

Osaka University

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 斗土彦 荒川 伸一 村田 正幸
大阪大学 大学院情報科学研究科

2015/11/18

Osaka University

エラスティック光ネットワーク

- 高い光スペクトル資源利用率
 - 従来の WDM(Wavelength Division Multiplexing ; 波長分割多重) ネットワークと比較して、光バスに割り当てる帯域幅の粒度が小さく、光スペクトル資源の有効活用が可能
 - 要求帯域幅・距離に応じて光スペクトル資源割り当て・変調方式の選択を実行

WDM ネットワーク

エラスティック光ネットワーク

光スペクトル資源の節約

ITU-T の周波数グリッド

周波数

10Gbps
40Gbps
100Gbps

Osaka University

SLICE(Spectrum-sliced elastic optical path network) モデル [2]

- 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）を持つ光バスを実現可能
 - 状況に応じて光バスの帯域幅を調整し、割り当てる周波数スロット数を削減することで消費電力を削減することが可能
- ハードウェア実現技術
 - BVT(Bandwidth-variable Transponder)
 - 帯域 / 変調方式可変トランスポンダー
 - BV WXC (Bandwidth-variable Wavelength Cross-Connect)
 - 帯域可変長クロスコネクタ

クライアントノード (e.g. IP ルーター)

BVT

SLICE

BV WXC

光ファイバー

光バス

[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.

Osaka University

研究の背景

- トラフィック量が増大・変動する傾向は今後も継続
 - 既存研究における、要求に対して光バスを設定するアプローチでは、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
 - 必要な帯域幅 > 割り当てた帯域幅 のとき、通信品質が低下
 - 必要な帯域幅 < 割り当てた帯域幅 のとき、消費電力の面で無駄が発生
- ネットワーク資源数の制約
 - エラスティック光ネットワークに IP トラフィックを収容することを想定
 - IPネットワークのような大規模ネットワークにおいて各対地間の光バス設定要求を受け付けるのは、資源（光スペクトル資源・トランスポンダー）数の観点から困難

↓

エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法の必要性

- 限られた資源を用いて仮想網を構築し、マルチホップでトラフィックを伝送
- ネットワークの状況に応じて仮想網を再構築

Osaka University

研究の目的

- エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法の提案と評価
 - 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
 - 以下の二つの制御目標を両立する仮想網制御手法を検討
 - IP ネットワークの通信品質の確保
 - 使用資源（光スペクトル資源・ポート）数の削減

IP ネットワーク

仮想網

IP ルーター

光バス

ポート

BVT

光ファイバー

SLICE

BV WXC

80Gbps
100Gbps
30Gbps
100Gbps

Osaka University

仮想網制御アプローチ

- 仮想網の再構築
 - 制御目標を達成するように光バスを削除・再設定
 - WDMネットワーク上の仮想網制御と同様に実行可能

高負荷の光バス

仮想網を再構築

10Gbps
40Gbps
50Gbps
40Gbps
80Gbps
40Gbps

負荷の軽減
- 光バスの帯域幅の調整
 - 光バスの帯域幅を拡大・縮小
 - エラスティック光ネットワークにおいて新たに可能になる制御

トラフィック負荷の増大

光バスの帯域幅を調整

40Gbps
40Gbps
40Gbps
40Gbps
60Gbps
40Gbps

Osaka University 7

エラスティック光ネットワーク上の仮想網制御手法

- リンク利用率の定期的な観測にもとづき、仮想網の再構築・各光バスの帯域幅の調整を交互に実行
 - Phase.1: 仮想網の再構築**
 - リンク利用率・残余資源に関する情報を用いた活性度の算出
 - アトラクター選択モデルによる仮想トポロジーの算出
 - 新たに設定する光バスへの周波数スロット割り当て
 - Phase.2: 各光バスの帯域幅の調整**
 - リンク利用率を用いた各光バスの帯域幅の調整

Osaka University 8

アトラクター選択モデル [7]

環境変化に対する柔軟な振る舞いを実現するモデル

- 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
 - 活性度 α が大きいとき、システムの状態 x は $f(x)$ で定義されるアトラクターに収束
 - 活性度 α が小さいとき、ゆらぎ η がシステムの状態 x をランダムに変化させ、活性度 α が大きくなるアトラクターを探索

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \cdot f(x) + \eta$$

活性度 α (システムの状態の良さ)
 $f(x)$: アトラクターを持つ制御構造
 η : ゆらぎ (ノイズ)

[7] C. Furusawa and K. Kineko, "A generic mechanism for adaptive growth rate regulation," PLoS Computational Biology, vol. 4, p. e3, Jan. 2008.

Osaka University 9

Phase.1-1 活性度の算出

- リンク利用率・残余資源に関する情報を用いて活性度 α を算出
 - 仮想網の性能指標
 - 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
 - 残余帯域幅 $B_{remaining}$: 資源の利用効率を反映する指標
 - 活性度の算出方法
 - 各指標の観点から仮想網の状態の良さを表す値 $\alpha_{mlu}, \alpha_{rb}$ の積
 - $\alpha_{mlu} \in [0, 1]$: u_{max} を用いて算出 (u_{max} が小さいほど値が大きい)
 - $\alpha_{rb} \in [0, 1]$: $B_{remaining}$ を用いて算出 ($B_{remaining}$ が大きいほど値が大きい)

$$\alpha = \alpha_{mlu} \cdot \alpha_{rb} = \frac{1}{1 + \exp(u_{max} - u_{maxth})} \cdot \frac{1}{1 + \exp(\theta_{rb} - B_{remaining})}$$

u_{maxth} : 最大リンク利用率の目標 (上限) 値
 θ_{rb} : 帯域幅の目標値

通信品質・資源利用効率の二つの制御目標を同時に達成することが望ましい状態

Osaka University 10

Phase.1-2 仮想トポロジーの算出

- 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
 - 仮想網の設定状況: $x = (x_1, \dots, x_{N^2})$ (N : ノード数)
 - 光バス l_i を設定するかどうかを状態変数 x_i の値によって決定
 - $x_i \geq 0$ である場合は光バス l_i を設定
 - $x_i < 0$ である場合は光バス l_i を削除

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

状態変数 x_i のダイナミクス

活性度 α が大きくなるように仮想網を制御

二つの制御目標を同時に達成する (使用資源数を削減しつつトラフィックを収容可能な) 仮想網を構築

Osaka University 11

Phase.1-3 周波数スロットの割り当て

- 新たに設定する光バスへの周波数スロットの割り当てをヒューリスティックアルゴリズムで実行
 - 新たに設定する光バスの帯域幅は IP ルーターのポートの帯域幅に一致
 - LPF (Longest Path First) アルゴリズム [9]
 - 周波数スロットの割り当てを行う光バスの順番を決定
 - 物理トポロジー上の経路長が大きい光バスから順に割り当て
 - First-last fit アルゴリズム [10]
 - 各光バスに周波数スロットを割り当て
 - 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

[9] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varveri, "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.

Osaka University 12

Phase.2 各光バスの帯域幅の調整

- 各光バスのリンク利用率を取得し、各光バスの帯域幅を調整
 - $u_i < u_{minth}$ のとき
 - 光バス l_i の帯域幅を縮小 (割り当てる周波数スロットを削減)
 - $u_i \geq u_{minth}$ となるように、光バス l_i に割り当てた周波数スロットの一部を解放
 - $u_i > u_{maxth}$ のとき
 - 光バス l_i の帯域幅を拡大 (割り当てる周波数スロットを追加)
 - $u_i \leq u_{maxth}$ となるように、光バス l_i に割り当てる周波数スロットを追加
 - ただし、資源制約を考慮

過度な資源割り当て → 望ましいリンク利用率 → 通信品質の低下

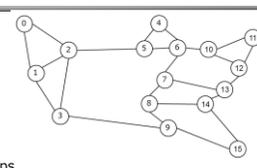
光バス単位で、資源利用効率の向上・通信品質の向上

Osaka University 13

評価環境

- 物理ネットワーク**
 - ノード (BV WXC + IP ルーター)
 - ノード数: 16
 - ポート数: 8
 - 各ポートの帯域幅: 100Gbps
 - リンク (光ファイバー)
 - 周波数スロット数: 380
 - 1スロットあたりの帯域幅: 10Gbps
- トラフィック**
 - 対地間トラフィック量が増大するシナリオを想定
 - 単位時間ごとに一樣乱数を加算
- 比較手法**
 - MSF (Most Subcarriers First) [9] + First-last fit
 - トラフィック量が多い対地間から順に光パス設定・周波数スロットの割り当て
 - 対地間トラフィック量を長期的な観測により取得可能であることが前提

▲物理トポロジー



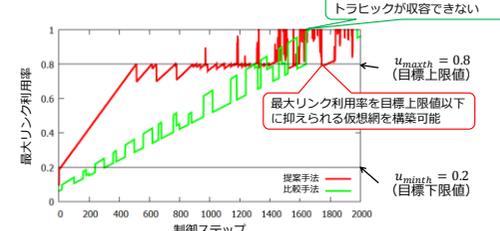
[9] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, pp. 1354–1366, Mar. 2011.

Osaka University 14

評価結果：最大リンク利用率の推移

- 各手法により構築される仮想網が示す最大リンク利用率を評価
 - 提案手法: 偶数ステップで Phase.1, 奇数ステップで Phase.2 の制御
 - 比較手法: 20ステップごとに仮想網を再構築

最大リンク利用率が1.0を超えトラフィックが収容できない



最大リンク利用率

制御ステップ

提案手法 (赤線) 比較手法 (緑線)

$U_{max} = 0.8$ (目標上限値)

最大リンク利用率を目標上限値以下に抑えられる仮想網を構築可能

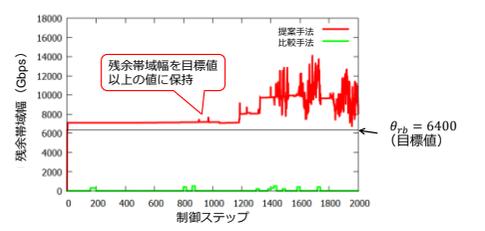
$U_{min} = 0.2$ (目標下限値)

提案手法は対地間トラフィック量が増大した状況でもトラフィックを収容可能

Osaka University 15

評価結果：残余帯域幅の推移

- 残余帯域幅の推移を調査
 - 残余帯域幅: 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 (Gbps)

制御ステップ

提案手法 (赤線) 比較手法 (緑線)

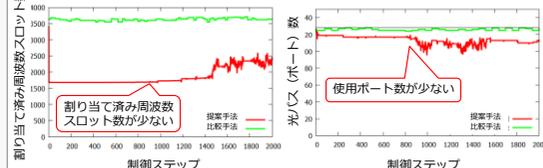
残余帯域幅を目標値以上の値に保持

$\theta_{th} = 6400$ (目標値)

Osaka University 16

評価結果：使用資源数の推移

- 各手法により構築される仮想網の使用資源 (周波数スロット・ポート) 数を評価



割り当て済み周波数スロット数

割り当て済みポート数

制御ステップ

提案手法 (赤線) 比較手法 (緑線)

割り当て済み周波数スロット数が少ない

使用ポート数が少ない

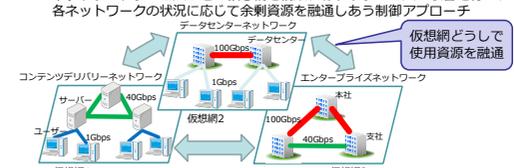
提案手法は使用資源 (周波数スロット・ポート) 数を削減可能

- 各光パスの帯域幅の調整 → 割り当て周波数スロット数の削減
- 残余帯域幅を用いた仮想網再構築 → 使用ポート数の削減

Osaka University 17

まとめと今後の課題

- まとめ**
 - 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
 - 使用資源数を削減しつつトラフィックを収容可能であることを示した
- 今後の課題**
 - 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の検討
 - 使用資源数の削減 → 余剰資源を用いた新たな仮想網の構築
 - 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、各ネットワークの状況に応じて余剰資源を融通しあう制御アプローチ



仮想網1 仮想網2 仮想網3

データセンターネットワーク

エンタープライズネットワーク

コンテンテデリバリーネットワーク

サーバ

ユーザ

100Gbps 40Gbps 1Gbps 100Gbps 40Gbps

仮想網2

仮想網1

仮想網3

データセンター

エンタープライズ

ユーザ

100Gbps 40Gbps 1Gbps 100Gbps 40Gbps

仮想網2

仮想網1

仮想網3

仮想網どうして使用資源を融通