

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

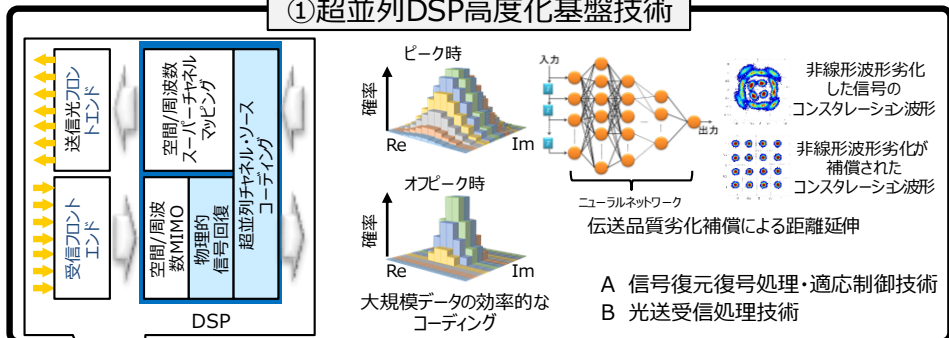
- ◆研究開発課題名 超並列型光ネットワーク基盤技術の研究開発
- ◆副題 大規模データを省電力・オープン・伸縮自在に収容する超並列処理光技術
- ◆実施機関 三菱電機(株)、(国研)産業技術総合研究所、(株)KDDI総合研究所、(国)香川大学、(学)慶應義塾
- ◆研究開発期間 平成30年度～令和3年度 (4年間)
- ◆研究開発予算 総額280百万円 (令和2年度70百万円)

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

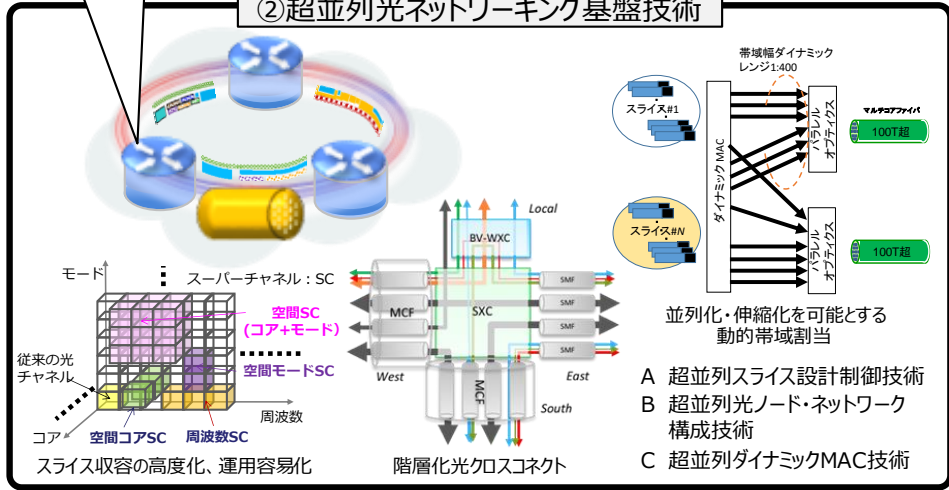
①超並列DSP高度化基盤技術



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、圧縮PS・マルチレベル符号化変調と適応復号の組合せにより、情報源マーク率を50%~10%まで変化させた場合の電力効率改善8~26倍に成功。

研究開発成果B 光送受信処理技術
WDM伝送時の相互位相変調 (XPM) による非線形波形劣化が課題。
・本研究開発では、XPMを考慮した物理現象特化型ニューラルネットワークを用いることにより、64QAM信号の伝送距離を60%延伸することに成功。

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
空間軸のスライス収容高度化とオープンインタフェースのSDM対応が課題。
・本研究開発では、空間分割多重システム(SDM)と既存波長分割多重システムにおけるオープンインタフェースを用いたスライス設定時の協調制御方式の実証実験に成功。

研究開発成果B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術
SXCの接続性自由度と経済性の関係、SCN導入の経済効果を明らかにすることが課題。
・本研究開発では、WDM/SDMマルチレイヤ収容設計アルゴリズムを用いたNW収容設計シミュレーション等により、SXCの接続性自由度と経済性の関係とSCN導入の経済効果を明らかにすることに成功。

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、ダイナミックMAC実現方式におけるスキュー吸収処理動作の設計、自動障害復旧処理方式の設計を完了した。また、エミュレータの400レーン動作に成功。

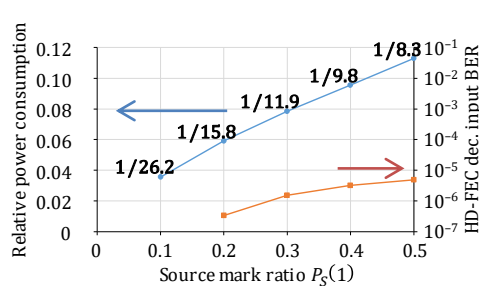
①A 信号復元復号処理・適応制御技術

・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立する。方式・アルゴリズムのみで電力効率6倍改善を達成する。

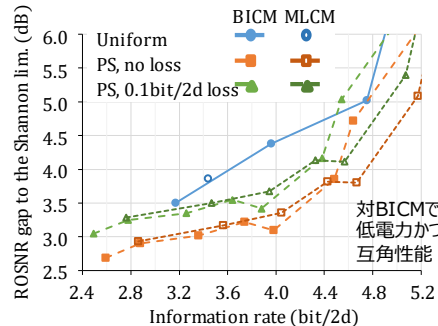
・2020年度目標：大容量化と電力効率改善に資する方式・アルゴリズム・信号フォーマットの単体評価を完了し、符号処理機能に関して電力効率25倍以上(方式・アルゴリズムのみで6倍以上)を達成する。

・2020年度実施内容：(1)圧縮PS-MLCM適応復号による低電力化効果定量化、(2)オフライン実験データ解析による確率整形(PS)マルチレベル符号化変調(MLCM)性能評価、(3)キー技術である階層化分布整合(DM)を用いた400Gb/s伝送検証、(4)階層化DMの送受信サブシステム実装性評価、(5)短距離/超長距離を想定したPS-MLCM方式拡張。

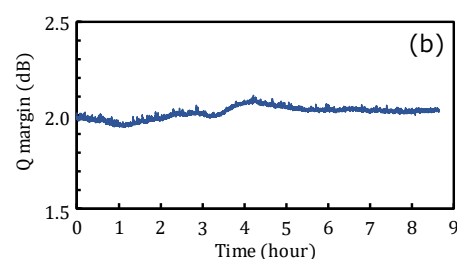
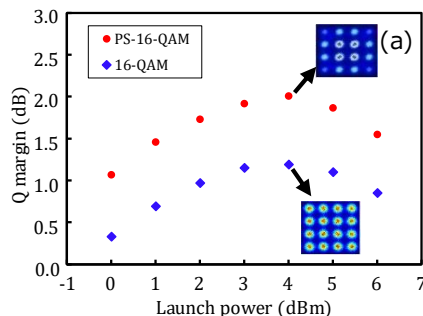
・結果：(1)圧縮PS-MLC-256QAMにて、従来の均一分布一括符号(BIC)128QAMに対して、8~26倍の電力効率改善をシミュレーションにより確認(図①A-1)。(2)PS-MLCMにより、従来のPS一括符号(BIC)と同等の伝送性能を達成(図①A-2)。(3)PS-16QAMの7ノード500km級伝送検証にて非線形耐長・長時間試験を完了(図①A-3)。(4)RTLコーディングとFPGAフィッティングを完了。最大スループット1.032Tb/sであり、PS-16QAMからPS-262144QAMに対応。(5)新たに粗/密MLCMを開発し、ピーク電力制約通信路での有効性をシミュレーションにより確認。



図①A-1：圧縮PS-MLCMシミュレーション結果
(プロット横の数字は電力効率倍率)



図①A-2：オフライン実験結果



図①A-3：400Gb/s PS-16QAM伝送検証：
(a)ファイバ非線形耐長、(b)長時間試験

①B 光送受信処理技術

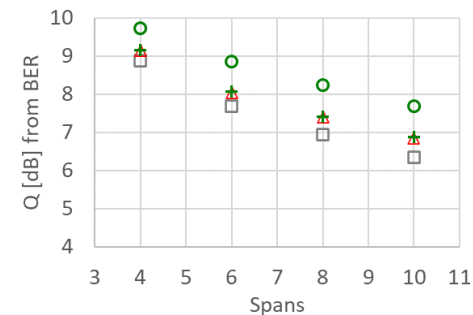
・最終目標：ニューラルネットワークを用いて、信号の非線形波形劣化を補償する送受信信号処理方法の開発を行う。波長多重された、周波数利用効率10bit/s/Hz以上である高次QAM信号について、伝送後に発生する非線形波形劣化の補償を行い、非線形波形劣化補償を行わない場合と比較して60%以上伝送距離を延伸する。

・2020年度目標：非線形波形劣化を補償する機械学習アルゴリズムを最適化し、伝送実験とオフラインのデジタル信号処理によって、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の60%以上延伸を達成する。

・2020年度実施内容：非線形波形劣化を補償する機械学習アルゴリズムについて検討し、波長多重した64QAM信号について、伝送距離を60%延伸できることを確認した。本手法について国内特許出願した。

非線形波形劣化補償の性能を最大限活かして実システムで伝送距離を延伸するために、光マルチトーン信号による送信側線形波形等化技術を開発し、国際学会OECC2020で口頭発表を実施した。

・結果：相互位相変調(XPM)の効果を取り入れた物理現象特化型ニューラルネットワーク(ANN)による非線形波形劣化補償の性能を評価した。9chに波長多重した32GbaudのDP-64QAM信号の伝送後波形を数値計算によって取得し、異なる伝送スパン数や入射パワーの条件に対して学習を実施し、非線形波形劣化補償後の信号品質を評価した。また、学習を行わない従来型のデジタル逆搬法(DBP)を用いた場合や、非線形波形劣化補償を行わない場合についても信号品質を評価し、結果を比較した。図①B-1は、現実的な伝送路を考慮した際に、伝送スパン数に対するQ値の計算結果を示しており、各補償方式において最適な入射パワーのもとで得られた結果を示している。このうち、提案方式である、1step/spanのANNでXPM補償を行った場合の信号品質が、従来手法であるDBPを上回って最良である。Q値のスレッシュドを7.5dBに設定した場合、非線形波形劣化補償を実施しない場合の最大伝送スパン数が6であるのに対して、XPMを考慮した1step/spanのANNの場合は10であり、伝送距離が60%延伸されることが示された。



図①B-1：現実的な伝送路を考慮した際の、伝送スパン数に対するQ値の計算結果。

- ：1 step/span ANN (XPM補償有り) [Pin = 1dBm]
- +
- △：2 steps/span DBP (SPM補償のみ) [Pin = 0dBm]
- ：補償無し [Pin = -1dBm]

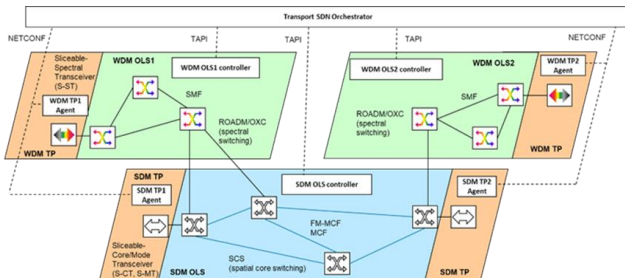
②A 超並列スライス設計制御技術

・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。

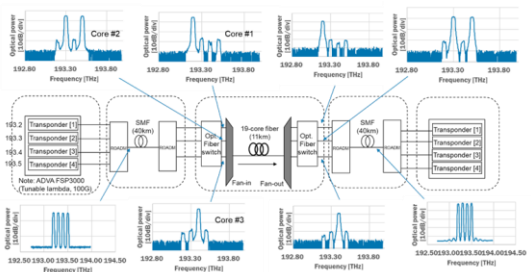
・2020年度目標：スライス設計手法の検討結果を踏まえて、令和3年度に実施する項目間連携検証を行うための連携仕様の検討を行うと共に、コア、モード、周波数を考慮したオープンインタフェースの拡張及び制御の検証を実施する。

・2020年度実施内容：超並列スライス設計制御技術の一環として、昨年度より検討を進めてきた空間分割多重光伝送(SDM)システムと既存波長分割多重光伝送(WDM)システムにおけるオープンインタフェースを用いたスライス設定時の協調制御方式の実証実験を実施した。また、最終年度の目標である光信号並列度研究開始時点比1000倍、伸縮度100倍の転送に向けて、項目間連携時に必要となる光ノードのオープンインタフェースを活用した基本制御機能の確認と制御性確認を実施した。

・結果：SDM/WDMのマルチドメイン光ネットワークにおけるオープンインタフェースおよび拡張したYANGモデルを活用したドメイン間協調制御を可能とするネットワークアーキテクチャを提案(図②A-1)すると共に、エンド-エンド間に光信号(スライス)を設定可能であることを実証し(図②A-2)、その結果をJOCNIに発表した。また、光ノードのオープンインタフェースによる制御性確認を完了した。



図②A-1：SDMシステムとWDMシステムを協調制御可能なネットワークアーキテクチャ



図②A-2：協調制御により設定された光信号

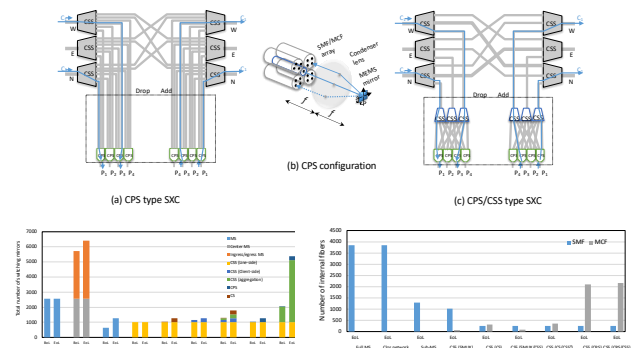
②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

・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立する。

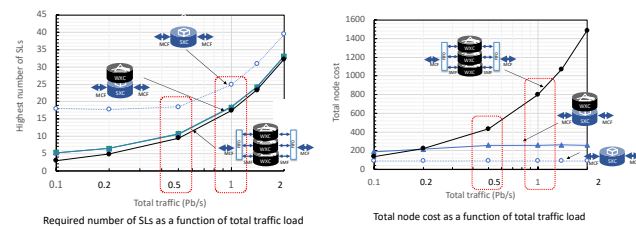
・2020年度目標：分岐挿入部のスイッチアーキテクチャにおける接続性の自由度と経済性のトレードオフの基本特性を明らかにする。WDM/SDMマルチレイヤ収容設計法を検討し、収容するトラフィック総量とSCN導入の経済効果について明らかにする。

・2020年度実施内容：分岐挿入部の各アーキテクチャに対して必要なスイッチ素子とノード内配線数を導出し、比較評価した。考案したWDM/SDMマルチレイヤ収容設計アルゴリズムをプログラミング実装し、トラフィック総量とSCN導入の経済効果の関係について検証した。伸縮度現行比100倍の実証実験を行った。

・結果：SXCの分岐挿入部の接続自由度とノードコストのトレードオフ関係を定量的に明らかにし、JSTQEに発表した(図②B-1)。提案するコア選択スイッチに基づくHOXCアーキテクチャが資源利用効率と経済性がともに優れることを定量的に示しJOCNIにて発表した(図②B-2)。提案するHOXCアーキテクチャにより、伸縮度現行比100倍可能であることを実験的に実証した。



図②B-1：SXCの分岐挿入部の接続自由度



図②B-2：収容するトラフィック総量とSCN導入の経済効果

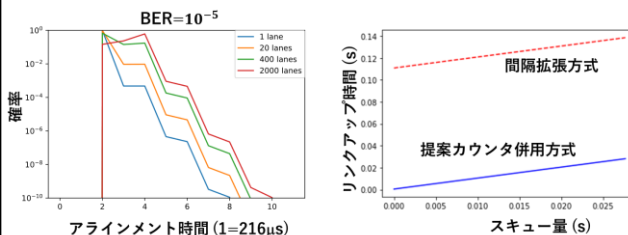
②C 超並列ダイナミックMAC技術

・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立する。

・2020年度目標：帯域可変割り当て方式、スキュー吸収方式の完成度を高めるとともに、自動障害復旧処理実現方式の基本検討の完了、エミュレータでの動作検証を完了する。さらに、項目2での連携仕様に基づいたエミュレータ設計を完了する。

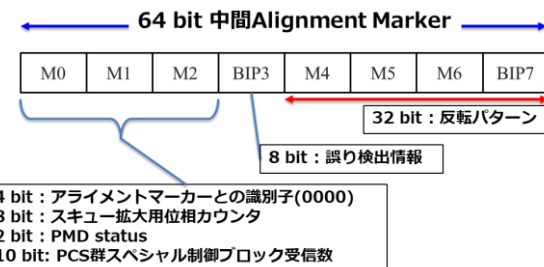
・2020年度実施内容：階層型ラウンドロビンマッパーを適用するダイナミックMACアーキテクチャに基づいて、ラウンドロビンマッパーのエミュレータによる動作確認・性能確認、スキュー吸収方式の検討、自動障害復旧処理実現方式の検討を行った。また、エミュレータに対して、項目②A、②Bと連携するための制御インタフェースの具体化と動作確認を進めた。

・結果：エミュレータでは、目標とする400レーンでの動作確認、及び階層化ラウンドロビンマッパーの有効性を確認した。スキュー吸収方式においては、10msスキュー吸収をターゲットとして、アラインメントマーカ設計、マルチレーンでのアラインメント確立時間・保持耐性評価により設計を完了した。自動障害復旧処理実現方式においては、昨年度に検討したダイナミックMAC帯域可変方式と連動して部分故障に対応する機構の設計を完了した。



(a) アラインメント時間確率分布 (b) リンクアップ時間特性

図②C-1：10 msスキュー対応方式の評価



図②C-2：障害復旧処理用シグナリングチャネル構成

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
4 (2)	7 (2)	9 (6)	60 (21)	0 (0)	1 (0)	11 (6)	3 (0)

※ 成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) 中間評価ヒアリングを実施
2020年11月13日、オンラインにて。NICT・総務省関係者、評価委員・専門委員、受託者間で研究開発及び成果発信について目標達成状況を共有。デモビデオ上映も実施。
- (2) 受託者間調整会議を開催
2020年6月24日、オンライン会議にて。
2020年9月14日、オンライン会議にて。
2021年2月16日、オンライン会議にて。
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
IEEE論文誌JSTQE: 2020年7月
IEEE/OSA論文誌JLT: 2件、2020年8月、2020年9月
IEEE/OSA論文誌JOCN: 2件、2020年10月、2021年2月
電子情報通信学会和文論文誌(B): 2020年9月
電子情報通信学会ComEX: 2件、2021年2月、2021年3月
国際会議PSC2020: 2020年7月13日～16日、オンライン開催
国際会議iPOP2020: 2020年9月10日～11日、オンライン開催
国際会議OECC2020: 2020年10月4日～8日、2件、オンライン開催
国際会議ECOC2020: 2件、2020年12月6日～10日、オンライン開催
ONFIRE Symposium: 2020年2月24日、オンライン開催
電子情報通信学会OCS研究会: 2020年6月18日～19日、オンライン開催

- 電子情報通信学会PN研究会: 2020年6月18日～19日、オンライン開催
2020光ネットワーク産業・技術研究会第2回公開討論会: 2020年9月4日、オンライン開催
電子情報通信学会OCS研究会: 2021年1月14日～15日、オンライン開催
PIF・PN研究会共催2020年度チュートリアル講演会: 2021年2月24日、オンライン開催
電子情報通信学会PN研究会学生ワークショップ: 2021年3月2日、オンライン開催
電子情報通信学会2021年総合大会: 5件、2021年3月9日～12日、オンライン開催
- (4) 展示会にて成果を発信
国際会議iPOP2020: 3件、2020年9月10日～11日、オンライン開催
国際会議iPOP2020 Showcase White paper: 2020年11月25日
第34回光通信システムシンポジウム展示会: 2020年12月15日～16日、オンライン開催
KEIO TECHNOMALL2020、オンライン開催

5. 今後の研究開発計画

- ①A 信号復元復号・適応制御技術: 最終目標であるDSP高度化基盤技術の確立に向けて①Bとの連携評価を行い、DSP基盤技術連携時の効果検証を行う。また、早期社会実装及びさらに将来にわたっての有効性検証に向けて、①Bとの親和性を鑑みた上で、高スループットでの実装性検証を行う。
- ①B 光送受信処理技術: ①Aと連携し、効率向上のための複雑な符号化および変調方式が適用された信号に対して非線形波形劣化補償動作を確認することで、本委託研究による成果を最大化する。
- ②A 超並列スライス設計制御技術: ②B、②Cとの連携により、光信号並列度1000倍、伸縮度100倍相当をサポートする超並列光ネットワーク基盤技術を検証する。
- ②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術: マルチ光レイヤネットワークテストベッドの改良を実施するとともに、②A、②Cで開発した技術と連携した評価を行い、最終目標を満たす基盤技術を検証する。
- ②C 超並列ダイナミックMAC技術: ②A、②Bと連携した動作検証のためのエミュレータ実装を進め、光信号並列度研究開始時点比1000倍、伸縮度100倍の転送をサポートするダイナミックMAC基盤技術を検証する。