

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、複数の光チャネルを束ねて運用管理するスーパーチャネルを、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) 受託者

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)

平成 30 年度から令和 3 年度までの総額 280 百万円 (令和 3 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
1-1. 信号復元復号処理・適応制御技術 (三菱電機株式会社)
1-2. 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
2-1. 超並列スライス設計制御技術 (株式会社 KDDI 総合研究所)
2-2. 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)
2-3. 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	10	6
	外国出願	18	11
外部発表等	研究論文	11	2
	その他研究発表	80	20
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	3	2
	展示会	16	5
	受賞・表彰	5	2

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1：超並列 DSP 高度化基盤技術の研究開発

現行比 10 倍の 10Tbps スーパーチャネル実現に向けて、第 1 期の 3 年間で、研究開発項目 1-1 の信号復元復号・適応制御技術、1-2 の光送受信処理技術それぞれの提案と改良を行い、単体評価を完了した。第 2 期には、各単体技術を組み合わせて、研究開発項目 1 内での連携評価を行い、単体評価と同等の復号性能・消費電力（研究開発項目 1-1）と非線形波形劣化補償性能（研究開発項目 1-2）が得られた。

1-1. 信号復元復号処理・適応制御技術

新たな信号処理コンセプトである圧縮シェイピング技術の提案をはじめとして、圧縮シェイピングと組み合わせ可能なマルチレベル符号化変調技術を駆使し、個別目標である電力効率改善 25 倍（方式のみで 6 倍）に対して、方式のみでの電力効率改善 8.3~26 倍を達成した。圧縮シェイピング（及び圧縮部分を除いた Probabilistic Shaping）におけるキー技術である階層化分布整合については、2Tb/s 超という非常に高いスループットで FPGA 実装性評価を完了し、さらに一部機能はテストチップを用いて波長当たり 400Gb/s 実時間伝送実証も完了済みであることから、基盤技術の枠を超えて、2030 年を待たずに近い未来に社会実装が期待される水準まで完成度を高めることができたといえる。

研究開発項目 1-2 との連携評価では、圧縮シェイピング技術及びマルチレベル符号化変調技術に基づいて生成された 64QAM のシンボル系列を用いて、長距離光ファイバ伝送と機械学習に基づく非線形波形劣化補償のシミュレーションを行い、適応復号性能及び消費電力を評価し、単体評価と同等の復号性能・消費電力が得られた。情報源のスパース性が極端に大きい条件では、非線形劣化が過剰となることが判明したが、そのような条件では、機械学習に基づく非線形波形劣化補償性能も向上することがわかった。非線形波形劣化補償を組み合わせることにより、符号技術の低電力性が得られる条件を拡大することができたといえる。

1-2. 光送受信処理技術

物理現象特化型ニューラルネットワーク (ANN) において、自己位相変調 (SPM) に加えて相互位相変調 (XPM) 補償を実施することで、非線形波形劣化補償の性能を向上し、伝送距離を延伸する手法を新たに提案した。学習を実施するための数学的な枠組みを導出し、波長多重した偏波多重 QAM 信号に対して、数値シミュレーションと、周回伝送実験及びオフライン信号処理によって動作を確認し、伝送距離を 60%以上延伸できることを確認した。

まず、シンボルレートが 32Gbaud で、9 チャンネルの偏波多重 QAM 信号を考え、理想的な伝送路における伝送後の受信波形を伝送シミュレーションから得て、提案手法にもとづく非線形波形劣化補償の効果を検証した。DP-16QAM 信号の受信波形を用いて、送信波形との誤差が最小となるように、スパンあたりのステップ数が 1 である ANN の学習を行った。次に、周波数利用効率が 12bit/s/Hz である DP-64QAM 信号を 9 チャンネル波長多重した信号の伝送後受信波形に対して、学習が完了した ANN を用いた非線形波形劣化補償を実施した。その結果、非線形波形劣化補償を行わない場合の最大伝送距離は 6 スパンであるのに対して、提案手

法である、1step/spanでSPMとXPM両方の補償を実施するANNを用いた場合は、10スパンまでの伝送が可能となり、伝送距離が60%以上延伸できるという結果を得た。

さらに、シンボルレートが32Gbaudで、11チャンネルの偏波多重QAM信号を送信信号とし、周回伝送実験によって得られた受信波形について、シミュレーション結果と同様に、オフライン信号処理によって非線形波形劣化補償処理を実施した。実験で得られたDP-16QAM信号の受信波形を用いてANNの学習を行い、これを周波数利用効率10bit/s/HzであるDP-PS-64QAM信号受信波形に対して適用し、提案方式が有効に動作していることを確認した。

また研究開発項目1内連携評価として、研究開発項目1-1で検討されたコンスタレーション分布を持つ変調信号を入力とし、シミュレーションによって信号伝送及び非線形波形劣化補償を行い、電力効率の向上に関する検討を行った。

さらに、非線形波形劣化補償の性能を活かし、信号品質を向上して現実の伝送系で伝送距離を最大限延伸するために、光送信器で発生するアナログ光波形歪みを補償する周波数領域波形等化(FDE)の新たな方式を開発した。

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

超並列スライス設計制御技術に関して、空間多重軸/周波数多重軸を使用した光信号並列度現行比1000倍を可能とする超並列光ネットワーク設計技術を開発し、スライス設定技術及び信号特性劣化時のスライス制御技術の検証を完了した。また、オープン制御インタフェースを拡張することで空間多重軸も含むスーパーチャネルの制御を可能とするスライス制御技術の検証を完了した。

超並列光ノード・ネットワーク構成技術に関して、超広波長帯域・低損失コア選択スイッチとコア・ポートセクタの試作器を用いたWDM/SDM階層型光ネットワークテストベッドを構築し、100Gb/sから40Tb/sの広い範囲の光チャンネルの設定・切り替えが可能であることを実証すると共に、現行技術との比100倍の帯域伸縮度を達成した。

超並列ダイナミックMAC技術に関して、ダイナミックMACアーキテクチャ及びMAC容量割当技術、複数コア/ファイバに跨ったスケュー補償技術、MACレイヤでのレーン故障に対応する自動復旧機構の技術を開発し、ダイナミックMACエミュレータによる原理確認により光信号並列度現行比1000倍、伸縮度現行比100倍の転送をサポートする基盤技術を確立した。

研究開発項目2内での連携検証により並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の超並列光ネットワーク基盤技術の検証を実施した。

2-1. 超並列スライス設計制御技術

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、現行シングルモード80波長)相当の光信号並列度の検証、及び現行比1000倍相当(モードグループ数6倍、波長数9倍、コア数19倍、現行シングルモード80波長)の光信号並列度の実証を完了した。また、超並列スライス設計制御技術としてプロビジョニング技術及びスライスを構成する信号光の特性に応じてスライス品質保持のための制御技術の実証を完了した。さらに、コア、モード、周波数軸を考慮して拡張したデータモデルを用いたオープン制御インタフェース(NETCONF/YANG)を用いて制御性実証を完了した。課題内連携により、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、研究開発項目2-3の帯域可変ダイナミックMAC技術と連携し、並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の超並列光ネットワーク基盤検証を完了した。

2-2. 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

実施内容：コア選択スイッチ(CSS)に基づく空間クロスコネクタ(SXC)の各種構成法を検討、評価した。CSSを用いたWDM/SDM階層型光ネットワークテストベッドを構築、評価した。WDM/SDMマルチレイヤ経路計算・コア/周波数スロット割り当てアルゴリズムを考案・実装した。FMF用階層型光ノード実証テストベッドを構築、評価した。また、ASE雑音と非線形雑音を考慮した解析を実施した。

最終成果：CSSに基づくSXCがファイバスイッチに基づく従来構成と比較してハードウェア

アを削減可能であることを実証した。伸縮度現行比 100 倍（100 Gb/s から 40 Tb/s）光チャネルの設定・切り替えが可能であることを実証し、数値目標を達成した。SDM/WDM 階層型光 NW は高空間レーン利用効率と低コストの両立の可能性があると実証した。弱結合と強結合が混在する FMF を収容可能な階層型光ノードアーキテクチャの実現可能性を実証した（研究開発項目 2-1 と 2-2 の連携実験）。伝送距離維持（周波数グルーミング）と延伸（空間バイパス）のための設計指針（SXC 損失 $<7\sim 10$ dB）を得た。

2-3. 超並列ダイナミック MAC 技術

光信号並列度現行比 1,000 倍（80,000 チャネル）、帯域幅粒度 400 倍（帯域幅伸縮度現行比 100 倍の 400 レーン）をターゲットとする MAC（Media Access Control）レイヤ実現に向けた要素技術であるダイナミック MAC の確立を目標として、サブ課題Ⅰ：ダイナミック MAC アーキテクチャ及び MAC 容量割当技術、サブ課題Ⅱ：複数コア/ファイバに跨ったスケュー補償技術、サブ課題Ⅲ：MAC レイヤでのレーン故障に対応する自動復旧機構の技術検討、ダイナミック MAC エミュレータでの検証、研究開発項目 2-1、2-2 と連携した技術実証により、ダイナミック MAC 要素技術を確立した。

サブ課題Ⅰに関しては、技術検討を実施し、ダイナミック MAC エミュレータの作成、性能評価に基づく目標値の実現性を確認した。サブ課題Ⅱに関しては、技術検討を実施し、ダイナミック MAC エミュレータでの基本動作確認、JGN を利用した検証実験、研究開発項目 2-1、2-2 と連携した技術検証により目標値の実現性を確認した。サブ課題Ⅲに関しては、技術検討を実施し、ダイナミック MAC エミュレータでの基本動作確認、JGN を利用した技術検証により自動復旧機構の実現性を確認した。

最終成果としては、(1) ソフトウェアに基づいたダイナミック MAC エミュレータを作成し、伸縮度現行比 100 倍相当の 400 レーンでの動作を確認、(2) スライス並列度 1,000 倍に対するスケュー補償ターゲット 5 ms でのダイナミック MAC の動作を、JGN を利用したエミュレータ利用実験で確認し、研究開発項目 2-1、2-2 と連携した広域実証実験による動作検証を完了、(3) 部分故障に対応した自動復旧機構の設計を完了し、基本機能をダイナミック MAC エミュレータ利用実験で動作検証を完了、の三項目が得られた。以上により、最終目標の基盤技術確立を達成した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

研究開発項目 1：超並列 DSP 高度化基盤技術の研究開発

国家情報通信基盤を下支えする大容量光ネットワークの高度化は国民生活の安全性や利便性の向上に直結している。このうち、基幹系光ファイバ通信で用いられるデジタルコヒーレント技術におけるキーデバイスである DSP は、約 3 年周期で新たな半導体プロセスを用いた技術革新が必要である。デジタルコヒーレント技術の適用先の主なアプリケーションは、長距離系から中距離・短距離に徐々にシフトし、80km 級やそれ以下の領域もデジタルコヒーレント技術を適用するターゲットとなってきている。この先 5 年程度は現在の傾向が継続するものと考えられる。一方で、ネットワークのオープン化、ディスアグリゲーション化が進展しており、OIF や Open ROADM といった業界団体での標準化、標準規格に基づく異ベンダ対向接続に向けた流れが加速すると予想される。

係る状況で、国産 DSP は世界で一定のシェアを有しており、国際競争力強化や経済安全保障のためにもその地位の維持拡大が不可欠である。DSP 技術自体の高度化のみならず、パートナーベンダとのデファクト化や標準化に向けた活動も競争力強化に向けて重要であり、関連プロジェクトや産産連携にて推進していく。

1-1. 信号復元復号処理・適応制御技術

総務省委託研究による DSP 開発と連携し、2030 年を待たずに早期社会実装を推進する。加えて、NICT 令和 3 年度 Beyond 5G 研究開発促進事業の「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（課題番号 O14）」にて高効率化に向けた研究開発を行い、本研究における大容量・低電力化との相乗効果を狙う。

提案技術のうち、圧縮シェイピングは広く一般に有効な学術的新規コンセプトと考えられ、別

分野への応用展開も期待される。キー技術である階層化分布整合については、本委託研究にて FPGA での Probabilistic Shaping 技術の高スループット実証を世界で初めて行ったのに続いて、第三者によっても、階層化分布整合と周辺機能（誤り訂正等）と組み合わせた FPGA 実証が行われており、回路実装性の良さが訴求されている。これは Probabilistic Shaping 技術及び階層化分布整合の相互接続や標準化に向けた好材料と考えられ、総務省委託研究における DSP 開発や産産連携の枠組み内で、標準化に向けた議論を深めていく。

1-2. 光送受信処理技術

本事業の成果をもとに、学会や論文発表を通じて、企業を中心とする業界関係者に提案方式の優位性や性能をアピールする。信号処理用 DSP の事業化に興味を持つ企業を募り、企業への技術移転を通じて社会実装に取り組む。また必要に応じて、標準化につながる活動を実施する。

ある調査会社による最新の推定によると、2026 年のデジタルコヒーレント DSP 市場規模は 1450 億円程度と予想されており、仮にシェアとして 10%の製品に採用されれば、100 億円を上回る規模の売り上げに貢献できることになる。また提案方式が実用化されれば、消費電力を大幅に増やすことなく、長距離大容量光伝送システムの性能を向上することができ、社会における光通信の利便性向上に直結し、結果として国民生活の向上に資すると考えている。

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

本委託研究で得られた成果の一部は、NICT 令和 3 年度 Beyond 5G 研究開発促進事業の「Beyond 5G 大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発（課題番号 002）」において発展的に継続されており、Beyond 5G モバイルサービスに貢献するために必要な基盤技術の研究開発が推進されている。5 年後には、キーとなるデバイスがモジュールベンダからシステムベンダに提供され、実用化に向けた開発が加速している状況が想定される。

また、SDM に関する標準化に向けた現在の動きとしては、IEC や ITU-T において、MCF 用コネクタに関する測定技術標準化の議論、及び SDM 光ファイバとケーブルに関するテクニカルレポートの作成がそれぞれ進められている。今後 1 年から 2 年以内に標準規格の策定が開始される見込みであり、5 年後には SDM ファイバやデバイスに関する一部の標準規格策定が完了していることが見込まれる。

若手研究員の人材育成に関しては、本委託研究の成果を国内外の学術会議において継続して報告することを通じて、学術界及び産業界の人的ネットワークの形成を図る。

今後、本委託研究で検証した空間チャネルネットワークを具体的な適用対象に導入するための研究が必要と考えられ、引き続き、産学官の力を結集した体制づくりと国による支援が求められる。

2-1. 超並列スライス設計制御技術

NICT 令和 3 年度 Beyond 5G 研究開発促進事業の「Beyond 5G 大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発（課題番号 002）」において発展的に空間多重光ネットワークのリンクに関する研究開発を継続し、その経済性や転送能力を明らかにするとともに、社会実装に向けた超並列型光ネットワークの具現化、総合実証を推進する。

2-2. 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

超並列光ノード・ネットワークの基本コンセプトならびにそのベネフィットについては、引き続き、国内外の学会において積極的に発表し、研究コミュニティへの浸透を図ると共に、知的財産についても国内外の権利化を推進していく。また、本委託研究で得られた成果の一部は、NICT B5G 委託研究（課題 002）に引き継ぎ、CSS ベースの SXC を実用に供し、B5G モバイルサービスに貢献するために必要な基盤技術の研究開発を推進する。

2-3. 超並列ダイナミック MAC 技術

継続的な成果報告を実施し、“超並列”をホットトピックとして広げることで学術界に貢献

していく。また、得られた技術を、超低遅延ネットワークや時空間同期への適用といったネットワーク基盤構築のための研究開発へと発展させていくことで継続的な技術の継承・発展を行う。