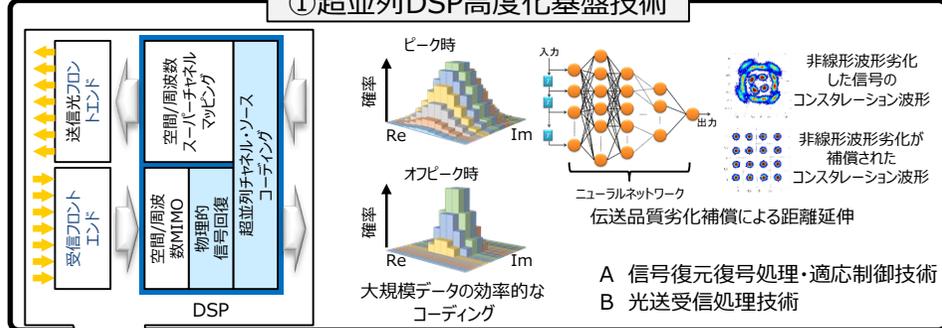
- ◆研究開発課題名：超並列型光ネットワーク基盤技術の研究開発
- ◆副題：大規模データを省電力・オープン・伸縮自在に収容する超並列処理光技術
- ◆実施機関：三菱電機(株)、(国研)産業技術総合研究所、(株)KDDI総合研究所、(国)香川大学、(学)慶應義塾
- ◆研究開発期間：平成30年度～令和3年度(4年間)
- ◆研究開発予算：総額280百万円(令和元年度70百万円)

2. 研究開発の目標

2030年頃の空間多重システムに資する、光運用波長当たり現行比10倍の大容量性を実現する超並列DSP高度化基盤技術と、並列度現行比従来比1000倍、伸縮度現行比100倍の超並列性・伸縮自在性・オープン性を実現する超並列光ネットワーク基盤技術をそれぞれ確立する。

3. 研究開発の成果

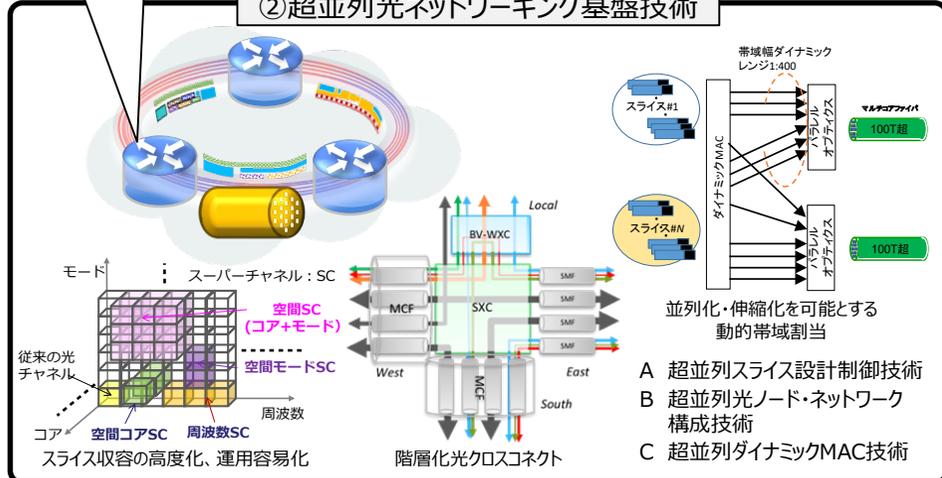
①超並列DSP高度化基盤技術



研究開発成果A 信号復元復号処理・適応制御技術
超並列光信号を収容するDSPの低電力化が課題。
・本研究開発では、確率的信号点配置シェイピングとマルチレベル符号化により、符号処理機能の電力効率9倍改善に成功。

研究開発成果B 光送受信処理技術
非線形波形劣化補償に有効なアルゴリズムを見出すことが課題。
・本研究開発では、全結合ニューラルネットワークの設計を最適化し、12スパン伝送後の9チャネル波長多重DP-64QAM信号に対して、Post-FEC BERより換算したQ値で1.2dBの改善を達成した。

②超並列光ネットワーク基盤技術



研究開発成果A 超並列スライス設計制御技術
品質を考慮した空間軸のスライス収容効率向上とオープンIFのSDM対応が課題。
・本研究開発では、信号並列度モードグループ数6倍のスライス制御実験に成功。また、3軸合計現行比340倍相当のオープンインターフェイスを用いたスライス制御実験にも成功。

研究開発成果B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術
階層化光クロスコネクタ(HOXC)のモジュール性向上が課題。
・本研究開発では、HOXCの空間バイパス/周波数グルーミング機能が転送品質劣化なしに実現可能であることを実証した。

研究開発成果C 超並列ダイナミックMAC技術
100多重級の光空間多重と10Tbps級のスーパーチャネルを使いこなすMACが課題。
・本研究開発では、多段ラウンドロビンを実装したエミュレータにより、ダイナミックMACの基本動作確認に成功。32レーン単位のダイナミック帯域容量割当の実現性を確認。

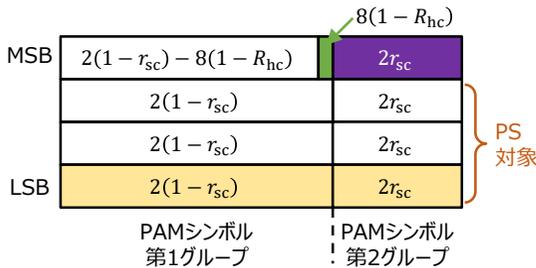
①A 信号復元復号処理・適応制御技術

・最終目標：先進の情報理論を活用した信号の復元復号処理技術と、各機能を連携させることで適応的に性能・電力を最適化する技術を探求する。2030年頃の社会実装を想定した半導体プロセス・論理回路技術の進化(4.2倍見込み)を前提とし、現行1Tbpsの伝送容量を10倍の10Tbpsに増加させるとともに、25倍の電力効率化を可能とする基盤技術を確認する。方式・アルゴリズムのみで電力効率6倍改善を達成する。

・2019年度目標：信号復元復号処理・適応制御アルゴリズム、信号フォーマット、処理インタフェースをFixする。検討したアルゴリズムの性能と電力の見積と改良を繰り返し、方式・アルゴリズムのみで電力効率6倍改善を目指す。

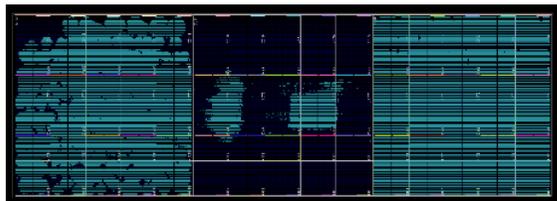
・2019年度実施内容：前年度に行った確率的信号点配置シェイピング(PS)と情報圧縮の組合せ(圧縮PS)や各要素のアルゴリズム原案を基に、改良と具体化を進めた。特に、(1)電力消費の主要因である軟判定誤り訂正(SD-FEC)の保護領域を縮小するマルチレベル符号化(MLC)の採用を検討した。また、(2)前年度検討した圧縮PSについて回路実装性評価を進めた。

・結果：(1)MLCとPSを組み合わせた信号フォーマットおよび機能インタフェースを明確化した。適応的な復号繰返し制御との組合せをシミュレーションし、MLC PS-256-QAMにより、同一の情報レート(5.6bit/channel use)で全体を単一の誤り訂正符号で保護する(BICM)均一分布の128QAMに対して電力効率が最大9倍改善することを確認した。(2)圧縮PS基本要素について、1石のFPGAで160Gb/sのスループットを達成し、回路実装性が良好であることを確認した。

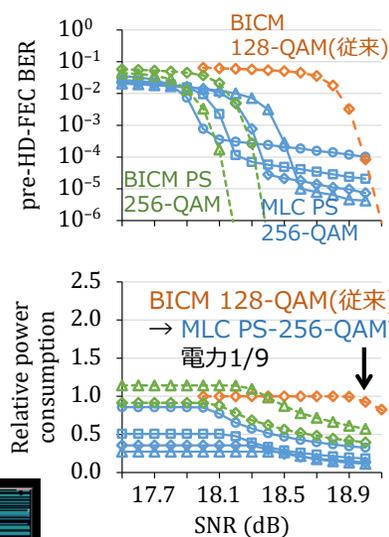


SD-FEC情報ビット
 SD-FEC冗長ビット
 HD-FEC冗長ビット
 r_{sc} : SD-FEC冗長度, R_{hc} : HD-FEC符号化率

図①A-1：MLC PS信号フォーマット



図①A-3：圧縮PSのFPGA使用領域



図①A-2：シミュレーション結果
(上：性能、下：電力)

①B 光送受信処理技術

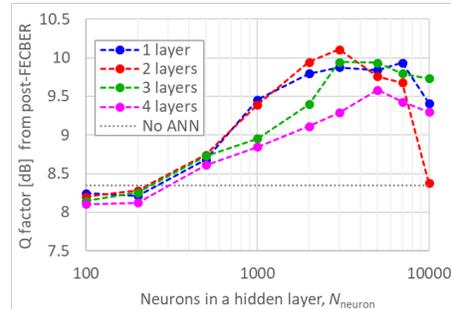
・最終目標：ニューラルネットワークを用いて、信号の非線形波形劣化を補償する送受信信号処理方法の開発を行う。波長多重された、周波数利用効率が10bit/s/Hz以上である高次QAM信号について、伝送後に発生する非線形波形劣化の補償を行い、非線形波形劣化補償を行わない場合と比較して60%以上伝送距離を延伸する。

・2019年度目標：伝送実験系と、オフラインのデジタル信号処理によってニューラルネットワークを動作させるシステムの構築を実施する。非線形波形劣化を補償するアルゴリズムの大枠を決定し、非線形波形劣化を補償しない場合と比較して伝送可能距離を60%以上延伸するという項目1-2の最終目標達成への見通しを得る。

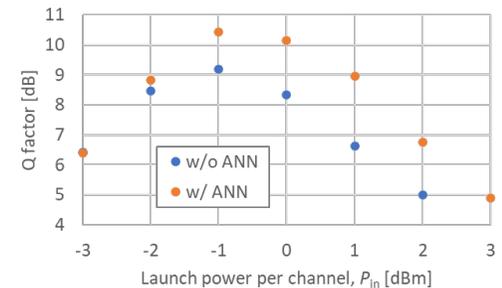
・2019年度実施内容：伝送実験系と、オフラインのデジタル信号処理によってニューラルネットワークを動作させるシステムの構築を実施した。数値計算より得られた伝送前後の波形データをもとに、非線形波形劣化を補償するアルゴリズムと補償性能に関する検討を実施した。

・結果：周回伝送実験系を構築し、単一チャネル32Gbaud DP-QPSKの場合で4,000km程度まで伝送可能であることを確認した。またランダムビットパターンより変調される信号を生成し、受信した波形を用いて機械学習を実施できる系を構築した。

数値計算より得られた波形をもとに全結合ニューラルネットワークの設計を実施した。前年度の活動で判明した汎化性能の問題をクリアし、ランダムビットパターンより変調された信号に対して一定の補償性能が得られることを明らかにした。またニューラルネットワークの設計と等化性能の関係について検討し、特にWDM信号に対しては2層構成が最適であり、それより多い層数の構成では等化性能が劣化するという知見を得た。設計を最適化したニューラルネットワークを用いて、12スパン伝送後の9ch DP-64QAM信号の波形等化性能を検証し、FECデコード前後のBERから換算したQ値の改善量がそれぞれ約0.3および1.2dBの改善を達成した。この改善量は2スパン(20%)程度の伝送距離延伸であるが、最終目標達成に向けて、全結合ではない別の構造を持つニューラルネットワークを使用し、波形の特徴をより効果的に抽出して等化性能を改善していく。



図①B-1：12スパン伝送後の9ch DP-64QAM信号に対して、層数とニューロン数を変えたニューラルネットワークによる波形等化後のQ値(Post-FEC BERより換算)計算結果



図①B-2：入射パワーを変えて12スパン伝送した後の9ch DP-64QAM信号に対して、設計を最適化したニューラルネットワークによる波形等化前後のQ値(Post-FEC BERより換算)計算結果

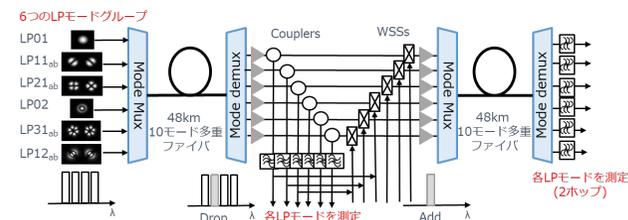
②A 超並列スライス設計制御技術

・最終目標：現行比1000倍相当の信号並列度を確保する。また、課題内連携により、並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の基盤検証を実施する。

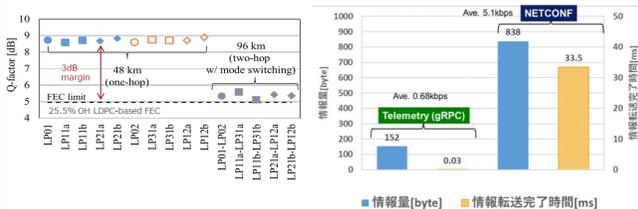
・2019年度目標：現行比1000倍(モードグループ数6倍)に向けてモードグループ数現行比3倍以上の基本検証を実施する。また、現行比340倍相当の検証環境の中で、スライス間の主な品質劣化要因のモニタリング手法、オープンIF(NETCONF/YANG等)を用いたスライス制御を検討する。

・2019年度実施内容：(1)モードグループ数3倍以上の環境において、波長・モードグループ毎にスライス制御(Add/Drop)するネットワークの実験的検証を行う。(2)現行比340倍相当の信号並列度を想定した環境において、スライス間の主な品質劣化要因のモニタリング手法、オープンインタフェース(NETCONF/YANG等)を用いたスライス制御を検討する。

・結果：(1)10モード多重ネットワーク検証用テストベットの光デバイス(Mode mux/demux等)のモード間クロストークを低減させることにより、6つのモードグループ(現行比6倍)のスライス制御(光学的にAdd/Drop)検証実験に成功した。(2)オープンIF(NETCONF・RESTCONF/YANG)を用いた信号並列度現行比340倍(モードグループ数2倍、波長数9倍、コア数19倍)相当の空間スーパーチャネルのスライス制御実験に成功した。また、複数のオープンインタフェースを用いたスライス監視の比較実験を行い、gRPCベースのTelemetryがリアルタイム性において優位であることなどを確認した。



図②A-1：モードグループ数6倍のAdd/Drop実験系



図②A-2：モードグループ数6倍における伝送特性

図②A-3：Telemetry/gRPCとNETCONFのスライス監視比較

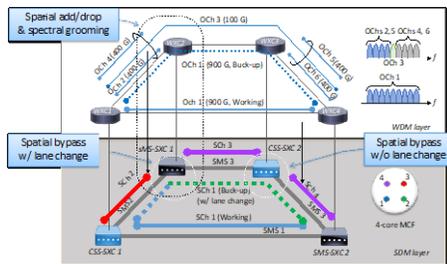
②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

・最終目標：空間軸/周波数軸を駆使した伸縮度現行比100倍の転送帯域を可能とする超並列光ノード・ネットワーク構成技術を確認する。

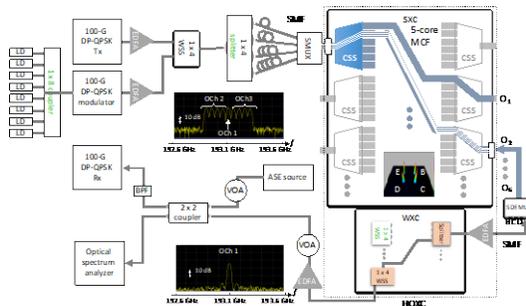
・2019年度目標：階層型ノード(HOXC)の実現性を確認し、非線形雑音を考慮した転送特性を明らかにする。空間チャネルロスコネクタ(SXC)におけるサブスイッチ使用制約、空間レーン変換範囲制約等を加味した経路計・資源割当(RCA)アルゴリズムを実装・検証する。

・2019年度実施内容：HOXCにおける空間バイパスと空間ドロップ/周波数グルーミング/空間アッド機能の原理動作確認のためのテストベッドを構築し検証実験を実施した。HOXCの構成要素であるコア選択スイッチ(CSS)を空間光学系を用いて試作検証した。HOXC転送特性を数値解析し理論解析結果と比較した。故障救済方式を含むRCAアルゴリズムを実装し性能評価を実施した。

・結果：HOXCの空間バイパス/周波数グルーミング機能が転送品質劣化なしに実現可能であることを実証しECOCで発表した(図②B-1)。CSS試作機についてOECCならびにOFCCにて発表した。ガウス雑音(GNモデル)解析と数値シミュレーション結果がよく一致し得られた知見の妥当性を確認した。RCAアルゴリズムの有効性を確認した。



図②B-1：市販スイッチベースSCNテストベッド



図②B-2：空間光学系CSSのBER特性実験系

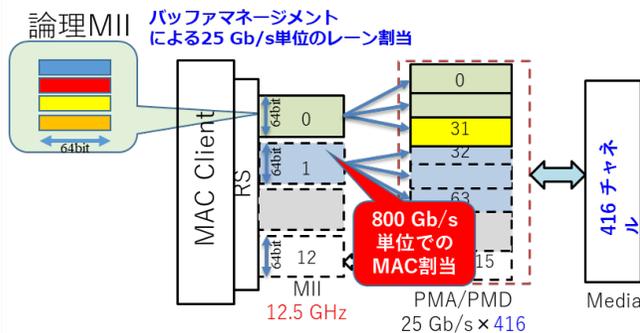
②C 超並列ダイナミックMAC技術

・最終目標：100多重級の光空間多重と10Tbps級のスーパーチャネルを前提とした大規模光ネットワーク実現をサポートするために、ダイナミックに帯域幅を変更可能なMAC技術のエミュレータによる原理確認により基盤技術を確認する。

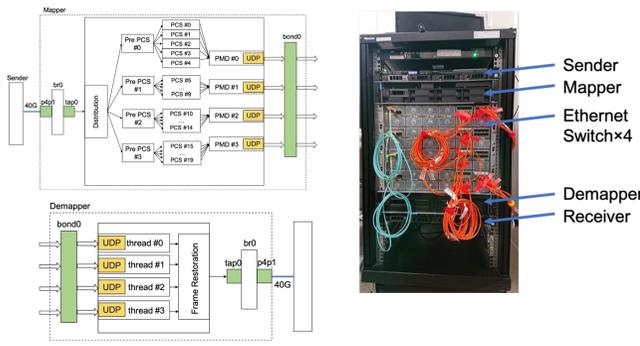
・2019年度目標：ダイナミックMACにおいて、帯域幅伸縮度現行比100倍(400レーン)の実現性見込を確認する。

・2019年度実施内容：昨年度検討した、伸縮度400を実現可能なMACアーキテクチャにおいて、レーン数をダイナミックに変更する仕組みを検討。複数コア/複数ファイバに跨ったスケュー処理実現手法の検討。ダイナミックMACエミュレータにおいて、提案手法の性能評価を実施。

・結果：MIIでの12.5GHz×64bit = 800Gb/s 単位での帯域容量割当の実現性確認及び、25Gb/s 単位での割当可能性を確認(図②C-1)。ダイナミックMACの階層型ラウンドロビンエミュレータの実装(図②C-2)と、エミュレータの性能評価の実施。ダイナミックMACの動作確認から、400レーンの実現性を確認。



図②C-1：ダイナミックMACの帯域容量割当手法



図②C-2：ダイナミックMACエミュレータの実装

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
2 (0)	5 (4)	3 (2)	39 (34)	0 (0)	1 (1)	5 (5)	3 (3)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) 連絡調整会議を開催
2020年1月23日、NICTにて。NICT関係者、受託者間で研究開発状況、到達目標、今後の進め方、成果発信の方法等の認識共有
- (2) 受託者間調整会議を開催
2019年4月15日、三菱電機にて。
2019年8月8日、電話会議にて。
2019年1月10日、三菱電機にて。
受託者間およびNICTオブザーバにより、研究開発の進捗状況を共有
- (3) 主要成果の特許出願、国内外の論文・学会・展示会における発表を実施
OSA論文Journal of Optical Communications and Networking (2020年1月)
IEEE/OSA論文Journal of Lightwave Technology (2020年3月、Early Access)
光ネットワーク産業・技術研究会: 2019年5月24日、産総研臨海副都心センター(東京都)
国際シンポジウムEXAT2019: 2019年5月29日～31日、いせとピア(伊勢市)
国際シンポジウムISUPT/SSPhF2019: 2019年6月17日～19日、米国・ナパバレー
国際会議OECC/PSC2019: 2019年7月7日～11日、福岡コンベンションセンター(福岡市)
国際会議AP2019: 2019年7月29日～8月1日、米国・サンフランシスコ
TTCセミナー: 2019年9月2日、芝公園電気ビル(東京都)
電子情報通信学会ソサイエティ大会: 2019年9月10日～13日、大阪大学(豊中市)
国際会議ECOC2019: 2019年9月22日～26日、アイルランド・ダブリン
電子情報通信学会PN/EXAT研究会: 2019年11月14日～15日、慶應大学(横浜市)

- 電子情報通信学会OCS研究会: 2020年1月16日～17日、別府豊泉荘(別府市)
国際会議IZS2020: 2020年2月26日～28日、スイス・チューリッヒ
電子情報通信学会PN研究会: 2020年3月2日～3日、奄美市社会福祉センター(奄美市)
国際会議OFC2020: 2020年3月8日～12日、米国・サンディエゴ
電子情報通信学会総合大会: 2020年3月17日～20日、広島大学(東広島市)
※現地開催中止
- (4) プレスリリース
香川大学、“空間チャンネルネットワークの実証実験に成功”、2019年10月8日
- (5) 展示会にて成果を発信
国際会議iPOP2019: 2019年5月30日～31日、NEC玉川事業場(川崎市)
2019年度PIF定期総会講演会・展示会: 2019年6月7日、ホテルルポール麹町(東京都)
国際会議OECC/PSC2019展示会: 2019年7月8日～10日、
福岡コンベンションセンター(福岡市)
KEIO TECHNOMALL2019: 2019年12月13日、東京国際フォーラム(東京都)
第33回光通信システムシンポジウム展示会: 2019年12月17日～18日、
東レ総合研修センター(三島市)
- (6) 国際会議にて表彰
国際会議OECC/PSC2019 Best Paper Award受賞
国際会議ECOC2019 Highly Scored Paper受賞(2件)

5. 今後の研究開発計画

- ①A 信号復元復号・適応制御技術: マルチレベル符号化、PS、適応復号に対して擬似的な情報圧縮を組み合わせ、電力効率改善効果の最大化を図る。
- ①B 光送受信処理技術: たたみ込みニューラルネットワークなどの「時系列波形変化」の特徴をより効果的に抽出できる構成を採用し、等化性能の改善を図る。
- ②A 超並列スライス設計制御技術: 項目2-2、2-3との連携検証を行うため、連携仕様の策定を行うと共に、検証に用いるテストベッドの拡張を完了する。また、拡張したテストベッド(現行比1000倍相当)を用いてスライス制御(光学的なAdd/Drop)の実験や、モニタリング手法とその結果を考慮したオープンIF制御の検討を行う。
- ②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術: SXCアドドロップ部のアーキテクチャを検討し、接続性自由度と経済性のトレードオフ性を明らかにする。
- ②C 超並列ダイナミックMAC技術: ダイナミック帯域容量割当、スキュー吸収手法、レーン故障対応等のMAC構成具体化を進め、エミュレータによる動作検証と机上検討より、ダイナミックMAC実現方式の基盤技術確立を目指す。