

波長変換・波長群変換器の導入による階層化光パスネットワーク のコスト削減効果

沈 志舒 長谷川 浩 佐藤 健一

名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: z_shen@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp, {hasegawa, sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 波長群を導入した階層化光パスネットワークは、将来予想されるトラフィック増加に効率的に対応可能なアーキテクチャとして注目されている。しかし、同一ファイバ中に同じ波長・波長群番号を持つパスが共存できない制約は、ファイバの利用効率を低下させる要因となり、その結果コスト削減効果を低減する。波長変換器・波長群変換器の導入により各々の制約を緩和することで、ファイバの利用効率が向上するが、これまでは、変換コストを考慮した総コストに関する最適化法は提案されておらず、変換装置コストとファイバ利用率とのトレードオフが定量的に評価されていなかった。本稿では、波長変換・波長群変換のいずれかまたは双方の機能を具備した提案階層化光パスネットワークの総コスト最適化法の概要を述べる。提案手法は、多段階の整数線形計画法(ILP)またはヒューリスティック法に基づいており、現実的な計算時間で所望の問題の準最適解を導くことに成功している。今回、数値実験により幅広いトラフィック領域における従来型ネットワークに対するコスト面での優位性を確認し、また波長・波長群変換器が満たすべきコスト限界を明らかにした。

キーワード 多階層光パスネットワーク, ネットワーク設計, 波長変換器, 波長群変換器, コスト上限値

Cost Reduction Achieved by Introducing Wavelength/Waveband Convertors in Hierarchical Optical Path Networks

Zhi-shu SHEN, Hiroshi HASEGAWA, and Ken-ichi SATO

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

E-mail: {z_shen}@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp, {hasegawa, sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

Abstract Hierarchical optical path networks that utilize wavebands are regarded as an effective architecture to cope with the expected traffic expansion in the future. However, the constraint that wavelength/waveband paths with the same wavelength/waveband index cannot share a fiber prevents from improving fiber utilization. This constraint can be alleviated by introducing wavelength/waveband convertors. However, the trade-off between the convertor cost and the fiber utilization ratio has not been quantitatively evaluated so far. In this work, we summarize our optical path network design algorithms for hierarchical optical path networks introducing either or both of wavelength and waveband convertors. The short computation time and the sub optimality of solutions make the proposed multi-stage ILPs or heuristics practical. Numerical experiments prove that by employing either or both types of wavelength convertor/waveband convertors, hierarchical optical path networks can be cost-effective over wide traffic demand ranges. The acceptable cost bounds of wavelength/waveband convertors are also presented.

Keyword Hierarchical Optical Path Network, Network Design, Wavelength Convertor, Waveband Convertor, Cost Bound

1. まえがき

超高精細映像配信を含む動画を中心とした新たなブロードバンドサービスの導入により、将来において、バックボーンネットワーク上のトラフィックの爆発的な増加が予想される。現在、波長を転送単位(波長パス)とする“一階層光パスネットワーク”実現の一形態として、Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers (ROADMs) を用いた一階層光パスネットワーク

(Single-layer optical path networks)が導入され始めている。しかし、将来予想される更なるトラフィックの増加は、ネットワーク内のパス数の大幅な増加を引き起こし、各ノードでのスイッチポート数の増加、それに伴う光クロスコネクタの規模の拡大を引き起こし、ノードコストの急増を招く。そこで、複数波長を論理的に束ね“波長群パス”(Waveband path)とし、一括して経路選択処理を行うことで、ノードコストを削減しつ

つ低消費電力・超大容量化を実現する“多階層光パスネットワーク”(Hierarchical optical path network)が注目されている[1-5].

従来の一階層光パスネットワークの設計は、光信号の波長をラベルとして信号を識別するため、光パス設定には送信ノードから受信ノードまでの全リンクにおいて同一の波長が使用しなければならないという、電気信号処理の場合には考慮する必要がない制約(波長連続性制約)がある。その上、同一のファイバ内の光パスには、同一の波長を割当ててはできない。これらの制約を考慮しながら、各々の光パスに適切な経路を選択した上、適切な波長を割当てていく必要があり、これを経路・波長割当(RWA: Routing and Wavelength Assignment)問題という。この問題は NP 完全問題であり、最適解の導出は事実上不可能である。一方、波長群を導入した多階層光パスネットワークの場合、一階層光パスネットワークの割当問題に加え、波長群パスの経路・波長群割当問題も同時に解決しなければならない。これまで、いくつかの多階層光パスネットワーク設計アルゴリズムが提案されている[2-4]。特に[2]には、効率的に波長群パスに集約可能な波長パス探索法を提案し、ネットワーク内の波長パス数がある程度以上であれば、ネットワークの総設備コストを一階層光パスネットワークと比較して、大きく削減できることが示されている。しかし、トラフィック需要が比較的少ない領域では、波長群パス及びファイバ収容率が一般に低い値となるため、多階層光パスネットワークの有効性を得るに至ってなかった。一つの解決策としては、これらの波長・波長群の制約を、波長・波長群変換器を導入して解消することであり、結果として光ファイバおよび波長群パスの収容率の向上が見込まれる。これまで、波長・波長群変換器コストを“0”と仮定し、実質的に波長・波長群衝突を除外した上で、設備コストの準最適化を二段階の整数線形計画法(ILP: Integer Linear Programming)として定式化し、解決する手法が提案されている[6-7]。しかし、変換器以外の設備コストは大きく削減される一方で多くの変換器を必要とし、設備コスト面での優位性は明確ではなかった。

これまで著者は波長変換[8-10]・波長群変換器[11]のいずれかまたは双方[12]を導入した多階層光パスネットワークの設計法の基本形を提案してきた。各提案手法は、波長変換器・波長群変換器の特性を鑑み、導入変換器数の削減と波長・波長群衝突に伴うファイバ数の増加とのトレードオフを考慮しながら、ネットワーク全体に及ぶ設備コストを最小化する。ここでの特長は、NP 完全問題である極めて計算困難である設計問題を、二段階の ILP による波長パス・波長群パスの経

路決定問題及び、最低限の波長・波長群変換器の導入を許し増設コストを抑制する波長・波長群番号割当問題に分割し、各々の部分問題を適確に解く方法を確認した点にある。とりわけ波長群番号割当問題は、各変換器の導入効果数に大きな影響を与えるため、ILP 及びヒューリスティックを併用し、計算コストと解精度とのトレードオフの解決を計った。

本稿では、波長・波長群変換器を導入した多階層光パスネットワークの構造について説明した後、各変換器を導入した多階層光パスネットワーク設計法[8-12]の概略を述べる。数値実験では、波長変換・波長群変換のいずれかまたは双方の機能を具備した多階層光パスネットワークが、従来の一階層光パスネットワークと比べ、幅広いトラフィック領域でコスト削減効果を達成できることを確認し、多階層光パスネットワークがコスト面で優位になる、波長変換器・波長群変換器コストの準最適な上限値を明らかにする。

2. 多階層光パスネットワークにおける波長変換・波長群変換

多階層光パスネットワークは、波長パス及び波長群パスという粒度が異なる 2 種類の光パスにより構成される。図 1 に波長パス、波長群パス、光ファイバの包含関係を示す。また、本研究では、図 2 に示す階層型ノードを多階層光パスネットワークのノードとして想定する。階層型ノードは、波長パスのルーティングを行う波長クロスコネクタ (WXC: Wavelength Cross-Connect)部と波長群パスのルーティングを行う波長群クロスコネクタ(BXC: Waveband Cross-Connect)部から構成される。

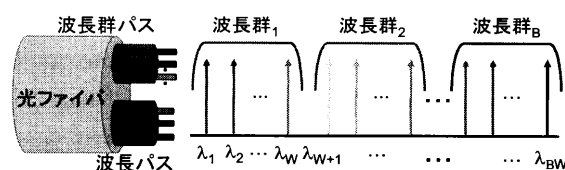


図 1 多階層光パスの概念図

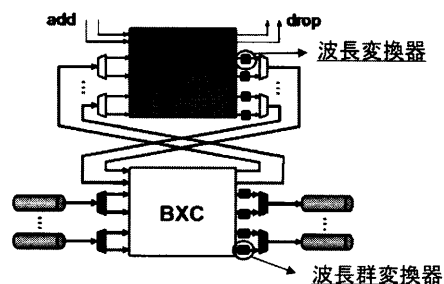


図 2 階層型ノード構成の概念図

本稿では、波長群変換器、波長変換器それぞれは、多階層光パスネットワークの BXC または WXC の NNI (Network-Network Interface) ポートの出力側に配置することを仮定する(図 2). 波長変換器は任意の波長から所望の波長へ変換することが可能であり[13], 波長群パス数の削減には有効である. 一方, 波長群変換器は, 任意の波長群から所望の波長群へ, 波長群パスに含まれる一連の波長パスの波長を一括して変換することが可能であり[14], 波長毎の波長変換に比べ, 必要な変換素子数が削減できる等のメリットがある. 一般的には, 波長群変換では図 3 のように波長群中の波長順序が入れ換わる性質を有する. 図 4 及び図 5 は波長群変換器及び波長変換器による波長群・波長衝突を解決した例を示す. 各々の衝突の解消によって, ファイバ利用率を向上し, ファイバやそれに付随する EDFA 等のリンクコストの削減が可能になる. とりわけ, 双方の変換器を同時に利用することにより, リンクコストの最小化が可能になる. しかし, 波長・波長群変換器は高価な設備であり, 変換器に要するコストとリンクコスト削減とのトレードオフを考慮しなければならない. 次節では, 波長群変換器のいずれかまたは双方を, 必要最小限のポートのみに実装するための最適化法を示す.

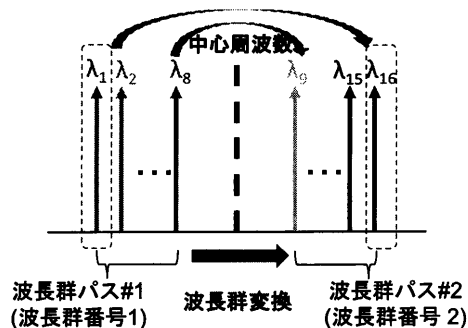


図 3 波長群変換の特性

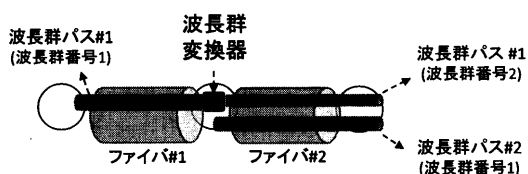


図 4 波長群変換器の導入による波長群衝突削減効果

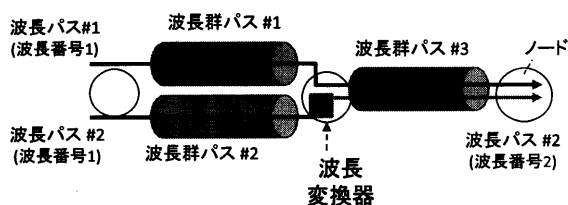


図 5 波長変換器の導入による波長衝突削減効果

3. 波長変換・波長群変換を考慮した多階層光パスネットワーク設計法

本研究は, あらかじめ収容すべきトラフィック需要が与えられ, 波長・波長群変換器コストを含むネットワーク総コストが最小化されるべき目的関数となるネットワーク静的設計を取り扱う. しかし, 前書きでも述べたように多階層光パスネットワークの最適化は NP 完全問題であり, 波長パスと波長群パスの同時収容設計は事実上不可能である[7]. このため, 著者は[8-9]に, 設計問題を以下の 3 つの部分問題:

Step 1 波長群パス経路決定及び波長パス収容

Step 2 波長群番号割当

Step 3 波長番号割当

に分割し, パス粒度毎の準最適解を現実的な計算時間で算出した.

最初の Step1 は, 二段階 ILP による経路決定アルゴリズム[7]により, 波長群パス・波長パスの経路とパス間の包含関係を得る. このアルゴリズムは Source Formulation[15]に基づいており, 定式化に必要な変数の数はトポロジの規模のみに依存する. しかし, 次の波長群番号では, 直接 ILP に定式化する場合, 必要変数の数はトポロジ規模だけでなく, 設立される波長群パス・波長パスの数にも大きく依存しており, 計算コストが莫大になる. このため, 規模が小さいネットワークトポロジ上で, なおかつ発生トラフィックが小さい領域でしか結果が得られなかった[8-9].

この計算コストの課題を解決するため, 著者は[10]に, 必要なネットワーク増設コストの最小化を目的とした, ヒューリスティックな波長群割当法を提案した. このヒューリスティック法は ILP 法とほぼ同等の解を与え, 波長変換器に要するコストとリンクコスト削減とのトレードオフ問題を解決した上, 要する計算時間も短い. また, このヒューリスティックは大きな修正なしに, 波長群変換器[11]或いは波長・波長群変換器[12]を導入した場合にも適用可能である. 最後に, 波長割当段階では, 波長番号衝突を避ける為に導入される設備コストを最小化するように, 波長番号を割当てる. 全体を通じたアルゴリズムの概略は以下の通りである.

<波長変換・波長群変換のいずれかまたは双方を考慮した多階層光パスネットワークの設計法>

Step1 波長群パス経路決定及び波長パス収容

二段階の ILP[7]により, 与えられた波長パス需要を収容可能な波長群パスを設立し, パス階層を決定した上で, それらの波長群パスに経路を選択する. 波長群・波長番号の割当は行わない. また経路選択は, 波長・波長群変換器コストを除いた残りのネットワークの総コスト(BXC及びWXCポートコスト及びファイバコス

ト)を最小化するように実施される。

Step2 波長群番号割当

この段階では、前の経路選択段階で得た波長群パスに対して波長群番号を割当てる。ここで、各変換器導入シナリオに対して、異なる波長群割当アルゴリズムを採用する。それぞれの概略は以下に示す：

(a) 波長変換器のみを導入する場合

ここでは、各リンクでの波長群衝突を避ける為に導入されるファイバと、異なる波長群番号を持つ波長群パスを連続して通過する波長パスが、波長群パスの境界で要する波長変換器との総コストを最小化する。直接 ILP 定式法[8-9]は、極めて高い計算コストに直結しており、適用できる状況に限られる。そこで、ここでは短時間内でより幅広いトラフィック領域の結果を得ることが可能である、ヒューリスティック法[10]について述べる。この手法では、潜在的に導入が必要なファイバ及び波長変換器の合計コストを線形関数の形で表現し、評価を行う。詳細は以下の通りである：

<潜在的に必要なファイバ及び波長変換器コストを考慮した波長群割当法>

Stage I 波長群パスペア(P_1, P_2)を連続して通過する波長パスの数を $N(P_1, P_2)$ と定義する。波長群パス P_1 と P_2 のホップ数のうち、より大きい値を $maxhop(P_1, P_2)$ で表し、波長群パスペア(P_1, P_2)のコスト関数 $C(P_1, P_2)$ を以下で定義する：

$$C(P_1, P_2) = maxhop(P_1, P_2) + N(P_1, P_2)$$

Stage II 一つ以上の波長パスが連続して通過し、かつ少なくともいずれか一方の波長群番号が確定していない全ての波長群対(P_1, P_2)について、 $C(P_1, P_2)$ を計算する。 $C(P_1, P_2)$ を最大とする波長群パス対(P_i, P_j)を一つ選び、パス P_i, P_j のうち、波長群番号が未確定である中で、ホップ数がより長いものに波長群番号を割当てる。他方の波長群パスは、ファイバの増設が最小となる波長群番号を割当てる。

Stage III 残りの波長群番号が未確定の end-to-end の波長群パスに対して、ホップ数の降順に、極力ファイバを増設しないよう、順次波長群パスに波長群番号を割当てる。

(b) 波長群変換器のみを導入した場合

ここでは、波長群番号割当時に生じる波長群衝突を解消するが目的で増設される波長群変換器の数を最小化する。異なる波長群番号を持つ波長群パス対を、ある波長パスが連続して通過する場合、波長群パスの境界には波長群変換器を導入する必要がある。そこで、

一つ以上の波長パスが連続して通過する波長群パス対には、できる限り同一の波長群番号を割当てる。一方、同一ファイバ内に波長群衝突が生じた場合にも、波長群変換器を導入する必要が生ずるため、できり限り先にホップ数が大きい波長群パスに波長群番号を割当てる。この二つの評価基準に従って、節 3(a)に述べたアルゴリズムと類似した波長群番号割当法を用いて、順次全ての波長群パスに波長群番号を割当てる。詳細は[11]を参照されたい。

(c) 波長変換器及び波長群変換器双方を導入した場合

ここでは、波長群番号割当の場合に生じる衝突を解消するために増設が必要となる波長群変換器(図 4)及び波長変換器(図 5)のコストを最小化する。波長パスが異なる波長群番号を持つ波長群パスを連続して通過時には、境界ノードで波長変換器を必要とする。そこでこのような波長パス数が多い波長群パス対には、極力同一の波長群番号を割当てる。一方、同一ファイバ内の波長群衝突を解消するために導入される波長群変換器の数を最小にするため、ホップ数が大きい波長群パスに優先的に波長群番号を割当てる。以上の評価基準に従って、節 3(a)と類似した割当法を用いて、順次すべての波長群パスに波長群番号を割当てる。その後、さらなるコスト削減を達成するため、波長群番号の再割当を行う。詳細については[12]を参照されたい。

Step3 波長番号割当

各波長パスの経由波長群パスについて、同一波長群番号を持ち、かつ波長パスが連続して通過する波長群パス毎にグループ化する。グループ毎に元の波長パスを仮想的に分割し、新たな波長パスとする。

波長変換器のみ或いは波長・波長群変換器双方を導入した場合には、分割の境界に波長変換器を挿入する。得られた全ての波長パスについて、経由波長群パス数の降順に波長番号を、極力波長変換器を使用しないように割当てる。

波長群変換器のみを導入した場合には、波長変換器による波長衝突は回避できないため、必要に応じて新たな波長群パス或いはファイバを増設する。

4. 数値実験

本節では数値実験により、変換機能を具備した多階層光パスネットワークの、従来の一階層光パスネットワークに対するコスト面での優位性を検証し、同時に波長変換・波長群変換器が満たすべきコスト上限値を見積もる。想定するネットワークトポロジとして、 $N \times N$ ($N=5,6$)格子型ネットワーク、COST266 pan-European ネットワーク(図 6)及び Telecom Italia バックボーン

ネットワーク(図7)を採用した.ファイバ収容可能な波長群数を8,波長群パスに収容可能な波長パス数を8とした.波長パス需要を一様ランダムに発生させてネットワークを設計し,得られたコストについて試行10回の平均を算出した.なお本稿で用いたネットワークのファイバ及びポートコストは[16]を参照し,波長群変換器コストは波長変換器コストの2倍,波長変換器コストをWXC(NNI)ポートコストと等しく設定した上で,波長群・波長番号割当を行った.

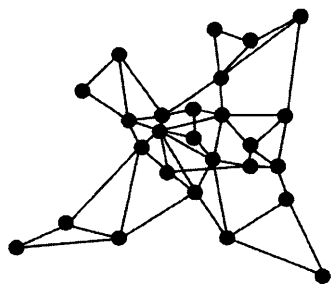


図6. COST266 pan-European ネットワーク

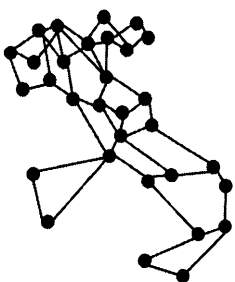
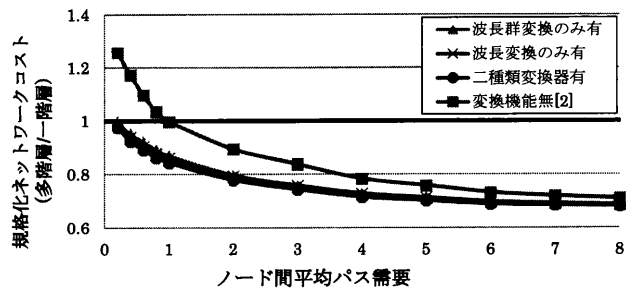
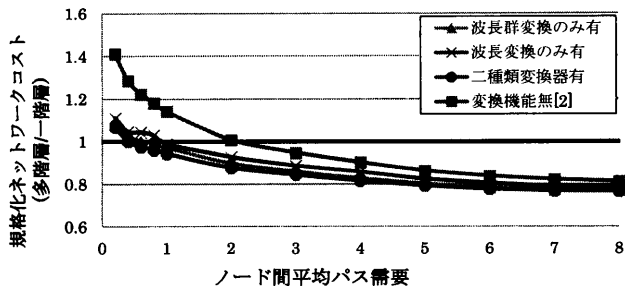


図7. Telecom Italia バックボーンネットワーク

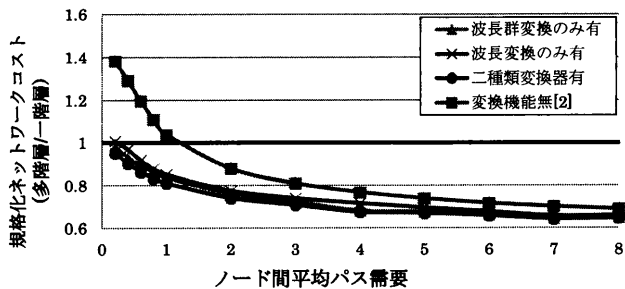
図8に波長群・波長変換を導入した提案手法,および波長群変換・波長変換を導入しない従来法(青)[2]によるネットワーク総コストを,一階層光パスネットワークのコスト[16]で規格化した結果を示す.この図が示す通り,変換器を導入した多階層光パスネットワークは,従来の一階層光パスネットワーク,及び変換器を導入していない多階層光パスネットワークと比べ,幅広いトラフィック領域において優位になった.この結果,多階層光パスネットワークが一階層光パスネットワークと比べ,より広い領域で優位となり得ることを示した.



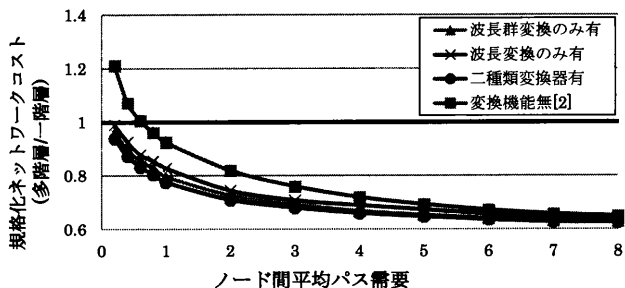
(a) 5x5 格子型ネットワーク



(b) COST266 pan-European ネットワーク



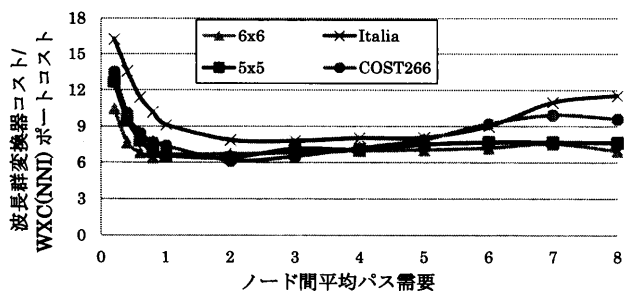
(c) Telecom Italia バックボーンネットワーク



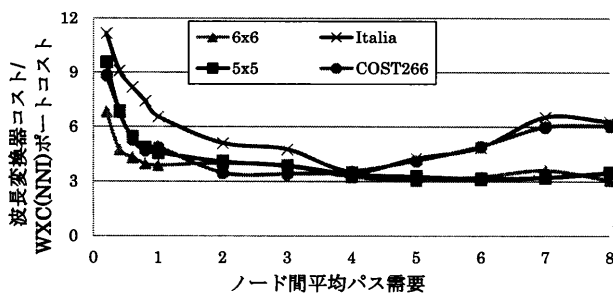
(d) 6x6 格子型ネットワーク

図8. 規格化ネットワークコスト

各条件下で得られた結果について,得られた変換器数で,変換器を導入した多階層光パスネットワークと変換器を導入しない多階層光パスネットワークのコスト差を割った商を,変換器を導入しない多階層光パスネットワークと比べ,変換器を導入した多階層光パスネットワークがコスト面で優位となる許容変換器コストの推定値として採用した.図9に推定値の評価結果を示す.波長群変換器は波長変換器と比べ,比較的に高いコストでコスト削減効果が得られている.特にトラフィック量が小さい領域でも,比較的高い変換器コストが許容可能となる.しかし,実際の変換器コストは関連技術の発展と強く依存しており,多階層光パスネットワークコストを最小化するためには,将来の変換器コストに応じて最善の変換器導入戦略を選択する必要がある.



(a)波長群変換器コスト上限値



(b)波長変換器コスト上限値

図9 コスト削減効果が得られる(a)波長群変換器コスト, (b)波長変換器上限値

5. むすび

本稿では、波長変換・波長群変換のいずれかまたは双方の機能を具備した提案階層化光パスネットワークの設計法の概要を述べた。それらの手法は、変換装置コストとファイバ利用率とのトレードオフ問題を解決し、現実的な計算時間で所望問題の準最適解を導き、各変換器の導入によるコスト削減効果を評価した。数値実験により、変換器を導入した多階層光パスネットワークは、幅広いトラフィック領域において、従来の一階層光パスネットワークと比べコスト面での優位性を確認し、波長変換・波長群変換が満たすべきコスト限界を明らかにした。

謝辞 本研究は NICT 並びに科研費 (23246072)の支援を受けた。

文 献

- [1] K. Sato and H. Hasegawa, "Prospects and Challenges of Multi-Layer Optical Networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, no. 8, pp. 1890-1902, Aug. 2007.
- [2] I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An Efficient Hierarchical Optical Path Network Design Algorithm based on a Traffic Demand Expression in a Cartesian Product Space," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 6, Part Supp., pp. 22-31, Aug. 2008.
- [3] A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Hierarchical Multi-granular Switching in Flexible Grid WDM Networks," *Proc. Optical Fiber Communication Conference, Oth3B.6*, Los Angeles, California United States, Mar. 2012.
- [4] Y. Wang, and X. Cao, "Multi-Granular Optical Switching: A Classified Overview for the Past and Future," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.14, no. 3, pp. 698-713, Jul. 2012.
- [5] K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, S. Kamei, and H. Takahashi, "An Ultra-compact Waveband Cross-connect Switch Module to Create Cost-effective Multi-degree Reconfigurable Optical Node," *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication, Paper 4.2.2*, Vienna, Austria, Sept. 2009.
- [6] 中野一輝, 山田祥之, 長谷川浩, 佐藤健一, "二段階 ILP による波長群変換・波長変換を考慮した多階層光パスネットワーク設計法," 2010 信学総合大会, 通信 2, pp. 492, Mar. 2010.
- [7] 中野一輝, 山田祥之, 長谷川浩, 佐藤健一, "波長変換・波長群変換機能を有する多階層光パスネットワークの設計法," 信学技術研究報告. PN, フォトニックネットワーク, 109(455), pp. 19-24, Mar. 2010.
- [8] 沈志舒, 長谷川浩, 佐藤健一, "波長変換を導入した多階層光パスネットワークの設計法と波長変換器コストの許容値評価," 信学ソサイエティ大会, 通信 2, pp. 328, Aug. 2011.
- [9] Z. Shen, H. Hasegawa, and K. Sato, "Design of Hierarchical Optical Path Networks that Utilize Wavelength Conversion and Evaluation of the Allowable Cost Bound," *Proc. SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics*, vol. 8310, pp. 1-6, Shanghai, China, 2011.
- [10] Z. Shen, H. Hasegawa, and K. Sato, "An Efficient Heuristic Waveband Assignment Algorithm for Hierarchical Optical Path Networks Utilizing Wavelength Converter," *Elsevier Journal Optical Switching and Networking*, vol. 10, pp. 54-61, Jan. 2013.
- [11] Z. Shen, H. Hasegawa, and K. Sato, "Effectiveness of Waveband Conversion for Hierarchical Optical Path Networks and the Allowable Cost Bound," *Proc. Photonics in Switching, ThS34I06*, Ajaccio, France, Sep. 2012.
- [12] Z. Shen, H. Hasegawa, and K. Sato, "Impact of Wavelength/Waveband Convertors and the Cost Bound in Hierarchical Optical Path Networks," *Proc. Optical Fiber Communication Conference, OM3A.2*, Anaheim, United States, Mar. 2013.
- [13] T. S. El-Bawab, *Optical Switching*. New York, NY: Springer, 2006.
- [14] H. Song, O. Tadanaga, T. Umeki, I. Tomita, M. Asobe, S. Yamamoto, K. Mori, and K. Yonenaga, "Phase-transparent flexible waveband conversion of 43Gb/s RZ-DQPSK signals using multiple-OPM-LN waveguides," *Optics Express*, vol. 18, no.15, pp. 15332-15337, Jul. 2010.
- [15] M. Tornatore, G. Maier, and A. Pattavina, "WDM Network Optimization by ILP based on Source Formulation," *Proc. IEEE International Conference on Computer Communication*, vol. 3, pp. 1813-1821, New York, United States, Jun. 2002.
- [16] S. Kaneda, T. Uyematsu, N. Nagatsu, and K. Sato, "Network design and cost optimization for label switched multilayer photonic IP networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 1612-1619, Aug. 2005.