

令和元年度研究開発成果概要書

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定制御し、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 級空間多重光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 (令和元年度 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	2	0
	外国出願	5	4
外部発表等	研究論文	3	2
	その他研究発表	39	34
	標準化提案	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	5	5
	受賞・表彰	3	3

(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

前年度に行った基本検討に基づき、本年度の目標であるアルゴリズム大枠 Fix に向けて、電力効率改善、伝送距離延伸に係る要素技術の具体化やそれに必要な調査、動作確認、改良検討を行った。また、超並列 DSP 高度化で求められる項目間連携のための信号フォーマットやインタフェースを具体化した。

1. 信号復元復号処理・適応制御技術

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。

(1)については、MLC と PS を組み合わせた信号フォーマットにて適応的な復号繰返し制御をシミュレーションし、同一の情報レート (5.6bit/channel use) で電力効率が最大 9 倍改善することを確認した。(2)については、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。

2. 光送受信処理技術

前年度より継続して、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。単一チャネル 32Gbaud 偏波多重 4 値位相変調 (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、受信した波形で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波形劣化補償性能に関する検討を実施した。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、特に波長多重 (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、誤り訂正 (FEC) デコード前後のビット誤り率 (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。

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、本年度の目標である各要素技術に対するアルゴリズム大枠 Fix、一部試作、動作確認の完了に向けて、スライス設計制御、光ノード・ネットワーク、ダ

イナミック MAC の実現方法の具体化やそれに必要な調査、動作確認、改良検討を行った。また、超並列型光ネットワークで求められる項目間連携のための信号フォーマットやインタフェースを具体化した。

#### 1. 超並列スライス設計制御技術

最終年度の目標である信号並列度現行比 1000 倍相当（モードグループ数 6 倍、波長数 9 倍、コア数 19 倍）の達成に向けたモードグループ数 6 倍の信号並列度を先行的（次年度目標）に確認した。具体的には、課題 170 の資産も活用した 10 モード多重ネットワーク検証用テストベッドを用いて、6つのモードグループのスライス制御（光学的に Add/Drop）の検証実験を行い、6つのモードグループの 2 ホップ伝送の可能性を確認した。

また、オープン IF（NETCONF・RESTCONF/YANG）を用いてコア・モード・波長各々の軸の信号並列度が現行比 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。さらに、複数のオープンインタフェース（Telemetry/gRPC、NETCONF 等）を用いて、BER 情報を取得し、オープンインタフェースの性能比較を行い、リアルタイム性において gRPC ベースの Telemetry が優位であることなどを確認した。

#### 2. 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 2019 で発表し、Highly Scored Paper に選出された。コア選択スイッチ（CSS）については動作原理検証を OECC 2019 にて発表し Best Paper Award を受賞した。また、CSS の試作機を OFC 2020 にて発表した。ガウシアン雑音（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（Routing and Core Assignment）アルゴリズムの有効性を確認した。

#### 3. 超並列ダイナミック MAC 技術

前年度に行ったダイナミック 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、レーン数のダイナミック可変による帯域容量割当実現方式、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を行った。また、エミュレータを用いて、項目 2-1、2-2 と連携するためのインタフェースの具体化を進めた。帯域容量割当においては、13 並列配置する機能ブロックに対応した、32 レーン単位の割当に加えて、1 レーン単位での割当が可能となることを確認した。エミュレータにおいては、階層型ラウンドロビンが動作すること、非階層型ラウンドロビンと比較して 10 倍程度以上の性能向上が可能となることを確認した。