

## 2-3 光ネットワーク動的再構成技術

### 2-3 *Dynamic Reconfiguration Technologies for Optical Networks*

廣田 悠介 後藤 優太

HIROTA Yusuke and GOTO Yuta

Beyond 5G / 6G 時代の光ネットワークでは、様々な変化し地理的・時間的に局所集中する通信需要に対して限られた通信資源で光ネットワークを動的に再構成して柔軟に対応することが求められている。光ネットワークにおけるデータ伝送路である光パスを通信需要に応じて柔軟に設定・解放するため、既存の光パスへの影響を極力抑えるデバイス技術に加えて、光パス上の各デバイス・スイッチを動的かつ高効率に設定するプログラマブル制御技術の研究開発が進められている。本稿では、我々が研究開発している光パスの頻繁な設定・解放時の利得変動を抑制する高線形性光増幅器、オープン・ディスアグリゲーション志向ホワイトボックス型光伝送装置を組み合わせたプログラマブルな光ネットワーク技術、マルチコアファイバ伝送における多数の光資源を動的に割り当てる資源割当技術について紹介する。

In optical networks in the Beyond 5G / 6G era, it is necessary to respond flexibly to the various changes and geographically and temporally localized congestion of communication demands by dynamically reconfiguring optical networks with limited communication resources. To flexibly control the optical network, research and development of device technologies that minimize the impact on existing optical paths are being conducted. In addition, research and development of programmable control technology to dynamically and efficiently configure each device/switch on the optical path transmission route are underway. In this paper, we introduce a highly linear optical amplifier that suppresses gain fluctuations during frequent setup and release of optical paths. Next, we experimentally demonstrate a programmable optical transmission combining open-disaggregation-based white-box switches. This paper also introduces a dynamic channel allocation technology for a large number of optical resources, particularly in multicore fiber networks.

#### 1 まえがき

Beyond 5G / 6G 時代のネットワークアプリケーションとして自動運転や遠隔医療などの実用化が求められており、従来よりも大幅な接続機器数の増加、高精細映像の安定した配信や低遅延通信への要求が高まってきている。将来的にも継続しつづけると予想されるトラフィック増加に対して、通信容量を拡大する技術としてマルチコアファイバ技術などの研究開発が進められてきており、近年、クラッド径 125  $\mu\text{m}$  の標準外径で 19 コアを具備したマルチコアファイバによる 1.7 Pbps の大容量伝送実験などが行われている [1]。一方で、通信の安定性や低遅延特性などの実現に向けて、光信号を光のまま中継処理する全光ネットワークへの期待が高まっている。全光ネットワークを実現するため、デバイスの開発、交換方式、波長割当、波長変換

など、様々な研究が行われている。

さらに、様々な変化し地理的・時間的に局所集中する通信需要に対して、所望のノード間でデータ通信を行う光パスを柔軟に設定・解放させることで、迅速な通信サービス提供や早期の障害復旧、光ネットワークの省資源化が目指されている。しかし、従来の光ネットワークでは光パスは固定的なものとして扱われてきた。電気のネットワークと異なり光ネットワークでは、光パスを設定するためには、事前に送受信器であるトランスポンダが使用する周波数資源や Forward Error Correction (FEC) 方式などを細かく設定するとともに、光信号を中継する交換ノードにおいても、波長チャネルの光信号を伝送するファイバやスイッチ経路を事前に決定する必要がある。これらの処理は、それぞれの交換ノードで既に設定された他の光パスへの影響を考慮し、伝送路途中の増幅器などを微調整するた

め、頻繁な光パス設定・解放は想定されていない。一方で、将来の時々刻々と変化する大容量かつ安定した通信を省エネルギーで提供するためには、状況に応じて適切な光パスを設定・解放する柔軟な光ネットワークの実現が必要不可欠である。

柔軟な光ネットワークを実現する上で、頻繁な光パス設定・解放時に既存光パスへの影響を抑制することが重要である。そこで本稿では、これまでに開発した高線形性を有するエルビウム添加光ファイバ増幅器（以下、BM-EDFA: Burst-mode Erbium doped fiber amplifier）を紹介する。続いて、将来の柔軟な光ネットワーク制御機能検証を目的として、オープン・ディスプレイアグリゲーション向けのホワイトボックス型光伝送装置と BM-EDFA を用いたプログラマブル光ネットワーク制御の実証実験を紹介する。さらに、光ネットワークの周波数資源割当制御の観点からの取組を紹介する。周波数資源の利用効率向上に向けて、従来の固定的で過剰なマージン確保とは異なり伝送距離や伝送レートに応じて適応的に必要最小限の帯域のみで伝送を行うエラスティック光ネットワーク [2][3] と、マルチコアファイバやマルチモードファイバを合わせた空間分割多重型エラスティック光ネットワークに関する研究が活発化しており、近年では機械学習の活用も含めて様々な観点から研究されている。本稿では、将来利用可能になると予想される多数の空間チャンネル（コア・モードなど）・波長チャンネルなどを高効率で割り当てる光資源割当制御技術についても紹介する。

## 柔軟な光パス設定のための高線形性光増幅器

限られたネットワーク資源やコンピューティング資源を柔軟に活用するために、ネットワーク仮想化技術やネットワーク機能仮想化技術が注目を集めている [4]-[7]。仮想化ネットワークでは、短時間かつ瞬時に発生する通信サービス要求に対して、適切な通信容量でデータを伝送するための光パスを迅速に提供できることが重要である。従来の光パスの設定・解放時には、光デバイスなどを様々な過渡現象から保護したり、増幅器などの他のデバイスをそれぞれ調整したりするために、十分な時間マージンを取る必要がある。プログラマブルな光ネットワークで柔軟な光パス設定・解放を実現するには、このマージンタイムを短縮する必要がある。

上述の光ネットワークを実現するには、光入力パワーの急激な変化に耐えられる交換ノードが必要である [8]。特に、現在一般的に使用されている EDFA は、図 1 上に示すように、光信号の入力パワーが急激に変

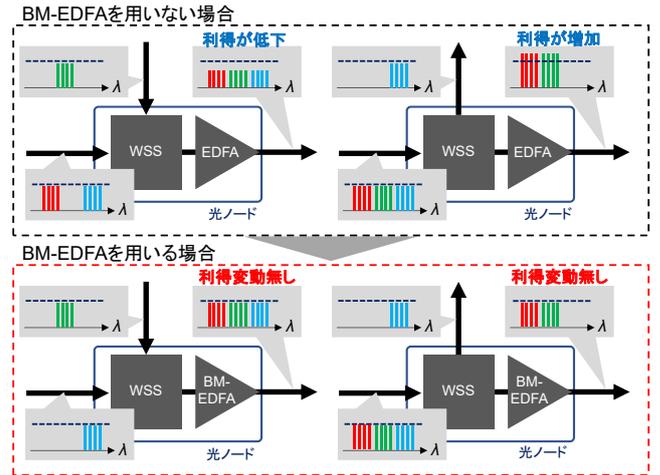


図 1 EDFA による利得変動が既存パスへ与える影響

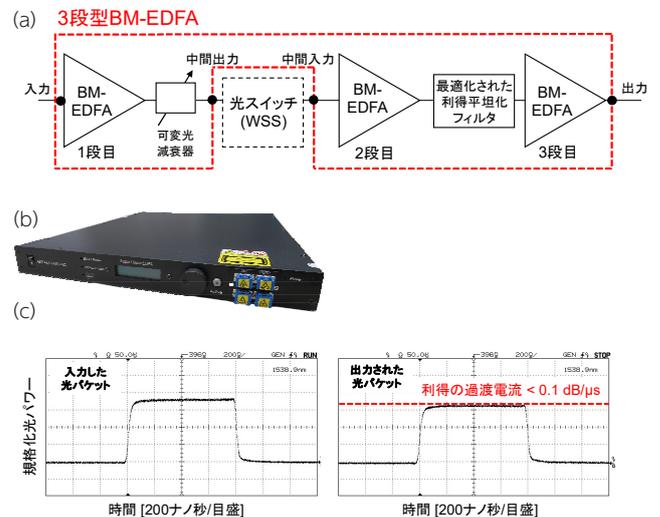


図 2 開発した 3 段階 BM-EDFA の (a) 構成と (b) 外観及び利得変動抑制結果

化すると利得変動が発生し、既存の通信品質に悪影響を及ぼす可能性がある。この問題を解決するために、NICT では BM-EDFA を用いた柔軟な光パスネットワークを提案しており、図 1 下に示すように利得の維持を実現可能であることを実証してきた [9]-[11]。これらの BM-EDFA は、特別なラージコアのエルビウム添加ファイバ(EDF) [12] と光フィードバックによる利得クランプ [9]-[11] を備えた大きな固有飽和パワーを持つように設計されている。しかし、従来の BM-EDFA は、光ノードと広帯域光路間のスパンが長いコア/メトロネットワークには最適化されておらず、長距離・広帯域伝送実験は行われていなかった。本研究では、長距離及び広帯域のコア/メトロネットワークをサポート可能な新しい 3 段階 BM-EDFA を開発実証した。3 段階 BM-EDFA は、コア/メトロネットワークをサポートするために、従来の BM-EDFA に対して、コア/メトロネットワークにおける光パス切り替えに

不可欠な波長選択スイッチ (WSS) の光損失をサポートするとともに、利得平坦化フィルタの最適化を行い、Cバンド帯域全体の利得スペクトルを平坦化した。

実証実験として、開発した3段型 BM-EDFA における利得の過渡抑制の効果を測定した。図2に開発した3段型 BM-EDFA の構成・外観及び出力結果を示す。測定時には波長可変レーザー (Agilent 81682) を使用した。長さ 800 ナノ秒相当の光パケットを音響光変調器によって生成した。次に、開発した3段型 BM-EDFA で増幅された光パケットを光通信アナライザ (HP 83475B) で検出した。図2(c)はパケット伝送時の入力側及び出力側の光信号強度の測定結果であり、出力された光パケットが平坦な頂部を維持していることを確認できる。利得の過渡電流は 0.1 dB/ $\mu\text{m}$  未満であり、3段型 BM-EDFA が利得過渡応答を正しく抑制していることを明らかにした。

### オープン・ディスアグリゲーション スイッチを用いたプログラマブル 3 光ネットワーク制御の実証

Beyond 5G / 6G 時代に向けて、高い導入コスト、人による厳密で時間のかかる設定、地域差などの課題を解決するために、ネットワーク機能の仮想化、ディスアグリゲーション、ソフトウェア化などの主要技術の導入が光ネットワーク分野でも検討されている。その中で、クラウドネイティブの Software Defined Networking (SDN) コントローラ [13]-[16] やマイクロサービスベースの SDN 制御 [17][18] に焦点を当てた研究がある。

我々は、プログラマブル光ネットワークの実現に貢献する技術として、数種類のマルチパスによる柔軟なエンドツーエンドの光パス管理を実現するエンドツーエンドのクラウドネイティブなオーケストレーションシステムアーキテクチャを新たに開発している。これは、ネットワークの運用管理機能をクラウド環境上のマイクロサービスとして実装することで、ネットワーク運用・管理の堅牢性やアップグレード性の向上が期待される。また、前節で述べた利得スペクトル平坦性を向上させた BM-EDFA に加えて、オープン・ディスアグリゲーション志向のホワイトボックス型光伝送装置を導入した光ネットワーク制御技術の開発・実証実験を実施した。

本稿では、マルチベンダのホワイトボックス型光伝送装置ベースのマルチドメイン光ネットワーク実証に焦点を当てて紹介する。図3に、いくつかのドメインに分離された光ネットワークを備えたエンドツーエンドオーケストレーション光ネットワークを示す。オー

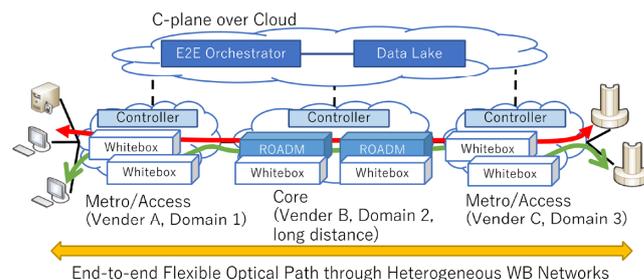


図3 エンドツーエンドオーケストレーションネットワーク

ケストレータはクラウドネットワーク上に実装され、各ドメインにおける様々なベンダのホワイトボックス型光伝送装置で構成される交換ノードと通信する。ここで、ユーザからみると、データ伝送するネットワークがどのベンダの交換ノードを利用しているか、ユーザが必要なタイミングで安定したエンドツーエンドの伝送路を柔軟に利用できることが重要である。

本実証実験では、マルチドメイン光ネットワークにおける柔軟なネットワーク制御を示すために、ドメイン1の入出力ポート変更、ドメイン2の波長変更、ドメイン3の再ルーティングの3つのユースケースを実施し、評価した。最初のユースケースでは、ユーザからの低遅延トラフィック要求をサポートするために、要件を満たさない光パスが存在するシナリオで機能検証を評価した。遅延要件 (閾値 1.0 ミリ秒) のあるユーザトラフィックを、より遅延の短い伝送路で伝送するように光パスを切り替える。このシナリオでは、ユーザトラフィックはドメイン1のみに送信され、ホワイトボックス1からルータテスト測定ポートに直接接続した。まず、ドメイン1に往復 100 km のフィールドファイバを使用した光パスを設定した。このときの TCP SYN/ACK 時間は平均 1.2 ミリ秒、最大 2 ミリ秒であった。あらかじめ設定された遅延要求の閾値を超えると、ネットワーク管理機能のクローズループ制御により、ホワイトボックス1の出力ポート及び関連する光デバイスが自動的に制御され、より短い伝送路の光パスに切り替わる。光パス切り替え後の TCP SYN/ACK 時間は平均 0.4 ミリ秒であり、遅延要求を満たす光パスへの自動切り替え機能を検証した。2 番目のユースケースではエンドツーエンド光パスの割り当て波長が変更された場合として 1530.8 nm、1545.67 nm、1561.06 nm の3つの利用可能な波長チャネルを変更した。図4(a)に前節で紹介した BM-EDFA をドメイン2に使用して 1,000 km の長距離伝送した後の光信号をスペクトルアナライザで測定した結果を示す。このとき、受信側で測定された FEC 前のビット誤り率はそれぞれ 0.0147、0.0133、0.0149 であり、エンドツーエンド接続のパフォーマンス低下がないことが確認された。また

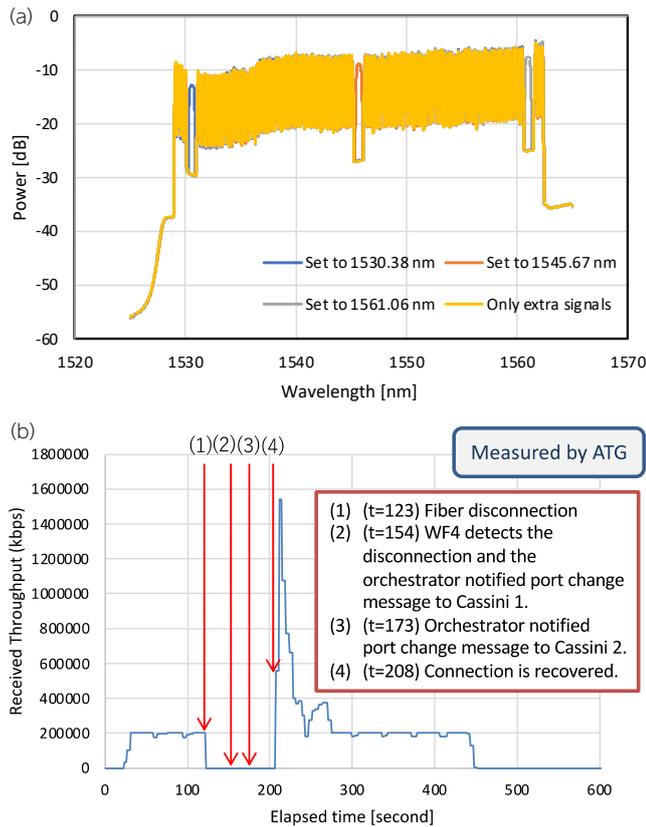


図4 実験結果 (a) 光スペクトルアナライザの結果 (b) エンドツーエンドアプリケーションのスループット

このとき、平均波長再割り当て時間は103秒であった。最後に、3番目のユースケースとして、図4(b)にドメイン3のホワイトボックス型光伝送装置間のファイバ切断をエミュレートした場合の、ファイバ切断前後のエンドツーエンドのアプリケーションスループットを示す。ここで、ルータテストでhttpトラフィックフローを生成し、各ユーザートラフィックを3つのドメインネットワークを介して送信したところ、一方向の測定遅延は5.4ミリ秒であった。オーケストレータでは、トラフィック監視機能をマイクロサービスとして定期的に行う。時刻 $t=123$ でファイバ切断障害を模擬したところ、時刻 $t=154$ において、オーケストレータはこのマイクロサービスで監視されているトラフィック需要に基づいて異常イベントを検出し、ポート変更メッセージを各ホワイトボックス型光伝送装置に通知した。この伝送路切り替え処理はオーケストレータのワークフローとして事前定義されている。各ホワイトボックス型光伝送装置では制御メッセージを受信した後、スイッチポートがすぐに他の使用可能なポートに変更され、迂回ポートの経路でデータ送信が再開された(時刻 $t=208$ )。これらの実験から、マイクロサービスとして実行されるクラウドネイティブオーケストレーション機能のユースケース検証に成功した。

#### 4 超多数チャンネルを高效率制御するための光周波数資源割り当て制御技術

光ネットワークにおける光パスの収容設計問題として、光パスに対する伝送経路、波長(または周波数スロット)の割り当て問題(Routing and Spectrum Assignment (RSA)問題)が研究されている。RSA問題の解法として、これまでInteger Linear Programming (ILP)あるいはヒューリスティック手法が用いられてきたが、近年では、このRSA問題に対しても機械学習の適用が検討されている。文献[19]では、深層学習を用いて割り当てる資源を決定している。文献[20]では、収容可能な光パス数をニューラルネットワークにより推定し、ファイバの利用効率向上を目指した光パス設定のためのRSAアルゴリズムに利用している。一方で、これらのように直接的にネットワークの状態を評価して割り当てを求めるほかに、一定期間のトラフィック需要を再起型ニューラルネットワークにより推定して資源割り当て最適化を行う方式[21]や、数モードマルチコアファイバネットワークを対象として、機械学習によりクロストークによる劣化度合いを推定し、コア・モード・周波数スロット割り当てに利用する方式[22]なども提案されている。

我々は、近年注目されている空間分割多重型エラスティック光ネットワークを対象として、経路選択、コア選択及び光周波数資源割り当て問題に焦点を当て、ネットワーク全体での負荷分散を行うことで光パス棄却率を低減可能な光パス設定手法を開発した。具体的には、各リンクファイバで利用可能な空間チャンネル設計及び空間分割多重型エラスティック光ネットワークにおける強化学習を用いた光周波数資源割り当て手法を提案した。提案手法は、事前の空間チャンネル設計フェーズとオンデマンドでの割り当てフェーズから構成される。空間チャンネル設計フェーズでは、オンデマンドに光パス設定をする際の経路情報と送受信間の統計的なトラフィック量に基づいて各リンクファイバで利用可能な空間チャンネル設計を行う。続いて、オンデマンド光周波数資源割り当てフェーズでは、逐次実行前の準備としての候補経路算出及び学習器の初期化の後、各接続要求に対して、強化学習による行動選択、選択された行動による光周波数資源割り当て、学習器の更新を順に実行する。事前に、K-shortest Pathアルゴリズムを用いて送受信ノードペアごとに候補経路を $K$ 個算出しておく。ここで、機械学習器としては、算出した候補経路、利用可能な空間チャンネル、周波数スロットの3つの値の組み合わせを強化学習における一つの行動として扱い、オンライン学習を進める。一般的に多くの研究では、K-Shortest Pathにおいて $K=3$ のような比較的少な

い候補経路が想定されている。一方で本方式では、互いに衝突が起こりにくくネットワーク全域に渡った負荷分散が可能な経路を選択することにより棄却率の改善を図る。そのため、候補経路数を  $K=10$  以上を想定しており、行動空間が大きくなることから学習がスムーズに進まないことが予想される。そこで、行動空間において経路ではなく周波数軸上でグリッド制約を設けることにより学習を高速化する手法も提案した。

不均一な空間チャンネルを有する空間分割多重型エラスティック光ネットワークにおいて、各ファイバリンクにおける空間チャンネル設計には幾つかの基本方針が考えられる。実際に光ネットワークを構築して運用を進めるにあたっては、マルチコアファイバの製造コストや交換ノードにおける入出力空間チャンネル数の制約にも大きく依存した空間チャンネル設計となることが予想される。一方で、本稿では、不均一な空間チャンネルを有する空間分割多重型エラスティック光ネットワークにおいて、空間チャンネル数とトラヒックデマンド、周波数資源割当手法の関係性や基本特性を評価するために、空間チャンネル数(コア数)や交換ノードにおける空間チャンネルポート数は無制約と仮定し、設計段階では自由に空間チャンネル数を各ファイバリンクに設定できるものとしている。リンク  $l$  における空間チャンネル数を  $c_l$  とすると、 $c_l$  は下記の式で算出される。

$$c_l = \min\left\{ \left[ C \times \frac{\sum_{i \in N, j \in N} r_{i,j}^l}{\max_{i \in L} \{\sum_{i \in N, j \in N} r_{i,j}^l\}} \right], 1 \right\} \quad (1)$$

ここで、 $C$  は全リンクでの最大空間チャンネル数、 $r_{i,j}$  は送信ノード  $i$  から受信ノード  $j$  への平均トラヒックデマンド量、 $r_{i,j}^l$  はリンク  $l$  を通過する送信ノード  $i$  から受信ノード  $j$  への平均トラヒックデマンド量、 $N, L$  はそれぞれネットワーク内のノード集合及びリンク集合である。

図6に、比較方式 (First-Fit)、グリッド(周波数スロット間隔)制約無しの提案方式 (Prop. w/o Grid) 及びグリッド制約ありの提案方式 (Prop. w/ Grid) の各方式において、 $K$ -shortest path 算出時のパラメータ  $K$  を1から30に変えた場合の棄却率の結果を示す。候補経路数  $K=1$  のときはいずれの方式においても非常に高い棄却率となっている。これは、全光パスが最短経路を選択することによりネットワークの中央部分で極端な輻輳が発生し、連続性制約を満たすことが困難になっているためであると考えられる。比較方式である First-Fit では、候補経路数を増やすことにより、割当解が見つからない場合に異なる候補経路も探索することが可能となるため、徐々に棄却率は低下する。しかしながら、最短経路から順に候補経路を探索することからネットワーク中央部を通過する光パスが設定されていくため、ネットワーク全体での負荷分散という観点

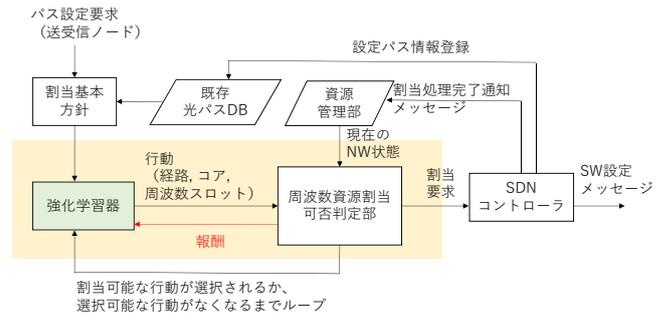


図5 超多数チャンネル選択を含めた光バス設定割当制御の概要

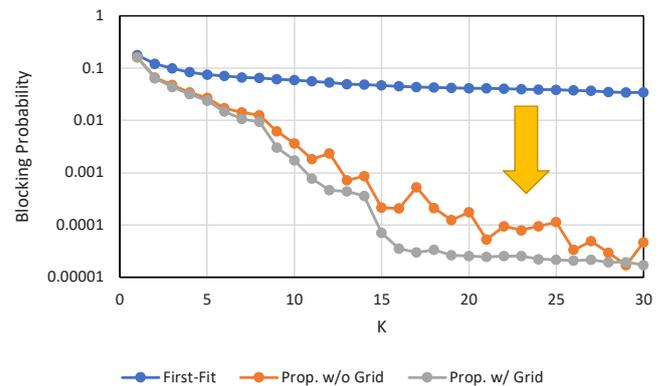


図6 異なる候補経路数  $K$  における提案方式の棄却率改善効果の評価

では不十分であり、候補経路数を大幅に増加させても改善度合いは限られる。一方で、提案方式では、候補経路数が9を超えると棄却率の改善効果が増していることが確認できる。これは、学習により、多くの候補経路全体の中で他の設定済み光パスからの影響を受けにくい経路・周波数スロットが選択されやすくなり、間接的に光ネットワークの全域に渡った負荷分散が行われるためであると考えられる。なお、グリッド制約無しの提案方式は、棄却率の結果の変動が他の方式と比べて大きく見られる。これは、グリッド制約無しの場合、候補経路数が増えてくると学習による使用周波数資源の棲み分けが十分に行われていないためである。一方で、グリッド制約を設けることで、候補経路数の増加による行動空間の増大の影響を周波数スロット軸側の解空間圧縮効果で抑えることができる。このことから、光周波数資源割当で取り得ることが可能な行動空間をすべて考慮する学習を行うよりも、これまでの研究において得られた知見を生かした行動空間の限定による学習器の小規模化も効果的であることを明らかにした。

## 5 まとめ

多種多様な通信要求を有する将来のネットワークサービスを実現するためには、光ネットワークは通信

容量の大容量化のみならず、時々刻々と変化するトラフィック需要に対して動的な光パスの設定・解放が可能な光ネットワークの再構成技術が必要不可欠である。本稿では、上記目的に対し、(1) Cバンド全体での利得スペクトルを平滑化する3段型 BM-EDFA、(2) プログラマブル光ネットワークに向けた BM-EDFA とホワイトボックス型光伝送装置を含むマルチドメイン光ネットワーク制御の実証実験、(3) 多数光周波数チャネル割当制御技術をそれぞれ紹介した。今後、これらの技術を更に深化させるとともに、実フィールドでの実証実験などを実施していく予定である。

### 【参考文献】

- 1 G. Rademacher, M.V.D. Hout, R.S. Luis, B.J. Puttnam, G.D. Sciallo, T. Hayashi, A. Inoue, T. Nagashima, S. Gross, A. Ross-Adams, M.J. Withford, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "Randomly coupled 19-core multi-core fiber with standard cladding diameter," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th4A.4, March 2023.
- 2 M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," IEEE Commun. Mag., vol.47, no.11, pp.66-73, Nov. 2009.
- 3 M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," IEEE Commun. Mag., vol.48, no.8, pp.138-145, Aug. 2010.
- 4 D.C. Kilper and Y. Li, "Optical physical layer SDN: Enabling physical layer programmability through open control systems," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), W1H.3, March 2017.
- 5 A. Mayoral, R. Vilalta, R. Casellas, R. Martínez, and R. Muñoz, "Multi-tenant 5G network slicing architecture with dynamic deployment of virtualized tenant management and orchestration (MANO) instances," Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), W1.F.1, Sept. 2016.
- 6 A. Aguado, S. Peng, M.V. Alvarez, V. Lopez, T. Szyrkowicz, A. Autenrieth, R. Vilalta, R. Muñoz, R. Casellas, R. Martínez, N. Yoshikane, T. Tsuritani, R. Nejabat, and D. Simeonidou, "Dynamic virtual network reconfiguration over SDN orchestrated multitechnology optical transport domains," IEEE/Optica J. of Lightw. Technology, vol.34, no.8, pp.1933-1938, Jan. 2016.
- 7 M.R. Raza, A. Rostami, L. Wosinska, and P. Monti, "A slice admission policy based on Big Data analytics for multi-tenant 5G networks," IEEE/Optica J. of Lightw. Technology, vol.37, no.7, pp.1690-1697, April 2019.
- 8 R. Muñoz, N. Yoshikane, R. Casellas, J.M. Fàbrega, R. Vilalta, M.S. Moreolo, L. Nadal, R. Martínez, D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, and I. Morita, "SDN-enabled sliceable multi-dimensional (spectral and spatial) transceiver controlled with YANG/NETCONF," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), M2A.5 March 2018.
- 9 M. Shiraiwa, Y. Awaji, H. Furukawa, S. Shinada, B. J. Puttnam, and N. Wada, "Performance evaluation of a burst-mode EDFA in an optical packet and circuit integrated network," Optica Optics Express (OE), vol.21, no.26, pp.32589-32598, 2013.
- 10 M. Shiraiwa, H. Furukawa, T. Miyazawa, Y. Awaji, and N. Wada, "High-speed wavelength resource reconfiguration system concurrently establishing/removing multiwavelength signals," IEEE Photonics Journal, vol.8, no.2, pp.1-7, April 2016.
- 11 Y. Hirota, M. Shiraiwa, H. Furukawa, H. Harai, and N. Wada, "Demonstrating network-scale gain transient impact of multiple series EDFAs in link failure cases," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Tu3E.5, March 2018.
- 12 Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Mitigation of transient response of Erbium-doped fiber amplifier for burst traffic of high speed optical packets," Proc. the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), JTuA133, May 2007.
- 13 R. Vilalta, J. L. de la Cruz, A. M. López-de-Lerma, V. López, R. Martínez, R. Casellas, and R. Muñoz, "uABNO: A cloud-native architecture for optical SDN controllers," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), T3J.4, March 2020.
- 14 L. Gifre, C. Natalino, S. Gonzalez-Diaz, F. Soldatos, S. Barguil, C. Aslanoglou, F.J. Moreno-Muro, A.N.Q. Cornelio, L. Cepeda, R. Martínez, C. Manso, V. Apostolopoulos, S. P. Valiviita, O.G. de Dios, J. Rodriguez, R. Casellas, P. Monti, G. P. Katsikas, R. Muñoz, and R. Vilalta, "Demonstration of zero-touch device and L3-VPN service management using the TeraFlow cloud-native SDN controller," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), M3Z.15, March 2022.
- 15 C. Manso, R. Vilalta, R. Muñoz, R. Casellas, and R. Martínez, "Scalable for cloud-native transport SDN controller using GNPpy and machine learning techniques for QoT estimation," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), M1B.5, March 2021.
- 16 W. Zheng, X. Gui, X. Lei, C. Xie, Y. Zhang, and X. You, "SONiC-based network operating system for open whitebox optical transport equipment," Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), Tu5.61, Sept. 2022.
- 17 Q. Pham Van, H. Tran-Quang, D. Verchere, P. Layec, H.-T. Thieu and D. Zeglache, "Demonstration of container-based microservices SDN control platform for open optical networks," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), M3Z.5, March 2019.
- 18 C. Natalino, C. Manso, L. Gifre, R. Muñoz, R. Vilalta, M. Furdek, and P. Monti, "Microservice-based unsupervised anomaly detection loop for optical networks," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th3D.4, March 2022.
- 19 X. Chen, J. Guo, Z. Zhu, R. Proietti, A. Castro, and S.J.B. Yoo, "Deep-RMSA: A Deep-Reinforcement-learning routing, modulation and Spectrum Assignment Agent for Elastic Optical Networks," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), W4F.2, March 2018.
- 20 R. Shiraki, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato, "Dynamically controlled flexible-grid networks based on semi-flexible spectrum assignment and network-state-value evaluation," Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), M1B.4, March 2020.
- 21 Y. Xiong, Y. Yang, Y. Ye, and G. N. Rouskas, "A machine learning approach to mitigating fragmentation and crosstalk in space division multiplexing elastic optical networks," Elsevier Optical Fiber Technology (OFT), vol.50, pp.99-107, July 2019.
- 22 Q. Yao, H. Yang, R. Zhu, A. Yu, W. Bai, Y. Tan, J. Zhang, and H. Xiao, "Core, mode, and spectrum assignment based on machine learning in space division multiplexing elastic optical networks," IEEE Access, March 2018.



廣田 悠介 (ひろた ゆうすけ)

ネットワーク研究所  
 フォトニック ICT 研究センター  
 フォトニックネットワーク研究室  
 主任研究員  
 Ph.D.  
 光ネットワーク制御、ネットワーク管理



後藤 優太 (ごとう ゆうた)

ネットワーク研究所  
 フォトニック ICT 研究センター  
 フォトニックネットワーク研究室  
 研究員  
 Ph.D.  
 光情報処理、光伝送システム