

エラスティック光ネットワークにおける アトラクター選択にもとづく仮想網制御手法の提案と評価

大場斗士彦[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{t-ohba,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし エラスティック光ネットワークは、従来の WDM ネットワークと比較して、光パスに割り当てる帯域幅（光スペクトル資源）の粒度が小さく、資源の利用効率が高いという利点がある。この利点を活かしつつ、今後も増大・変動することが予想される IP トラフィックをエラスティック光ネットワークに収容するためには、仮想網制御アプローチが必須である。しかし、どのような仮想網を構築すべきかを含めた仮想網制御手法の検討は十分になされてきていない。そこで本稿では、エラスティック光ネットワークにおける仮想網制御手法を提案する。提案手法では、生物が未知の環境変化に適応する振る舞いをモデル化した、アトラクター選択モデルを応用し、現在のトラフィックの収容効率と使用資源数の削減を両立する仮想網を構築する。また、取得した各光パスのリンク利用率をもとに、各光パスの帯域幅の調整を行う。計算機シミュレーションによる評価により、提案手法は、使用資源数を抑えつつ、現在のトラフィックを収容できる仮想網を構築できることを示した。

キーワード エラスティック光ネットワーク、仮想網制御、アトラクター選択

Noise-induced virtual network topology control for elastic optical networks

Toshihiko OHBA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka
565-0871. Japan

E-mail: †{t-ohba,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Elastic optical networks have higher spectrum efficiency than WDM networks. It is important to construct and reconfigure a virtual network topology (VNT) in order to accommodate changing IP traffic on an elastic optical network. However, research in methods of controlling a VNT over elastic optical networks is not sufficient. In this paper, we propose a method to reconfigure a VNT in order to maintain communication quality in IP networks and utilize network resources efficiently. Our method is based on a dynamical system, called attractor selection, that models behavior where living organisms adapt to unknown changes in their surrounding environments and recover their conditions. This method also adjust the bandwidth of all lightpaths that form a VNT for spectrum efficiency. Evaluation results show that our method can construct a VNT that accommodates current traffic demands using fewer network resources.

Key words Elastic Optical Network, VNT Control, Attractor Selection

1. はじめに

最近のインターネットでは、動画配信やクラウドコンピューティングなどの新たなサービスが急速に発展している。また、タブレットやスマートフォンといったインターネットを利用する様々なデバイスが次々に登場している。このような変化は、インターネットにおけるトラフィック量の増大やトラフィック需要

の多様化を引き起こしている。急増する帯域の要求を満たすため、多様なサービスを収容可能な光基盤ネットワークの研究がなされてきているが、エラスティック光ネットワークが将来の基盤ネットワークとして有望視されている [1-3]。

エラスティック光ネットワークは、従来の波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術を用いたネットワーク（以下、WDM ネットワーク）と比較して、光パ

スに割り当てられる帯域幅（光スペクトル資源）の粒度が小さいという特徴を持つ。トラフィック量やユーザーの要求に応じて光パスに細粒度の帯域幅を割り当てることにより、ネットワーク内の波長資源を有効活用することが可能である。細粒度の光スペクトル資源の割り当ては、光直交周波数分割多重（OOFDM: Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing）などの高度な変復調技術により実現され、要求帯域幅・距離に応じて光スペクトル資源割り当て・変調方式の選択がなされる。また、帯域・変調方式可変トランスポンダー（BVTs: Bandwidth-variable Transponders）と帯域可変波長クロスコネクタ（BV WXC: Bandwidth-variable Wavelength Cross-Connects）といったハードウェア技術を用いることにより、ユーザーの実トラフィック量に応じた柔軟な帯域幅（中間帯域幅）を持つ光パスも実現可能である。これらのハードウェア技術を前提としたエラスティック光ネットワークは、SLICE(Spectrum-sliced elastic optical path network) モデルとしてモデル化されている [2]。本モデルでは、エラスティック光ネットワークは図 1 下のように BV WXC と光ファイバーから構成され、IP ルーターなどのクライアントノードからの信号が BVT を介し、必要最小限の光スペクトル資源を用いて光信号に変換される。複数の BV WXC は光パスを設定し、割り当てられた帯域幅を使用する光信号をスイッチングする。BVT は、対地間光パスの帯域幅の使用率が上昇（減少）した場合に回線容量を増加（減少）させ、光パスが使用する帯域幅を拡大（縮小）することができる。状況に応じて光パスの帯域幅を調整し、使用資源数を削減することにより、OPEX や消費電力量を削減することが可能である。ただし、エラスティック光ネットワークの利点を活かすことで、時々刻々と変動するトラフィック量を光ネットワーク上に收容するためには、いかに光パスを設定し、波長資源をどれだけ割り当ててくるかを制御する技術が必須である。

ネットワークレベルの制御手法として、経路計算および光スペクトル資源割り当て（RSA: Routing and Spectrum Allocation）問題を解くアルゴリズムなどの研究が数多くなされている [4]。これらの研究では、光パス設定要求を受け付け、それに対して経路計算および光スペクトル資源割り当てを行うアプローチを取っている。しかし、トラフィック量が増大・変動する傾向は今後も継続すると予想される [5] ため、要求通り割り当てた帯域幅と実トラフィック量に差が生じることは不可避である。具体的には、割り当てられた帯域幅が増大・変動するトラフィック量を收容しきれない場合は通信品質が低下する。反対に、トラフィック量を上回る帯域幅を割り当てた場合は、より多くの光スペクトル資源を使用することになり、OPEX や消費電力量の面で無駄が生じる。また、図 1 のように、エラスティック光ネットワーク上に IP トラフィックを收容することを想定すると、IP ネットワークのような大規模なネットワークにおいて対地間光パス設定要求を受け付けるのは、ネットワーク資源（光スペクトル資源・ポート）数の観点から困難であると考えられる。したがって、限られた資源を用いて複数の光パスを設定することで構築した仮想網上に IP トラフィックを收容し、IP レベルでマルチホップ通信を行うことが望ましい。さらに、トラフィック量の変動に対して適応的に仮想網を再構築することが重要となる。

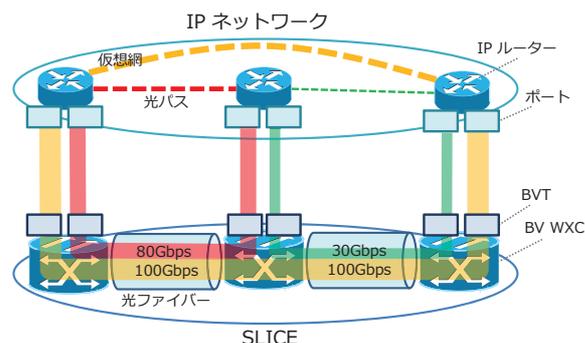


図 1 IP over Elastic Optical Network

文献 [6] では、エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法が提案されているが、本手法は、小規模なネットワークを対象にフルメッシュ型のトポロジーを持つ仮想網を構築し、観測したトラフィック量の情報を用いて各光パスに割り当てる帯域幅を調整するにとどまっておき、どのような仮想網を構築すべきかを含めた検討は十分になされていない。したがって、本稿では、エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法を提案する。提案する手法は、IP ネットワークの通信品質の確保と、使用資源数の削減の両立を目指すものである。

本稿の構成は以下の通りである。2. 章でエラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法を提案し、3. 章で提案手法の有効性を評価する。4. 章では、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 仮想網制御手法

本章では、本稿で提案する、エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法について説明する。

2.1 仮想網制御手法の概要

本手法は、仮想網を構成する各光パスのリンク利用率の定期的な観測にもとづき、アトラクター選択モデル [7] を応用した仮想網の再構築、および各光パスの帯域幅の調整を交互に実行するものである。なお本稿では、IP ルーター間のトラフィックは仮想網をトポロジーとして最短経路制御にもとづいて転送されるものとしている。以降では、仮想網のリンク利用率を単にリンク利用率と表記することとする。提案手法の概要を図 2 と以下に示す。また、アトラクター選択モデルについての説明は付録 4. に示す。

Phase.1 仮想網の再構築

- (1) 取得したリンク利用率および残余資源に関する情報を用いて活性度を算出
- (2) アトラクター選択モデルを応用し仮想トポロジーを算出
- (3) 新たに設定する光パスへの周波数スロットの割り当てを LPF + First-last fit アルゴリズムで実行

Phase.2 各光パスの帯域幅の調整

- (1) 取得したリンク利用率を用いて各光パスの帯域幅を調整
- 以降では、各フェーズについて詳細に説明する。

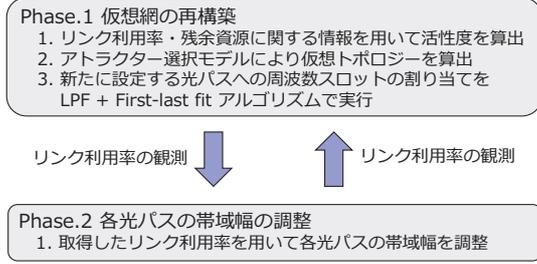


図 2 エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法の概要

2.2 (Phase.1) 仮想網の再構築

2.2.1 (Phase.1-1) 活性度の算出

各光パスのリンク利用率を観測し、それと残余資源に関する情報にもとづいて活性度 α の値を算出する。活性度 α の算出には、以下に示す 2 つの指標を用いる。

- 最大リンク利用率 u_{max}
 - IP ネットワークの通信品質を反映する指標
 - 最大リンク利用率 u_{max} は一定の範囲内の値を取る ($u_{minth} \leq u_{max} \leq u_{maxth}$ を満たす) ことが望ましい。すなわち、トラフィック量の増大による通信品質の劣化を回避するために $u_{max} \leq u_{maxth}$ を満たすことが望ましく、光スペクトル資源の過度な使用を回避するために $u_{minth} \leq u_{max}$ を満たすことが望ましい。
 - 活性度の算出に際しては、 $u_{max} > u_{maxth}$ である場合にその値が小さくなるようにする。その理由は、 $u_{minth} > u_{max}$ である場合は Phase.2 において光パスの帯域幅を縮小させればよく、活性度を小さくすることで仮想網を再構築する必要がないためである。 $u_{max} > u_{maxth}$ である場合でも、Phase.2 において光パスの帯域幅を拡大することで対応ができるが、(1) ポートの帯域幅に相当する分の周波数スロットを割り当てている、あるいは (2) 光スペクトル資源数の制約を満たしつつ周波数スロットを追加できない場合は帯域幅を拡大できない。したがって、 $u_{max} > u_{maxth}$ である場合に活性度を小さくすることで仮想網を再構築する。

- 残余帯域幅 $B_{remaining}$
 - ネットワーク資源の利用効率を反映する指標
 - 残余帯域幅 $B_{remaining}$ を以下の式のように定義する。

$$B_{remaining} = \sum_{s,d \in V} B_{remaining}^{sd} \quad (1)$$

ここで、 V はネットワーク内のノードの集合であり、対地間の残余帯域幅 $B_{remaining}^{sd}$ は以下のように定義される。

* (s, d) に光パスが設定されている場合、その光パスを設定するのに使用されるポートの未使用帯域幅と、その光パスに追加可能な周波数スロットの帯域幅のうち小さい方の値とする。例えば、図 3 では、前者の値が 20Gbps、後者の値が 10Gbps であるため、そのうちの小さい方の 10Gbps が $B_{remaining}^{sd}$ となる。

* (s, d) に光パスが設定されていない場合、未使用ポートの帯域幅と、仮に (s, d) に光パスを設定する際に割り当て可能な周波数スロットの帯域幅のうち小さい方の値とする。ただ

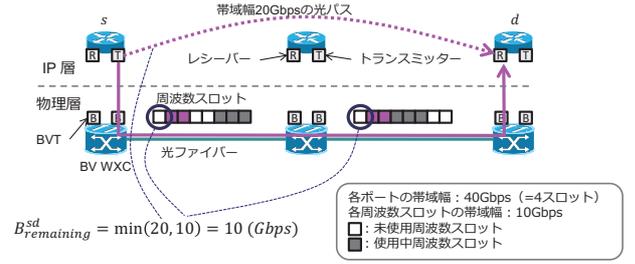


図 3 対地間の残余帯域幅の例: (s, d) に光パスが設定されている場合

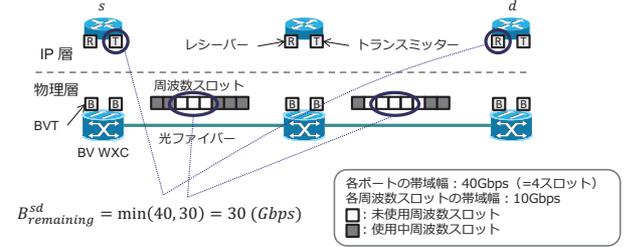


図 4 対地間の残余帯域幅の例: (s, d) に光パスが設定されていない場合

し、ノード s に未使用トランスミッターがなく、ノード d に未使用レシーバーがない場合は $B_{remaining}^{sd} = 0$ とする。例えば、図 4 では、前者の値が 40Gbps、後者の値が 30Gbps であるため、そのうちの小さい方の 30Gbps が $B_{remaining}^{sd}$ となる。

活性度 α を算出する際には、式 (2) のようにそれぞれの指標にもとづいて算出した活性度 α_{mlu} , α_{rb} の積を取る。積を取ることで活性度を算出する理由は、最大リンク利用率の目標値を達成しつつ、かつ残余帯域幅の目標値を達成すること、すなわち、使用資源数を抑えつつ現在のトラフィックを収容することを制御目標として考えているためである。

$$\alpha = \alpha_{mlu} \cdot \alpha_{rb} \quad (2)$$

最大リンク利用率 u_{max} を用いた活性度 α_{mlu} は以下のように算出する。ただし、 γ_{mlu} および δ_{mlu} は正の定数であり、 $\theta_{mlu} = u_{maxth}$ である。

$$\alpha_{mlu} = \frac{\gamma_{mlu}}{1 + \exp(\delta_{mlu} \cdot (u_{max} - \theta_{mlu}))} \quad (3)$$

また、残余帯域幅 $B_{remaining}$ を用いた活性度 α_{rb} は以下のように算出する。ただし、 γ_{rb} および δ_{rb} は正の定数であり、 θ_{rb} は残余帯域幅の閾値 (目標値) である。

$$\alpha_{rb} = \frac{\gamma_{rb}}{1 + \exp(\delta_{rb} \cdot (\theta_{rb} - B_{remaining}))} \quad (4)$$

2.2.2 (Phase.1-2) 仮想トポロジーの算出

WDM ネットワーク上の仮想網制御手法 [8] と同様に、アトラクター選択モデルを応用して仮想網を構築する。すなわち、アトラクター選択モデルにおけるシステムの状態 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{N2})$ (N はノード数) をエラスティック光ネットワークにおける仮想網の設定状況とし、光パス l_i の設定状況を状態変数 $x_i (\in \mathbf{x})$ の値によって定める。状態変数 x_i のダイナミクスは式 (5) で表



図 5 First-last fit アルゴリズム

される。

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left(\zeta \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i \right) + \eta \quad (5)$$

第一項の $\zeta \left(\sum_j W_{ij} x_j \right) - x_i$ はアトラクターを持つ制御構造であり、 $\zeta(z)$ はシグモイド関数 $\tanh\left(\frac{\mu}{2}z\right)$ (μ はパラメーター)、 W_{ij} はアトラクターを記憶させた制御行列である。第二項の η はゆらぎ項である。式 (5) により光パス l_i に対応する状態変数 x_i の値を算出し、 $x_i \geq 0$ である場合は光パス l_i を設定し、 $x_i < 0$ である場合は光パス l_i を削除する。以上のように定義したダイナミクスでは、活性度 α が大きくなるように仮想網が制御される。すなわち、使用資源数を抑えつつ、現在のトラヒックを収容できる仮想網を構築することを意図している。

2.2.3 (Phase.1-3) 周波数スロットの割り当て

Phase.1-2 において、新たに設定されることが決定した光パスに周波数スロットを割り当てる。新たに設定される光パスの帯域幅は IP ルーターのポートの帯域幅に一致するとし、その帯域幅に対応する個数の周波数スロットを割り当てる。周波数スロットの割り当てに際しては、LPF(Longest Path First) アルゴリズム [9] により割り当てを行う光パスの順番を決定し、First-last fit アルゴリズム [10] により実際に割り当てを行う。LPF アルゴリズムは、物理トポロジー上の経路長が大きい光パスから順に割り当てを行うアルゴリズムであり、ネットワーク規模が大きいとき資源利用効率が高いという特徴がある。First-last fit アルゴリズムは、全周波数スロットを複数の領域に分割し、偶数番の領域では最小のインデックスを持つスロットから、奇数番の領域では最大のインデックスを持つスロットから順に割り当てを行う (図 5)。その領域を使用している光パス数が少ない領域から順に割り当てを行う。

2.3 (Phase.2) 各光パスの帯域幅の調整

各光パスのリンク利用率を観測し、各光パス l_i のリンク利用率 u_i を一定範囲内に収める ($u_{minth} \leq u_i \leq u_{maxth}$ を満たす) ことを目的に帯域幅を調整する。各光パスの帯域幅の具体的な調整方法は以下の通りである。

- $u_i < u_{minth}$ のとき、 $u_i \geq u_{minth}$ になるように割り当てる周波数スロット数を減少させる。
- $u_i > u_{maxth}$ のとき、 $u_i \leq u_{maxth}$ になるように割り当てる周波数スロット数を増加させる。ただし、IP ルーターのポートの帯域幅を超える数の周波数スロットは割り当てない。周波数スロットを増加させる光パスの順番は LPF(Longest Path First) アルゴリズムにより決定する。

3. 性能評価

本章では、対地間トラヒック量が増大するシナリオを想定し、提案手法の有効性を評価する。

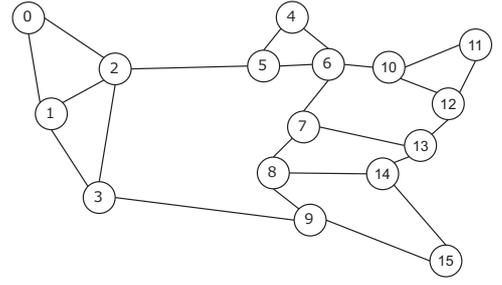


図 6 Simple USNET

表 1 物理トポロジー関連のパラメーター

パラメーター	値
ノード数	16
ポート数	8
各ポートの帯域幅	100Gbps

表 2 周波数スロット割り当て関連のパラメーター

パラメーター	値
各光ファイバーの周波数域	4.75THz
各周波数スロットの周波数域	12.5GHz
各周波数スロットの帯域幅	10Gbps
領域数	4
ガードバンド	周波数スロット 1 個 (12.5GHz)

3.1 評価環境

a) 物理トポロジー

本評価で用いる物理トポロジー関連のパラメーターを表 1 に示す。本評価では、図 6 に示す 16 ノードの物理ネットワークを対象とし、各ノード (BV WXC および IP ルーター) のポート (トランスポンダー) 数は等しく 8 とする。各ポートの帯域幅は 100Gbps であるとする。

b) 周波数スロット割り当て

周波数スロット割り当て関連のパラメーターを表 2 に示す。各光ファイバーの周波数域は 4.75THz、1 スロットあたりの周波数域は 12.5GHz とする。すなわち、各光ファイバーの周波数スロット数は 380 とする。また、1 スロットあたりの帯域幅は 10Gbps とする。

First-last fit アルゴリズムにより周波数スロットを割り当てる際には、領域数を 4、領域当たりの周波数スロット数を 95 とする。また、割り当てる周波数スロットに隣接するスロットを 1 個ガードバンドとする。

c) アトラクター選択モデル

アトラクター選択モデル関連のパラメーターについて説明する。 $\gamma_{mlu} = \gamma_{rb} = 1$ 、 $\delta_{mlu} = \delta_{rb} = 50$ とし、ゆらぎ項 η は平均 0、偏差 0.3 の正規乱数とする。また、ランダムに選択した対地間に光パスを設定することで構築した 25 個の仮想網をアトラクターとし、そのうちの 1 個を制御開始時の初期仮想網とする。

d) 制御目標

提案手法の制御目標値を表 3 に示す。リンク利用率 u_i の小さい方の閾値 u_{minth} を 0.2、大きい方の閾値 u_{maxth} を 0.8 とする。また、残余帯域幅 $B_{remaining}$ の目標値 θ_{rb} を 6400 とす

表 3 制御目標値

パラメーター	目標値
u_{minth}	0.2
u_{maxth}	0.8
θ_{rb}	6400 = (16 × 8 × 100 × 0.5)

る。この値は(ノード数) × (ポート数) × (各ポートの帯域幅) × 0.5 を計算することで得た。

e) トラヒック

シミュレーション開始時の対地間トラヒック量を [0.0, 1.0](Gbps) の一様乱数とし、単位時間ごとに各対地間トラヒック量に [0.0, 0.01](Gbps) の一様乱数を加算する。

f) 比較手法

MSF(Most Subcarriers First) [9] により周波数スロットの割り当てを行う光パスの順番を決定し、First-last fit アルゴリズムにより実際に割り当てを行う。MSF アルゴリズムは、必要な周波数スロット数が大きい光パスから順に割り当てを行うアルゴリズムである。本評価では、対地間のトラヒック量が既知、あるいは長期的な観測により取得可能であることを前提とし、トラヒック量の多い対地間から順に光パスの設定および周波数スロットの割り当てを行う。

3.2 評価結果

各手法の性能評価結果を図 7, 8, 9 に示す。

図 7 は最大リンク利用率の推移を示しており、横軸は制御ステップ数、縦軸は最大リンク利用率を示している。提案手法は、偶数ステップで Phase.1 の制御を行い、奇数ステップで Phase.2 の制御を行っている。比較手法 (MSF+First-last fit) は、20 ステップごとに対地間トラヒック量を取得し、それをもとに仮想網を再構築している。また、図中の点線は閾値 u_{maxth} , u_{minth} を示している。図 7 を見ると、提案手法は一時的に最大リンク利用率が上昇する場面があるものの、その後の制御により最大リンク利用率を閾値 ($u_{maxth} = 0.8$) 以下に抑えられていることがわかる。比較手法はトラヒック量の増大に伴い徐々に最大リンク利用率が上昇していることがわかる。最大リンク利用率が 1.0 を上回っている箇所は、パケットロスが発生していることを示している。特に Time=1800 付近では、提案手法は最大リンク利用率を閾値以下に抑えているのに対し、比較手法は最大リンク利用率が 1.0 を上回っている。すなわち、対地間トラヒック量が増大した状況では、比較手法は対地間トラヒック量の情報を利用しているにも関わらずトラヒックが収容できないのに対し、提案手法はトラヒックを収容できている。したがって、対地間トラヒック量がある程度増大した状況では、提案手法の方がトラヒックの収容効率の面で優れているといえる。

図 8 は残余帯域幅の推移を示しており、横軸は制御ステップ数、縦軸は残余帯域幅を示している。また、図中の点線は残余帯域幅の目標値 θ_{rb} を示している。図 8 を見ると、提案手法の残余帯域幅はほぼ目標値 ($\theta_{rb} = 6400$) 以上の値を保っていることがわかる。一方、比較手法の残余帯域幅は非常に小さい値となっていることがわかる。その理由は、比較手法はポートを可能な限り使い切り、かつ各光パスの帯域幅の調整を行わない手法であるためである。

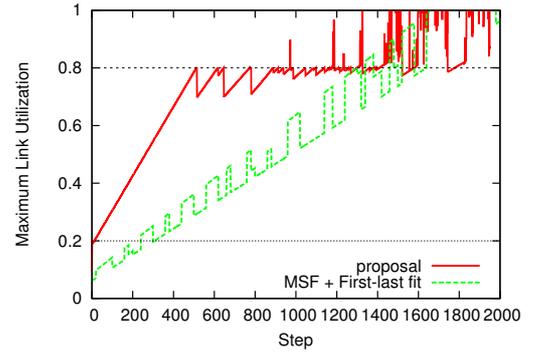


図 7 最大リンク利用率の推移

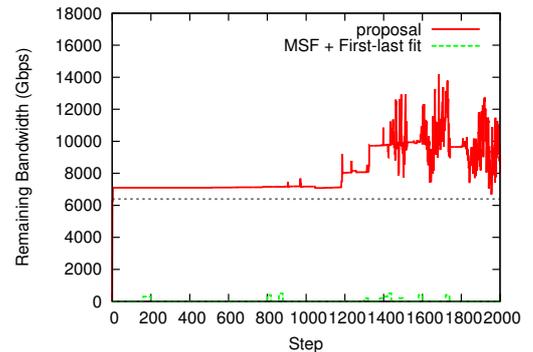


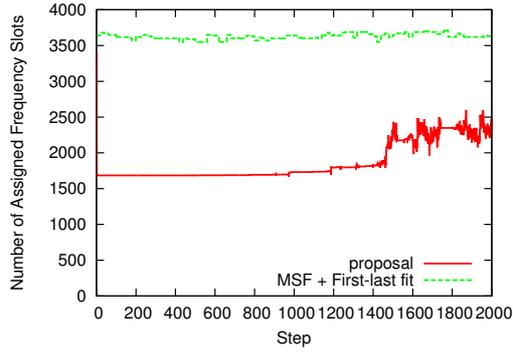
図 8 残余帯域幅の推移

図 9 は使用資源数の推移を示している。まず、図 9(a) は割り当て済みの周波数スロットの総数の推移を示しており、横軸は制御ステップ数、縦軸は割り当て済みの周波数スロットの総数を示している。図 9(a) を見ると、提案手法の割り当て済みの周波数スロットの総数は、比較手法の値より一貫して小さいことがわかる。次に、図 9(b) は仮想網を構成する光パス数、すなわち使用ポート数の推移を示しており、横軸は制御ステップ数、縦軸は光パス数を示している。また、図中の点線は設定可能な光パスの総数 (ポートの総数) を示している。図 9(b) を見ると、提案手法の光パス数は比較手法の値より一貫して小さいことがわかる。提案手法の割り当て済みの周波数スロットの総数および使用ポート数がともに小さい理由は、比較手法はポートを使い切り、かつ各光パスの帯域幅の調整を行わない手法であるのに対し、提案手法は各光パスの帯域幅の調整を行い、また残余帯域幅を活性度に組み込んで仮想網制御を行うため、より未使用ポート数が多くなるように仮想網を再構築するためである。すなわち、各光パスの帯域幅の調整を行い、残余帯域幅を活性度に組み込んで仮想網制御を行うことで、使用資源数の削減が可能であるといえる。

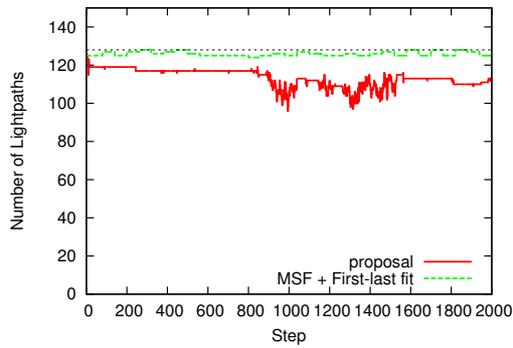
4. まとめと今後の課題

本稿では、エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法を提案し、使用資源数を抑えつつ現在のトラヒックを収容できることを示した。

本稿では、エラスティック光ネットワーク上に、IP ネットワークの通信品質の確保と使用資源数の削減を両立する単一の仮想網を構築することを目標としたが、使用資源数の削減を突



(a) 周波数スロット数



(b) 光パス数 (ポート数)

図 9 使用資源数の推移

き詰めると、余剰資源を用いて新たな仮想網を構築し、複数の仮想網を制御するアプローチが考えられる。すなわち、データセンターネットワークやエンタープライズネットワークなどのネットワークサービスごとに仮想網を構築、およびサービスの収容を行い、それぞれのネットワークの状況に応じて余剰資源を協調的に融通し合う制御アプローチが考えられる。このような制御を行うことで、エラスティック光ネットワークにおける、光スペクトル資源を細粒度で操作可能であるという利点をさらに活かすことができると考えている。したがって、今後はエラスティック光ネットワーク上の複数仮想網制御手法について検討する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (A)15H01682 によるものである。ここに記して謝意を表す。

付 録

アトラクター選択モデル

アトラクター選択モデルによって駆動される生物システムは、生物が本来持つ動作であるアトラクターを持つ制御構造とゆらぎの 2 つの要素によって動作する [7]。アトラクター選択で駆動するシステムの振る舞いは、式 (A・1) で表される。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot f(\mathbf{x}) + \eta \quad (\text{A} \cdot 1)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ は、システムの状態である (n は状態変数の数)。この微分方程式により記述されるシステムは、2 つの挙動で構成される。1 つは、関数 $f(\mathbf{x})$ で表されるアトラクターを持つ制御構造であり、もう 1 つは η で表されるゆらぎ、すなわちランダムな振る舞いである。これら 2 つの挙動は、システムのコンディションを示す活性度 α で調整される。活性度はシステムのコンディションが良いほど大きな値になる。システムのコンディションが良く α が大きい場合は、 $f(\mathbf{x})$ がシステムの挙動に与える影響が η に比べて相対的に大きくなるため、 $f(\mathbf{x})$ が支配的にシステムを制御する。そのため、 \mathbf{x} は $f(\mathbf{x})$ で定義される解空間上の均衡点であるアトラクターに安定的に収束する。反対に、コンディションが悪く α が小さい場合は、 η が支配的にシステムを制御する。このとき、ゆらぎがランダムにシステムの状態を変化させ、システムのコンディションが良くなるアトラクターを探索する。このようにして、アトラクター選択システムは、活性度に応じてアトラクターを持つ制御構造とゆらぎを適切に使い分けることで、環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現している。

文 献

- [1] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A survey on OFDM-based elastic core optical networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, pp. 65–87, Feb. 2013.
- [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 Communications Magazine*, vol. 47, pp. 66–73, Nov. 2009.
- [3] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. B. Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, pp. s12–s20, Feb. 2012.
- [4] B. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, pp. 1776–1800, May 2015.
- [5] Cisco, Visual Network Index, "Forecast and Methodology, 2013-2018," June 2014.
- [6] W. Wei, C. Wang, and X. Liu, "Adaptive IP/optical OFDM networking design," in *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*, p. OWR6, Mar. 2010.
- [7] C. Furusawa and K. Kaneko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," *PLoS Computational Biology*, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.
- [8] Y. Koizumi, T. Miyamura, S. Arakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, "Adaptive virtual network topology control based on attractor selection," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 1720–1731, June 2010.
- [9] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354–1366, Mar. 2011.
- [10] R. Wang and B. Mukherjee, "Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 2907–2911, Dec. 2012.