

採 択 番 号        20401  
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

(1) 研究開発の目的

本研究開発課題では、複数の光チャンネルを束ねて運用管理するスーパーチャンネルを、周波数軸・光空間多重軸にて密に多重化する将来の 1Pbps 級空間多重ネットワークにおいて、ピークの通信データ量の向上と、データ量当たりの電力削減、これまでにない大規模ネットワークの伸縮自在化やオープン化を可能とする超並列処理光技術の研究開発を行う。具体的には、先進の情報理論を用いた符号処理にて光運用波長単位の通信データ量増加と電力効率化を実現する信号復元復号処理・適応制御技術と、機械学習により非線形シャノンリミットを克服し、高次直交振幅変調 (QAM) 信号の伝送可能距離を大幅に延伸することでネットワークの周波数利用効率を改善する光送受信処理技術を超並列 DSP 高度化基盤技術として開発する。更に、100 多重級の空間多重伝送技術を用いて超並列信号から効率的にスライスを設計制御し、現行比 1000 倍相当の信号並列度を実現する超並列スライス設計制御技術、波長多重と空間多重を階層化した新たな Spatial Channel Network (SCN) を実現するアーキテクチャ及びそのネットワーク設計法を明らかにし、SCN 上で伸縮比 400 以上 (現行比 100 倍以上) を実現する超並列光ノード・ネットワーク構成技術、バイトストリームのレーン振分による超並列信号の生成と並列レーン数の動的変更を用いた動的帯域割当によりダイナミックにチャンネル帯域幅割当を実現するダイナミック Media Access Control (MAC) 構成技術を超並列光ネットワーク基盤技術として開発する。これらの各超並列処理光技術を基盤技術として確立し、将来の 1Pbps 級空間多重ネットワークの実現を支えることが本研究開発の目的である。

(2) 研究開発期間

平成 30 年度から令和 3 年度 (4 年間)

(3) 実施機関

三菱電機株式会社<代表研究者>  
国立研究開発法人産業技術総合研究所  
株式会社 KDDI 総合研究所  
国立大学法人香川大学  
学校法人慶應義塾

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 280 百万円 (令和 2 年度 70 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 : 超並列 DSP 高度化基盤技術の研究開発

1. 信号復元復号処理・適応制御技術 (三菱電機株式会社)
2. 光送受信処理技術 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

研究開発項目 2 : 超並列光ネットワーク基盤技術の研究開発

1. 超並列スライス設計制御技術 (株式会社 KDDI 総合研究所)
2. 超並列光ノード・ネットワーク構成技術 (国立大学法人香川大学)
3. 超並列ダイナミック MAC 技術 (学校法人慶應義塾)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	4	2
	外国出願	7	2
外部発表等	研究論文	9	6
	その他研究発表	60	21
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	0
	展示会	11	6
	受賞・表彰	3	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：超並列 DSP 高度化基盤技術の研究開発

小項目単位で開発したアルゴリズム等に基づいた単体評価を完了し、電力効率改善、伝送距離延伸に関する各数値目標を達成した。項目 1-1 に関しては、早期社会実装に向けてキー技術のリアルタイム評価や、サブシステムの FPGA 実装性評価を完了した。

1. 信号復元復号処理・適応制御技術

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た。圧縮 Probabilistic Shaping (PS)、マルチレベル符号化変調 (MLCM)、適応復号の組合せについてシミュレーションし、方式・アルゴリズムのみで電力効率改善 8~26 倍 (情報源マーク率に依存) が達成できること示した。また、オフライン実験データ解析により提案方式の伝送性能観点での有効性を実証した。早期社会実装に向けては、キー技術である階層化分布整合 (DM) をリアルタイム動作させて 400Gb/s PS-16QAM 7 ノード伝送を行い、非線形耐力評価・長時間試験を完了した。さらに、1Tbps 級及び PS-16QAM から PS-262144QAM まで動作可能な PS-MLCM 用階層化 DM 送受信サブシステムの FPGA 実装性評価を完了した。

2. 光送受信処理技術

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。

研究開発項目2：超並列光ネットワーク基盤技術の研究開発

前年度に行った基本検討に基づき、各研究開発項目で進めている要素技術に関する数値検証、機能実装及び動作検証に関して、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検証、提案するスイッチアーキテクチャ及び Spatial Channel Network (SCN) 導入効果の明確化、ダイナミック MAC 実現方式における階層型ラウンドロビンマッパーのスケュー処理動作の確認を完了した。また、次年度の実施を予定している研究開発項目間連携のためのオープンインタフェースを用いた装置制御性の確認を完了した。

1. 超並列スライス設計制御技術

超並列スライス設計制御技術の一環として、前年度より検討を進めてきた空間分割多重光伝送システムと既存波長分割多重光伝送システムにおけるオープンインタフェース (NETCONF・RESTCONF/YANG) 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と制御性確認を完了した。

## 2. 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

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。その結果、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。その結果、提案するコア選択スイッチに基づく階層化光クロスコネクタ (HOXC) アーキテクチャが資源利用効率と経済性が共に優れることが定量的に明らかになった。また、SCN 上で転送帯域の伸縮度現行比 100 倍を可能であることを実験的に実証した。

## 3. 超並列ダイナミック MAC 技術

前年度までに確立したダイナミック MAC 実現方式における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 2-1、2-2 と連携するための制御インターフェースの具体化と動作確認を進めた。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、10 ms (現状の 100 倍) 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。

## (8) 今後の研究開発計画

### 研究開発項目 1：超並列 DSP 高度化基盤技術の研究開発

小項目ごとの単体評価に基づき、研究開発項目 1-1、1-2 で開発した技術を連携した評価を行い、各技術を組み合わせた場合にも最終目標を満たすことを検証する。なお、コロナ禍を考慮し、連携評価は受託者の各拠点間 (遠隔地点間) でデータを授受してオフライン処理により実施することを基本とする。

#### 1. 信号復元復号処理・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項目 1-2 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。具体的には、本研究開発項目で符号化処理を行って得られた信号若しくはその統計情報を研究開発項目 1-2 に渡し、研究開発項目 1-2 にて信号伝送及び光送受信処理技術による処理を行い、再度本研究開発項目での復号処理を適用して性能評価及び電力評価を行う。さらに、本研究開発項目でのキー技術に関しては、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、研究開発項目 1-2 との親和性を鑑みたくて、高スループットでの実装性検証を行う。

#### 2. 光送受信処理技術

項目 1-1 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。

### 研究開発項目 2：超並列光ネットワーク基盤技術の研究開発

前年度までに単体評価を完了した項目ごとの開発技術に基づき、研究開始時点と比較して光信号並列度 1000 倍、伸縮度 100 倍の超並列性・伸縮自在性・オープン性の両方を兼ね備えた光ネットワークを実現できる超並列光ネットワーク基盤技術を確立する。

#### 1. 超並列スライス設計制御技術

前年度からの検証を継続し、コア多重、モード多重、周波数多重を駆使して、現行比 1000 倍相当の信号並列度を検証する。また、研究開発項目 2-2 の超並列階層化光ノード構成・光ネットワーク設計技術と、項目 2-3 の帯域可変ダイナミック MAC 技術との連携を実施し、最終

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。

## 2. 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

研究開発項目 2-2-1、2-2-1 共通の実施内容として、光空間スイッチと波長スイッチを組み合わせた階層型光ノードならびに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、項目 2-1、2-2、2-3 で開発した技術を連携した評価を行い、最終目標である、光信号並列度研究開始時点比 1000 倍、伸縮度 100 倍の転送をサポートする基盤技術を検証する。

## 3. 超並列ダイナミック MAC 技術

令和 2 年度までに検討した、ダイナミック MAC 帯域可変割当方式、スキュー吸収方式、自動障害復旧処理実現方式の、ダイナミック MAC エミュレータでの動作検証及び、項目 2-1、2-2 と連携した動作検証のためのエミュレータ実装を進め、最終目標である、光信号並列度研究開始時点比 1000 倍、伸縮度 100 倍の転送をサポートする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基盤技術を検証する。