

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82636
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2017～2019
課題番号：17H04680
研究課題名（和文）多次元多重全光ネットワークの周波数資源極限利用に向けた資源割当法に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Highly Efficient Spectrum Resource Assignment for All Optical Networks based on Multidimensional Multiplexing Technologies

研究代表者
廣田 悠介（Hirota, Yusuke）
国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員

研究者番号：20533136
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,160,000円

研究成果の概要（和文）：複数の多重技術を組み合わせた全光ネットワークは、多種多様な通信要求を収容する将来のネットワークとして期待されている一方で、デバイス技術に関する研究開発が中心であり、ネットワーク制御に関しては研究課題が多く残されている。本研究では、ネットワークの大域的な需要変動に対応可能な機械学習型周波数資源割当手法を含むシステムアーキテクチャを提案した。ヒューリスティック手法並びに遺伝的アルゴリズムを用いた周波数資源割当手法も合わせて開発を進めた結果、資源競合を避ける学習機構により、光パスの呼損確率を大幅に改善可能であることをシミュレーション評価により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
空間分割多重技術として光デバイスや通信実験は近年活発に行われているのに対し、それらを活用したネットワーク全体での制御に関する研究開発は限られたものになっている。本研究は、従来の数十倍以上の光パスを収容する全光ネットワークのための周波数資源割当を中心課題としたものであり、将来の社会に必須であるフレキシブル全光ネットワークの要素技術を確立した。機械学習の通信ネットワークへの応用という側面もあり、本学術領域の活性化の一助となる。

研究成果の概要（英文）：All-optical networks based on various multiplex technologies are expected as future networks that accommodate a wide variety of communication requirements. Many studies focus on the research and development on device technologies. Research issues regarding networking, control and management remain. This study proposed a system architecture including a machine learning type spectrum resource assignment method that can respond to demand fluctuations of networks. This study also developed a heuristic based spectrum assignment method and a spectrum assignment method using a genetic algorithm. It was clarified by simulation evaluation that the optical path blocking probability can be significantly improved by the learning mechanism that avoids spectrum resource competition.

研究分野：光ネットワーク

キーワード：光ネットワーク 全光 ルーティング 周波数割当 空間分割多重 エラスティック光ネットワーク
機械学習

1. 研究開始当初の背景

5G、ビッグデータ、4K8K 高精細映像・自由視点映像などの大量の通信トラフィックを必要とするサービスに備えてネットワークの大幅な伝送容量増加が求められており、ペタビットに留まらず、エクサビット更にはゼタビットのデータを処理・保存し利活用するためのネットワーク基盤技術の開発は必要不可欠であるといえる。周波数資源を柔軟に利用するエラスティック光ネットワーク[1]は、通信容量及び伝送距離に応じた変調方式を適応的に使用し帯域可変トランスポンダを用いて周波数資源を柔軟に利用するものであり、注目を集めている。一方で、光通信技術の発展により、シングルコアファイバを用いた伝送効率がシャノン限界にせまりつつある中、次なる多重方式として、マルチコアやマルチモードといった空間分割多重化技術が注目され、光通信分野のフラッグシップ国際会議である OFC や ECOC でも発表されてきている。空間分割多重によって本課題申請時より前の時点で既にファイバ1本で 2.15Pbps の伝送実験が報告されている[2]が、ノード間の通信容量拡大だけでは将来的には不十分であり、ネットワークの観点からの効率的な制御技術の確立が重要課題である。

2. 研究の目的

本研究では、空間分割多重技術などの物理層、光通信デバイスの発展に対応可能なネットワークシステム制御について多面的に検討を行い、光ファイバのコア・モード・周波数・時間などの様々な次元で伝送チャネルの多重化が行われる多次元多重型全光スイッチングのためのネットワーク制御システムアーキテクチャの基本設計を行い、その有効性を明らかにすることで、ネットワークの観点から将来の光ネットワークに必要とされる要素技術の確立を目的とする。具体的には、多次元多重型エラスティック光ネットワークにおける周波数資源の極限利用に向けて、統計多重効果を高め、トラフィックの時間・空間的局所偏在性に対応する動的周波数資源割当アルゴリズムを開発し、需要の変化に柔軟に対応可能な制御技術の確立を目指す。周波数資源割当アルゴリズムの開発にあたり、従来取り組んできたヒューリスティックアプローチに基づいて方式改良を行うとともに、新たに GPU を用いた並列計算による割当解の探索、メタヒューリスティック手法や機械学習を用いた方式についても検討を行い、多次元多重型エラスティック光ネットワークに適したアルゴリズムを探索する。更に、大規模な光ネットワークにおいても対応可能な周波数資源管理法や資源割当手法を検討・改良し、その有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

これまでに、波長軸でのチャネル多重を行う光波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)型全光ネットワークや、伝送距離・通信容量に応じて適応的に周波数資源を割り当てるエラスティック光ネットワーク(Elastic Optical Network: EON)を対象として経路選択及び周波数割当手法を確立してきた。また、空間分割多重(Spatial Division Multiplexing: SDM)技術の一つであるマルチコアファイバを具備した全光ネットワークを対象として、コア間クロストーク抑制のためのヒューリスティック型周波数資源割当手法を提案してきている。本研究では、これらの研究成果に基づき、多次元多重型全光ネットワークのための(メタ)ヒューリスティック手法を検討するとともに、新たに機械学習技術を SDM 型全光ネットワークの資源割当・ネットワーク制御に適応することを検討する。ヒューリスティックと機械学習の二方面からのアプローチにより、多次元多重型全光ネットワークに適した高効率な周波数資源割当アルゴリズムを開発する。また、多数の光パスを適切に管理し、開発したルーティングを含む周波数資源割当アルゴリズムを用いたネットワーク制御、及び新規光パス設定・解放のための中継スイッチングノードを含むノード設定のためのシグナリングを考慮したシステムアーキテクチャの設計を行う。より具体的には、ヒューリスティックに基づく資源割当手法の改良、及び遺伝的アルゴリズムを用いた資源割当手法を開発し、評価を実施する。遺伝的アルゴリズムに関しては評価値により性能が大きく変化することが想定されることから、モンテカルロ法による大規模シミュレーションを組み込んだ評価を実施する。また、周波数資源割当手法に限らず Q 学習や深層学習を用いた関連研究を調査し、様々な機械学習の中から資源割当に適したアルゴリズムの選択、並びにトラフィック需要の変動に対応可能な学習機構を組み込んだシステムアーキテクチャの設計を行い、提案方式の有効性などに関して計算機シミュレーションによりその性能を評価する。

4. 研究成果

本課題で得られた成果として、まずこれまで性能評価に使用していた空間分割多重型エラスティック光ネットワークをより大規模な環境・シナリオでも評価可能となるように改良を行った。ヒューリスティックアプローチによる分散型資源割当方式として、各リンクで利用可能な空間チャネル数を周波数スロット毎に管理しておき、各デマンドに対する資源割当の際にシグナリングにより利用可能空間チャネル数を収集する周波数資源割当アルゴリズムを開発・評価し、当

該光パス設定により分散環境においても他の光パスが資源競合により棄却される可能性を低減する可能であることを確認した。

続いて、複数の空間チャンネルをまとめて利用することにより中継ノードで空間チャンネルを一括して交換処理することが可能な空間スーパーチャンネル技術に着目し、空間スーパーチャンネル光パケット伝送トラフィック特性を考慮した新たな空間チャンネルスライシング手法を提案した。本方式では、線形計画法を用いて要求デマンドサイズ別の需要と利用可能な空間チャンネル数・トポロジなどを入力としてパケットロス率を低減可能な空間スーパーチャンネル数を算出する。空間スーパーチャンネルパケット伝送実験で用いたパケットサイズなどの情報に基づいてパラメータを設定したシミュレーションにより、提案方式の有効性を確認した。

次に、遺伝的アルゴリズムを用いた周波数資源割手法を検討し、事前設計フェーズによる大域的な資源割当設計と個別割当フェーズによる局所的な動的資源割当を行う方式を提案した。事前設計フェーズでは、個別割当フェーズで用いる優先利用周波数帯域について、ネットワーク全体での棄却率改善を目的としてマクロな視点での設計を行う。具体的に本提案方式で用いた遺伝的アルゴリズムでは、送受信端末ごとに優先利用する周波数帯域（探索開始周波数スロット）を表現したものを個体（図1）とし、伝送経路が重複するもの同士が周波数軸上で離れた位置に設定されるようにネットワーク全体の棄却率が低くなる個体を交叉・突然変異の操作により更新していき、解の探索を行った。各個体の評価値算出に関して、周波数利用率や経路重複度などの複数の指標の検討を行った結果、最終的にモンテカルロシミュレーションにより棄却率を求め、棄却率に基づいて性能の良い解を表現する個体を選別する方式を採用した。本シミュレーション評価では、12ノード34リンクからなるJPN12トポロジ[3]を採用し、最短固定経路選択を行った場合の提案方式とFirst-Fit方式の棄却率を比較評価した。評価結果を図2に示す。最短固定経路選択の場合、ネットワーク全体での負荷分散の効果は得られない。そのため、負荷が高い領域において提案方式はボトルネックリンク及びその周辺における資源競合を低減する効果により棄却率を改善可能であることを確認した。一方で負荷が低い領域では、評価値として算出する棄却率も小さな値となり誤差が大きくなるため個体間の優劣を正確に区別することが困難となり、First-Fit方式より高い棄却率となることを示した。

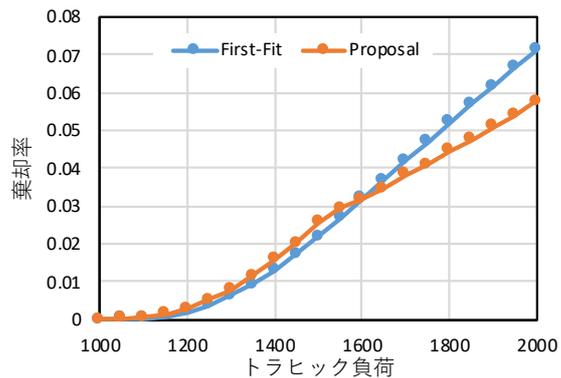


図 1: 提案方式における優先利用周波数帯域を用いた個体表現 図 2: 提案方式と FF 方式の棄却率の評価

続いて、大域的な負荷分散に注目し、経路選択に遺伝的アルゴリズムを適用するルーティング制御手法を提案した。本提案方式では、上述の遺伝的アルゴリズムを用いた優先利用周波数帯域設定と同様のフレームワークを用いている。事前に距離の短い順に K 個の最短路を候補経路として算出しておき、送受信ノードペアごとに個別割当フェーズにおいて各候補経路選択する確率を遺伝子表現として採用した。候補経路数 K=3 とした場合の評価結果の一例として、遺伝的アルゴリズムにおける突然変異確率を変えた場合の棄却光パス数及びその収束速度を評価した結果を図3に示す。この結果より突然変異しない場合が最も早く収束する一方で、十分に長い世代交代により解の探索が可能な場合は、突然変異確率 0.1 が最も棄却パス数を低減できることが確認できた。優先利用周波数帯域設定と本経路選択方式を組み合わせた場合の評価などを実施したが、空間チャンネルを考慮しない場合においても NP 困難に属する資源割当問題が、空間軸波長軸でのチャンネル数増加に伴い非常に大きな解空間となるために、遺伝的アルゴリズムでは大幅な性能改善が可能な解を効率良く探索することが困難であるとの結論に至った。

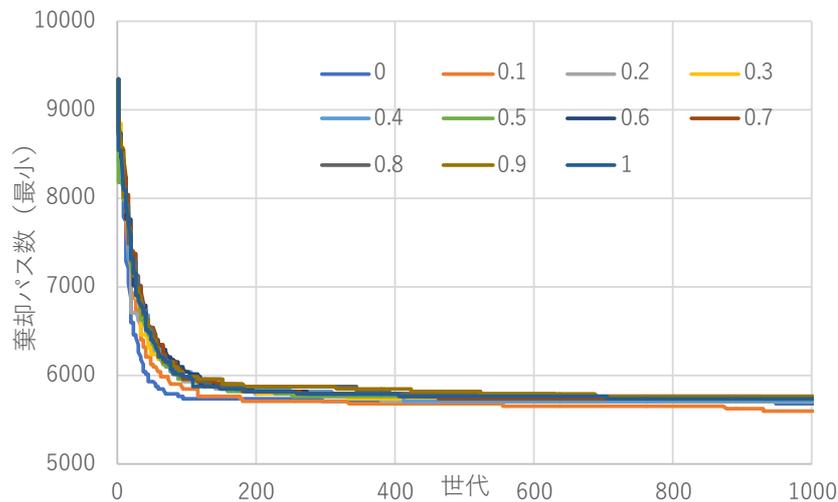


図 3: 突然変異割合を変えた場合の各世代における棄却パス数の最小値

最後に、機械学習応用の可能性を検討し、ネットワーク全体で利用される周波数資源の負荷分散を実現する強化学習を用いた経路選択及び周波数資源割当方式を提案した。本方式では、分散環境においても適用可能なように、ネットワーク全体の周波数資源利用状況を用いるのではなく、送受信ノードペア毎に光パス設定状況を管理しておき、その情報に基づいて伝送経路及び割当周波数スロットを学習器により選択する。選択した行動に基づき、シグナリングにより各ノードのポート切替などを行うとともに、選択された当該行動が適切でない場合は即時フィードバックすることでオンラインに学習器の更新を行う。更に、本提案方式 (Flexible Grid 方式) を改良し、エラスティック光ネットワークにおける周波数フラグメンテーションの抑制を考慮するための制限を加えた方式 (Virtual Grid 方式) の提案も行い、その有効性を評価した。評価結果の一部を図 4 及び図 5 に示す。図 4 より、強化学習を用いた提案方式は時間経過とともに棄却率が改善されていくこと、並びに比較対象である First-Fit 方式に比べて 1/100 以下の棄却率が達成できることを確認した。図 5 より、ネットワーク全体での資源利用率は提案方式では 5% ほど改善していることから負荷分散により従来方式では十分に利用されていなかった資源を有効活用できていることを確認した。また、Virtual Grid 方式では、あるいは小さい周波数スロットに断片かされることにより利用不可な資源が多く発生することを抑制する効果のために、ネットワーク全体での利用率は Flexible Grid 方式と平均的に変わらないものの棄却率が更に改善可能であることを明らかにした。周波数資源割当問題に対して機械学習を応用する研究は国内外でも行われているが、それらは中央集権制御型のエラスティック光ネットワークを対象としたものが多い一方で、本提案方式は分散環境においても適用可能であり、より大規模なネットワークにおいて優位となる可能性がある。

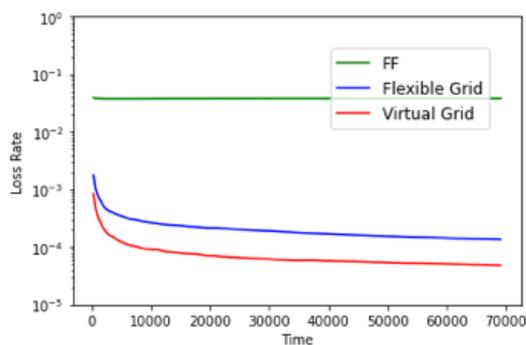


図 4: 強化学習型提案方式の棄却率

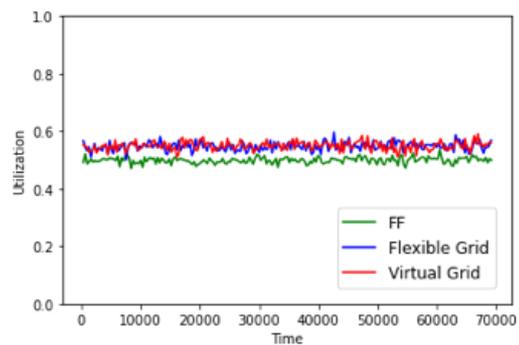


図 5: ネットワーク全体での資源利用率

参考文献:

- [1] M. Jinno et al., "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.
- [2] B.J. Puttnam et al., "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single mode multi-core fiber and wideband optical comb," ECOC, PDP.3.1, Sep. 2015.
- [3] JPN Model, <http://www.ieice.org/cs/pn/jpn/jpnm.html>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 廣田 悠介, 古川 英昭
2. 発表標題 エラスティック光ネットワークにおける遺伝的アルゴリズムを用いた周波数割当設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Hirota and Hideaki Furukawa
2. 発表標題 TDM based Spatial/Spectrum Super Channel Optical Packet Switching System with Ultra-High-speed Switches
3. 学会等名 International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies (ISUPT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Hirota, Ruben S. Luis, Hideaki Furukawa, Naoya Wada
2. 発表標題 Multi-granular optical networks based on SDM technologies
3. 学会等名 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 エラスティック光ネットワークにおける機械学習を用いた周波数割当に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 空間分割多重型エラスティック光ネットワークと日本版フォトニックネットワークモデルに関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣田 悠介, 古川 英昭
2. 発表標題 空間分割多重型光パケットネットワークにおける空間チャネルスライシングに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 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周波数資源優先割当手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 機械学習を用いた光ネットワーク収容設計
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 光ネットワークにおける機械学習応用
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 エラスティック光ネットワークにおける周波数資源割当問題と機械学習によるアプローチ
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Hirota
2. 発表標題 SDM-oriented Networking System with fractional pSSC concept for future optical networks
3. 学会等名 Photonics in Switching and Computing (PSC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Hirota, Hideaki Furukawa, Hiroaki Harai, and Naoya Wada
2. 発表標題 A Fractionally Spatial Super-channel Switching System Design with Spatial Channel Slicing
3. 学会等名 IEEE Globecom (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣田 悠介
2. 発表標題 フレキシブルな光ネットワークアーキテクチャとネットワーク技術
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------