

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00116

研究課題名(和文) 波長スペクトル分断を抑制する弾力性のある光ネットワーク制御技術

研究課題名(英文) Network control scheme to suppress spectrum fragmentation in elastic optical networks

研究代表者

大木 英司 (Oki, Eiji)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：70524156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サブキャリアスロット分割方式を提案する。このサブキャリアスロット分割方式は、多くの整列・連続したサブキャリアスロットを生成し、帯域ブロッキングを低減する。従来方式と比べ、帯域ブロッキングを低減することを定量的に示した。さらに、発着ノード間の複数の独立経路にかかるスペクトルスロットの使用量を最小化する経路選択方式を提案する。この経路選択方式方式では、経路長からスペクトルスロットの使用量を求める際に、非線形なテーブルを参照する部分を線形化することにより、この最適化問題を整数線形計画問題に定式化する。本方式は、従来方式と比較して、スペクトルスロットの使用量の削減効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したこのサブキャリアスロット分割方式は、多くの整列・連続したサブキャリアスロットを生成し、帯域ブロッキングを低減する。エラスティックネットワークでは、光パスの経路長に応じた変調方式を使用することができる。また、提案した独立経路選択方式では、光パス設定時に、経路長とスペクトルスロットの使用量の非線形な関係を示すテーブルを参照してからスペクトルスロットの使用量を決定するため、独立経路の合計経路長を最小化することでスペクトルスロットの使用量を最小化するとは限らない。本研究では、この問題点を明らかにし、数理最適化のアプローチを用いて、解決した。

研究成果の概要(英文)：We propose a subcarrier-slot partition scheme with first-last fit spectrum allocation for elastic optical networks to increase the number of contiguous aligned available slots, and hence the blocking probability in the network is reduced. Then, we propose a disjoint path selection scheme to minimize the required number of spectrum slots in elastic optical networks. Conventional selection schemes minimize the total path length between a pair of source and destination, or the total number of hops, for the disjoint paths. The conventional schemes do not guarantee to minimize the required number of spectrum slots used for disjoint paths. The optimization problem defined in the proposed scheme is formulated as an integer linear programming problem. We observe the effectiveness of the proposed scheme in terms of the number of required spectrum slots.

研究分野：通信ネットワーク

キーワード：エラスティック光ネットワーク スペクトルスロット 変調方式 独立経路選択問題

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光通信ネットワークは、波長スペクトル資源を有効に利用してサービスを提供することが求められている。波長グリッドを固定的に利用する WDM (Wavelength division multiplexing) ネットワークでは、異なる帯域を要求する光パスが混在した場合、波長スペクトル資源を有効的に利用できない。このような場合でも波長スペクトル資源を有効利用するために、直交周波数分割多重方式 (OFDM : Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を利用した弾力性のあるエラスティック光ネットワーク (EON : Elastic Optical Network) の研究開発が進められている。

EON では、光パスの要求帯域に応じて適切な数の連続したサブキャリアスロット (スロットブロックと呼ぶ) を割り当てる。スロットブロックサイズには弾力性があるが、動的な光パスの設定および解除がフラグメンテーション (波長スペクトルの分断) を引き起こす可能性がある。フラグメンテーションは、使用可能なスロット (空スロット) が光パスの経路に沿って整列されていない (未整列) 状態、または、空スロットが光スペクトル領域において連続していない (非連続) 状態のことを意味する。

これまで、フラグメンテーションの問題を解決するために、通信中の光パスの経路の変更により、整列性・連続性を改善する方式が検討されてきた。しかし、経路を変更する場合は、通信が瞬断する問題が生じる。経路変更により通信が瞬断することなく、空スロットの未整列及び非連続となることを回避し、フラグメンテーションの発生を抑制するアプローチが必要であった。

研究代表者は、先駆的に本アプローチを提唱し、サブキャリアスロットを分割することによりスペクトル割り当てる方式を提案した。提案技術では、サブキャリアスロットを複数のパーティションに分割し、スペクトルは光パスで使用されるリンクに関連づけられているパーティションに割り当てられる。リンクを共有しない経路の独立な光パス群は、同じパーティションに割り当てられる。一方、経路が独立でない光パス群は異なるパーティションに割り当てられる。

図 1 に光パス設定例と、図 2 に従来技術と提案技術の違いのイメージを示した。図 2 では、縦方向が光パスの使用リンクを示し、横方向が波長スペクトルスロットを示す。例えば、図 1 において、光パス 1 (3 スロットを要求) はリンク 1 とリンク 2 を使用するので、両リンクで連続して空いている 3 スロットを利用する (図 2(a))。同じスペクトル割当方式 (スロット番号の小さい順から割り当てる first fit 割当方式) の条件下で、スロット分割が無い従来技術における整列化・連続化した空スロットブロック (図 2(a)) と比べて、スロット分割を導入した提案技術における整列化・連続化した空スロットブロック (図 1(b)) が大きくなる。図 1(b) では、光パス 1 と光パス 2 はリンク 2 を共有しているので、別のパーティションに収容される。光パス 2 と光パス 3 は共有リンクがないので、同一のパーティションに収容される。このように、パーティション毎に収容される光パスの経路を考慮してグループ化されているため、動的な光パスの設定および解除が行われている場合でも、フラグメンテーションの発生が抑制される。

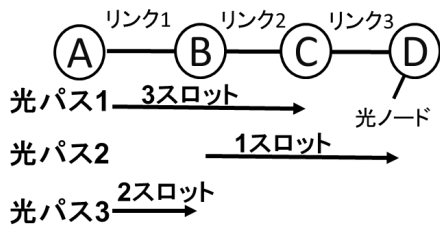


図1 光パス設定例

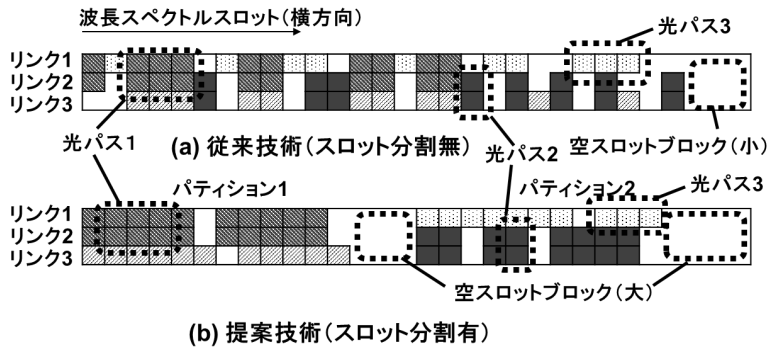


図2 従来技術と提案技術

2. 研究の目的

サブキャリアスロット分割によるブロッキング率の低減に関して、提案技術の先進性・有効性は認知されたが、次の解決すべき3つの課題が残されている。

(1) 光パス経路が与えられ、トラヒック需要の条件から必要最小限のパーティション数を求めたとしても、サブキャリアスロットの分割数が大きくなり、分割損によりブロッキング率が悪化する場合がある。

(2) サブキャリアスロットを分割しない従来技術では、first fit スペクトル割当方式が適していると考えられているが、提案技術に適したスペクトル割当方式を検討する必要がある。

(3) 不確かなトラヒック需要の変動に対応するために、動的にパーティションを変更する必要がある。

3. 研究の方法

(1) サブキャリアスロットの分割・経路方式

ネットワークポロジ、トラヒック需要を入力条件として、光パスのパーティション収容の制約条件もとで、ブロッキング率が低減されるように、光パスの経路とスロット分割を同時に決定する。

光パスのパーティション収容条件として、リンクを共有しない経路の独立な光パス群は、同じパーティションに割り当てられ、経路が独立でない光パス群は異なるパーティションに割り当てる、とする方針を原則とし、適切な経路選択が行われるような数理モデルを構築する。しかし、サブキャリアスロットの分割数が大きくなると、分割損によりブロッキング率が悪化する場合があるので、光パスのパーティション収容条件を緩和することにより、サブキャリアスロットの分割数が大きくなるようにする数理モデル、及び、アルゴリズムを開発する。

(2) スペクトル割当方式

サブキャリアスロット分割化を導入しない場合、一般に、スペクトル割当方式として、**first fit** 割当方式が適している。しかし、スロット分割化を導入した場合には、図 4 に示すように、スペクトル割当方式による空スロットブロックの違いがあることが、応募者のこれまでの研究でわかってきた。図 4(a)は、パーティション毎にスロット番号の小さい順から割り当てる **first fit** 割当方式、図 4(b)は、奇数番号のパーティションはスロット番号の小さい順から割り当て、偶数番号のパーティションはスロット番号の小さい順から割り当てる **first-last fit** 割当方式、をそれぞれ示している。

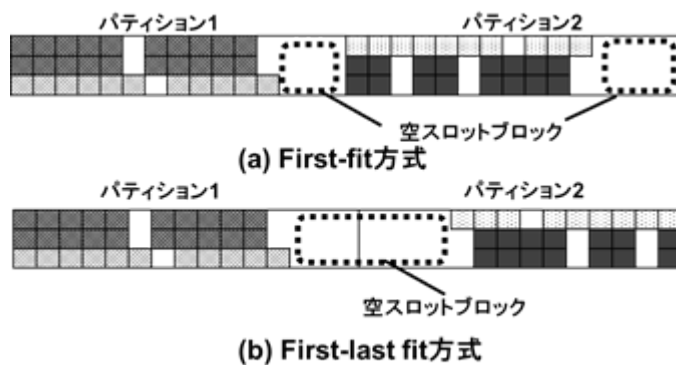


図4 スペクトル割当方式による空スロットブロックの違い

4. 研究成果

4.1 サブキャリアスロットの分割・経路方式、及び、スペクトル割当方式

2つの方式、サブキャリアスロット分割方式と **first-fit-exact fit** 割り当てポリシーを提案した。1つ目の方式は、1つの同一のリンクを共有していないコネクションは同じパーティションに割り当てられて、同一のリンクを使用するコネクションは別のパーティションに割り当てられる。また、奇数インデックスのパーティションは **first fit** 波長割り当てポリシーを採用して、偶数インデックスのパーティションは **last fit** 波長割り当てポリシーを採用する。2つ目の方式は、1つの同一のリンクを共有していないコネクションは、**first-exact fit** 波長割り当てポリシーを採用して、同一のリンクを資料するコネクションは **last-exact fit** 波長割り当てポリシーを採用した。提案方式は、より多くの整列・連続したサブキャリアスロットを生成し、帯域ブロッキングを低減する。シミュレーション結果により従来方式と比べ、帯域ブロッキングを低減することを定量的に示した。

4.2 トラフィック収容性を向上させるための無瞬断デフラグメンテーション

1重化のみの光パスを設定するエラスティック光ネットワークを想定し、無瞬断デフラグメンテーションのための経路分割方式を提案した。提案方式では、スペクトルのリチューニングのためにスペクトルを移動する際に、可能な限り他の光パスとの衝突を回避できるように、異なるスペクトル割当ポリシーに応じた経路群を分割する。スペクトル割当ポリシーとして、ファースト・ラストフィット割当ポリシーを採用する。ファースト・ラストフィット割当ポリシーでは、1つの経路群に対しては、ファーストフィット、他方の経路群に対しては、ラストフィットを用いる。異なる分割に割り当てられる光パスは他の光パスを妨げることはない。したがって、経路分割はリチューニングの際に光パス間の干渉を回避することができる。経路分割問題は全体の干渉を最小化するよ

うに経路を分割する問題であり、これを整数線形計画問題として定式化した。定義された経路分割問題は、NP 完全であることを証明した。

経路分割問題は全体の干渉を低減する発見的手法を導入する。発見的手法として、最小カットを用いた負荷分散経路選択アルゴリズムについて述べる。性能評価により、提案方式は従来方式よりも、光パスのブロッキング率を低減させ、全体の許容トラヒック量を増加させることを示した。

1+1 プロテクションにより 2 重化された光パスを設定するエラスティック光ネットワークを想定し、現用パスと予備パスを切り替えながら無瞬断デフラグメンテーションを実行する方式を提案する。従来のデフラグメンテーション方式は、現用パスと予備パスが予め固定されている。従来方式では、現用パスによるフラグメンテーションを引き起こし、無瞬断デフラグメンテーションの実行を妨げる。提案方式では、1+1 プロテクションにおける現用パスと予備パスを同時に切り替える。これにより両方の光パスのスペクトルの再割り当てを許容し、予備パスが機能している間も無瞬断デフラグメンテーションを行うことができる。現用パスと予備パスを同時に切り替える無瞬断デフラグメンテーション問題は、現状の光パスのスペクトルが割り当てられたとき、パスの切り替えと再割り当て操作の回数を制限しつつ、スペクトルフラグメンテーションを最小化するスペクトルを再割り当てする問題であり、これを整数線形計画問題として定式化する。定義した静的なスペクトル再割り当て問題は、NP 完全であることを証明した。

1+1 プロテクションにより 2 重化された光パスを設定するネットワークにおいて、動的なスペクトル再割り当てを行うために、スペクトルフラグメンテーションを再割り当てする発見的手法を導入した。性能評価により、提案方式は従来方式よりも、光パスのブロッキング率を低減させ、全体の許容トラヒック量を増加させることを示した。

4. 3 変調方式を考慮した独立経路選択方式

光パスを設定する際には変調が伴う。変調とは、伝送する情報をスペクトルに乗せる操作のことである。エラスティック光ネットワークでは、ユーザの要求する帯域や光パスの経路長に応じて、変調方式を適切に選択することができる。

変調はスペクトルの振幅、周波数、位相のいずれかのパラメータを変化させることで行われるが、変調方式によってスペクトルスロットの使用量や情報を伝送できる距離が異なる。そのためエラスティック光ネットワークで光パスを設定する際には、経路長を求めた後、各変調方式の伝送できる距離から、適切な変調方式を選択してから、その変調方式に応じた使用スロット数を割り当てる。

経路長と使用するスペクトルスロットの数は非線形な関係にある。なぜなら、経路長が異なっていたとしても、情報を伝送できる距離の範囲内であれば、同じ変調方式を用いる可能性があり、使用するスペクトルスロットの数は変調方式によって決まるからである。

光パス経路の冗長化を図るためには、同じリンクを共有しない 2 つの独立経路を用意しなければならない。このようなネットワーク冗長化技術に 1+1 path protection が挙げられる。1+1 path protection によって、通信で使われているリンクが故障したとしても、そのリンクを使用していないもう一つの経路に即座に切り替えることで通信を中断することなく続行することが可能である。

従来の独立経路選択方式として、発着ノード間の複数の独立経路の合計距離が最小とな

る経路選択方式がある。この経路選択方式では、経路長と使用するスペクトルスロットの数が非線形な関係であるという理由により、複数の独立経路で使用する合計のスペクトルスロット数が必ずしも最小化されるとは限らない。合計使用スペクトルスロット数を最小化する独立経路選択方式は、これまで示されていない。

エラスティック光ネットワークにおいて、合計使用スペクトルスロット数を最小化する独立経路選択方式を提案する。提案方式で用いる独立経路選択問題を最適化問題として定式化する。経路長からスペクトルスロットの使用量を求める際に、非線形なテーブルを参照する部分を、線形化して表現することにより、この最適化問題を、整数線形計画問題に定式化する。性能評価により、提案方式は、従来方式と比較して、スペクトルスロットの使用量を削減することを示す。本論文では、独立経路をリンク独立経路として扱う。リンク独立経路は、異なる経路が同一のリンクを共有しない経路である。発着ノード以外の同一のノードを共有しないノード独立経路に対しても、提案方式を拡張することにより、適用できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 52 件)

1. Y. Kishi, N. Kitsuan, B. C. Chatterjee, H. Ito, and E. Oki, ``Modulation-Adaptive Link-Disjoint Path Selection Model for 1+1 Protected Elastic Optical Networks,`` IEEE Access, vol. 7, pp. 25422-25437, Mar. 2019.
2. S. Ba, B. C. Chatterjee, and E. Oki, ``Defragmentation Scheme Based on Exchanging Primary and Backup Paths in 1+1 Path Protected Elastic Optical Networks,`` IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 25, no. 3, pp. 1717-1731, Jun. 2017.
3. S. Ba, B. C. Chatterjee, S. Okamoto, N. Yamanaka, A. Fumagalli, and E. Oki, ``Route Partitioning Scheme for Elastic Optical Networks with Hitless Defragmentation,`` IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 8, no. 6, pp. 356-370, Jun. 2016.
4. B. C. Chatterjee, W. Fadini, and E. Oki, ``A Spectrum Allocation Scheme based on First-Last-Exact Fit Policy for Elastic Optical Networks,`` Journal of Network and Computer Applications, vol. 68, pp. 164-172, Jun. 2016.
5. W. Fadini, B. C. Chatterjee, and E. Oki, ``A Subcarrier-Slot Partition Scheme with First-Last Fit Spectrum Allocation for Elastic Optical Networks,`` Computer Networks, vol. 91, pp. 700-711, Nov. 2015.

[学会発表] (計 61 件)

1. E. Oki, ``Resource Allocation Model for Probabilistic Protection in Cloud Provider,`` International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2019, Feb. 2019. (Invited talk)
2. B. C. Chatterjee and E. Oki, ``Performance of Hitless Defragmentation Scheme in Quasi 1+1 Path Protected Elastic Optical Networks,`` International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2018), Jul. 2018. (Invited paper)
3. E. Oki and B. C. Chatterjee, ``Design and Control in Elastic Optical Networks: Issues, Challenges, and Research Directions,`` International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2017, Jan. 2017. (Invited paper)

[図書] (計 1 件)

1. B. C. Chatterjee, N. Sarma, P. P. Sahu, and E. Oki, Routing and Wavelength Assignment for WDM-based Optical Networks: Quality-of-Service and Fault Resilience, Springer, Cham, Oct. 2016.

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。