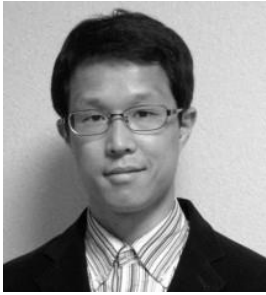


階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks



長谷川 浩 (Hiroshi HASEGAWA, Dr. Eng.)

名古屋大学 准教授

(Associate Professor, Nagoya University)

電子情報通信学会 IEEE

受賞：電子情報通信学会 通信ソサイエティ論文賞 Best Tutorial Paper Award (2008年9月) 13th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM2009), Best Paper Award 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2013), Best Paper Award

研究専門分野：フォトニックネットワーク ネットワークアーキテクチャ

あらまし 光パスを階層化したフォトニックネットワークにおける、多数の細粒度の光マルチキャスト通信の効率的な収容を実現する。粗粒度のルーティングと細粒度の終端のみ行える当該ネットワークでは、細粒度マルチキャスト通信を適切に集約した上で粗粒度のマルチキャストを最適化し、所望の通信の収容に要する光ファイバ資源を最小化することが必要である。本稿では与えられた細粒度マルチキャスト通信同士の集約の容易さを表現する指標を新たに導入し、これに基づき細粒度マルチキャスト通信の組み合わせを決定する。この後、整数線形計画問題として粗粒度マルチキャストを最適化する。更に、実際のネットワークを含む複数のトポロジにおける占有ネットワーク資源の削減を数値実験により示す。

1. はじめに

ブロードバンド回線の普及や P2P トラフィックの増加、動画配信サービスの浸透等を経て、クラウドサービスや携帯型情報端末の一般化、e-science/VPN の進展等により、今世紀に入ってから継続的にネットワークの通信トラフィック量が増え続けている。すなわちビットあたりの消費電力、装置コストを通信トラフィック量の増加に伍する比率で引き下げることが要請されており、中継ノードで、光ファイバ中の光信号を電気信号に変換することなく経路制御するフォトニックネットワークが注目され導入が始められている。

現状のフォトニックネットワークでは、光ファイバ中の波長多重信号を、波長毎に、始点と終点とを直接接続する「波長パス」として用いている。中継ノードでは波長パスを単位として経路制御することが求められ、空間光学系と MEMS によるミラー駆動や LCOS とを組み合わせた波長選択スイッチにより実現されている。しかし、このような波長選択スイッチは波長毎・出力ポート毎にビームを高精度に制御する必要があり、デバイス個別での調整が要求されることから一般に高コストであり、更に一定の光路長を確保するためにある程度のサイズとなる。そこで、複数の波長パスをグループ化し、グループ単位での経路制御を行うフォトニックネットワーク「階層化光パスネットワーク」が提案され[1][2][3]、検討されてきている[4][5][6]。具体的には、グループ化された光パスを収容するための大容量光パス「波長群パス」が定義され、波長パスはその始点・終点を直接接続している波長群パス、もしくは複数の連続した波長群パスの系列で、かつ波長パスの始点・終点を接続するものにより伝送される。このようなパスの階層構造は、電話や SDH [7]、OTN [8] 等で用いられる常識的なものである。しかし、フォトニックネットワークの場合には、波長パスが波長という物理的パラメータにより特徴付けられている関係上、特定の波長をカバーする波長群パスで無くてはその波長パスを収容できないという、ネットワーク全体を最適化する上で困難な制約が存在する。このため、この制約を鑑みた上でネットワーク全体を最もコンパクトに実現するための手法が数多く提案されてきた。

階層化光パスネットワークのコンセプトは主に従来

階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

型ネットワークからの類推や、ネットワーク最適化の観点から示されたものであった。しかし、効率的な経路制御を可能とするデバイスやノード装置の構成など、具体化するハードウェアについては十分な検討が行われてこなかった。我々は波長パス・波長群パスの特性を考慮したコンパクトなノード装置のアーキテクチャをこれまで提案してきた[9]。特に、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究としての支援や企業の協力をいただき、光集積回路としてモノリシックに集積した「波長群選択スイッチ」の試作と性能評価を実施している[10][11]。当該スイッチは空間光学系に頼らず平面光波回路として実現されており、チップ単体を波長選択スイッチと比較した場合には、体積比・消費電力で共に 1/100~1/1000 程度と大幅なコンパクト化・低消費電力化を達成している。

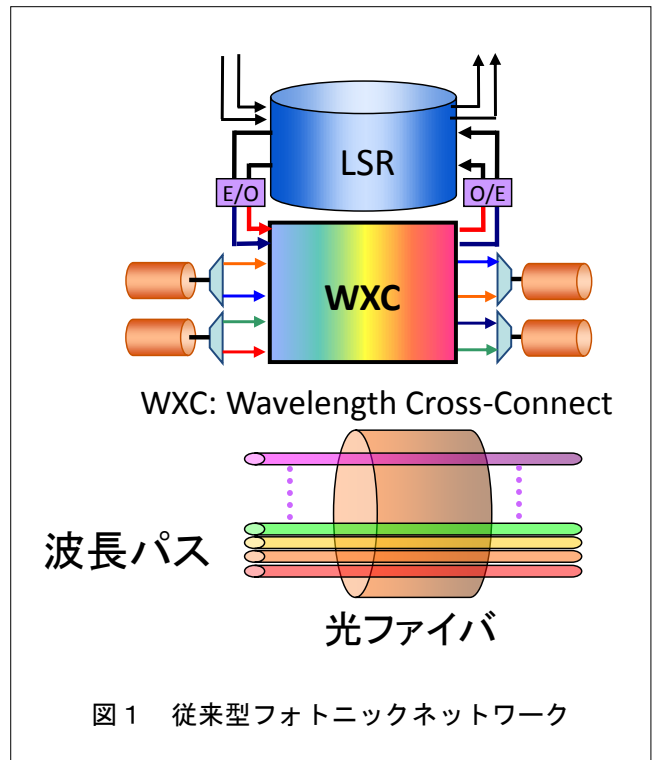
一方、従来型ネットワークでも利用されている、多地点への情報配信に適したマルチキャスト通信については、波長信号のマルチキャストが、光カプラにより光レベルで自然に実現されることから、波長マルチキャスト通信のフォトニックネットワークへの効率的な収容という形で検討が進められてきた[12]-[15]。これに対し、階層化光パスネットワークでの効率的な情報配信を実現する上では、同様にノード装置に変更を加えること無く、かつ波長群と波長との階層構造を維持しながらの新たなマルチキャスト通信が必要となっていた。そこで筆者らは、一般的な階層化光パスネットワークノード装置では、波長群単位でのマルチキャストと波長単位での終端処理とが自然に行えることに着目し、適切な数の波長マルチキャストを束ね波長群マルチキャストに収容することを提案した。波長群マルチキャストでは、前述した波長パスと波長群パスの階層構造と同様に、波長と波長群の包含関係に起因する制約の影響を受ける。よって、波長群マルチキャストへの収容においては、波長マルチキャストの始点と終点とが完全に一致する波長マルチキャストが複数与えられ、更に同一の始終点を持つ波長群マルチキャストにそれらの波長マルチキャストを直接収容する場合が、最も効率よく収容できる状況である。しかし今後見込まれるマルチキャスト配信は、キー局から地方局への番組配信等の配信元・配信先が固定的に与えられるア

プリケーションに加え、データセンターやキャッシュサーバ間のコヒーレンスを保つ為のデータ配信、多数利用者への同時ストリーミング配信等、配信元・配信先が互いに異なるマルチキャストを多数かつ同時に取り扱う必要が生じると考えられる。そこで、多様な配信元・配信先を持つ波長マルチキャストの設立要求から、同一の波長群マルチキャストに収容すべき需要群を抽出してそれらを収容可能な波長群マルチキャストを設計する手法を開発した。本稿ではその成果の特徴的な部分について述べる。

2. 本研究の成果

2.1 階層化光パスネットワーク

従来型フォトニックネットワークでは、光ファイバ中の波長多重信号の各々を単位として、始終点ノードを接続する波長パスとして用いる(図1)。ノード装置は波長クロスコネクタ(Wavelength Cross-Connect, WXC)を主体として構成され、主に波長選択スイッチにより実現される。しかし、波長選択スイッチを多数必要とするため、大規模な光クロスコネクタを実現することには困難が伴う。



階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

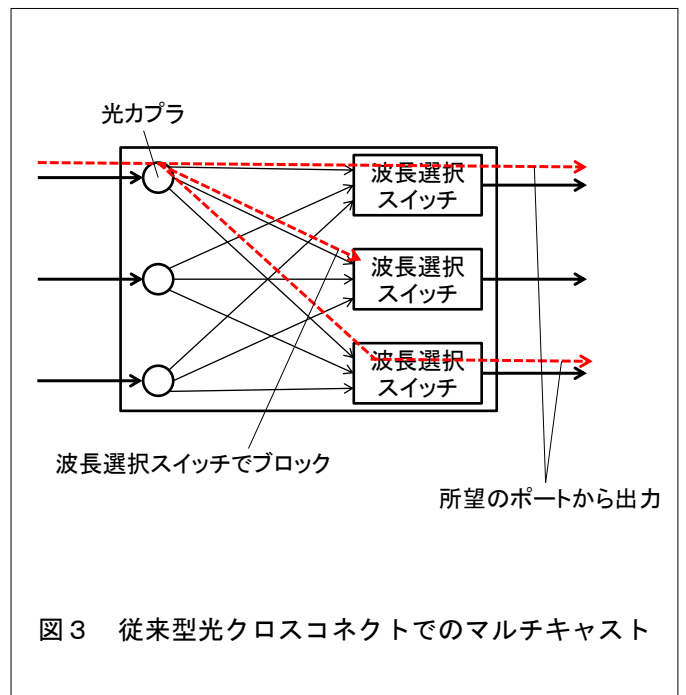
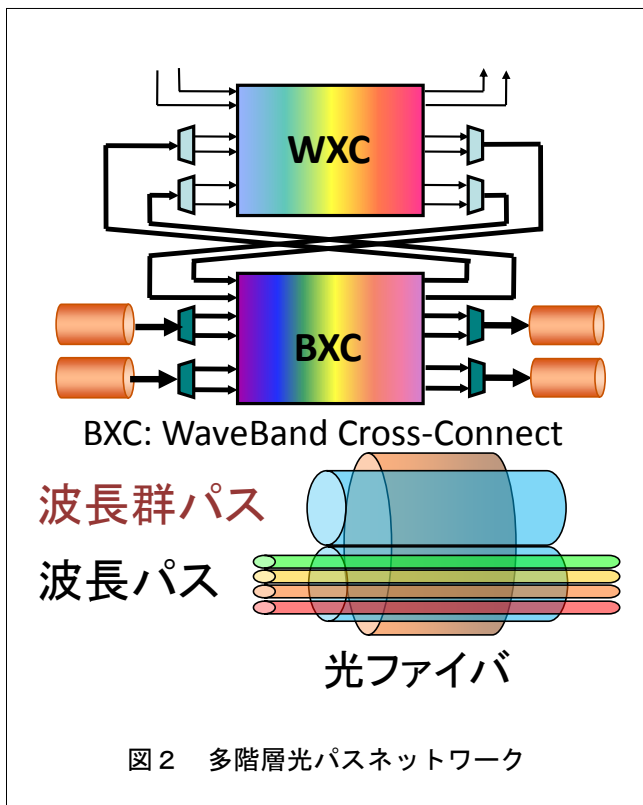
Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

一方、階層化光パスネットワークでは、波長群クロスコネクと波長クロスコネクがスタックされた構造を取る（図 2）[9][16]。波長群パスは波長パスを複数収容可能であり、また波長群パス単位での経路制御は波長群クロスコネクで実現される。波長クロスコネクは、波長群パス内の波長パスの組み合わせを変える、あるいは終端するためのみに用いられる。波長群単位での経路制御を極力行うことから、波長クロスコネクでの処理が減少し、結果として波長クロスコネクをコンパクトにすることにつながる。一方、経路制御能力そのものについては、波長群単位での経路制御は、波長単位での経路制御に比べて劣るため、同一光ファイバ網内に収容できる波長パス数が減少する。そこで、波長群単位での経路制御の割合を最大化しつつ、一方でネットワーク資源の占有量を最小化することが求められる。この最小化を達成する上では、与えられた波長パス設立要求の集合に対して、波長群パスをどのように配置するか、波長パスをいずれの波長群パスに収容するか、波長群パスの経路と使用波長をどのように選択するか、という割当に全て適切な解を与

えなくてはならない。しかし、波長群パスが導入されない場合についても、当該問題は NP 完全に属する計算コストの高い問題で有り、設定されるパス数が多く、波長多重数は 40~100 程度、ネットワークの規模も数十ノード規模に達することから、最適解の算出は現在のところ不可能である。そこで近似的なメトリックを導入する、あるいは制約の一部を除外する等して問題を緩和することが必要となる。

2.2 波長群マルチキャスト

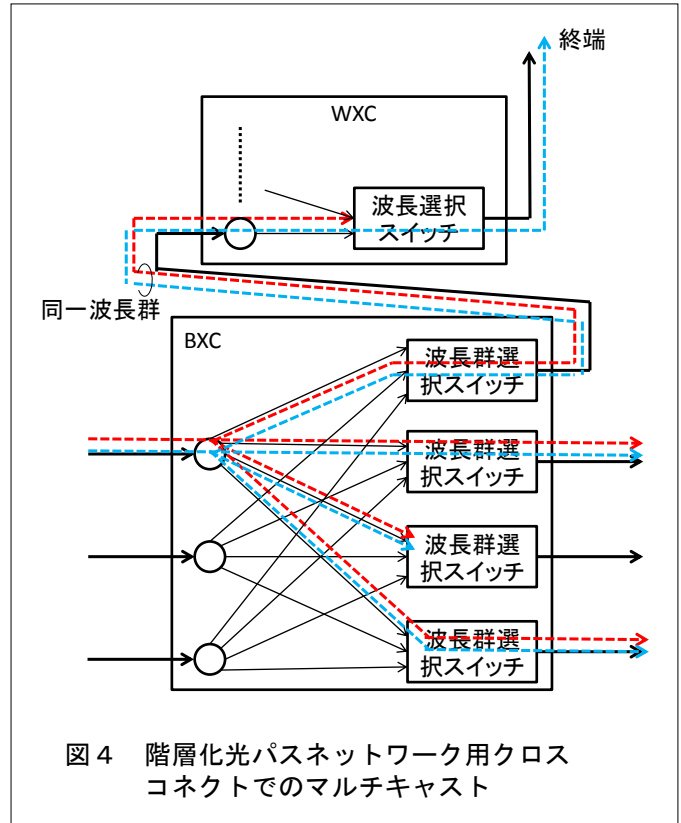
図 3 に、従来型光クロスコネクでの光マルチキャストの様子を示す。この光クロスコネクは入力側に光カプラを配置し、出力側に波長選択スイッチを配置する Broadcast & Select と呼ばれる一般的な構成を取っている。各波長信号は光カプラで複製され、全ての波長選択スイッチに配信される。各波長選択スイッチでは波長毎に、いずれの入力ポートからの信号を出力するかを選択するかを独立に決定している為、ある入力ポートからの信号を複数の出力ポートへ配信するマルチキャスト機能は容易に実現可能である。



階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

続いて図 4 に、階層化光パスネットワーク用クロスコネクタ[9][16]でのマルチキャストの様子を示す。従来型光クロスコネクタとの主要な差異は、クロスコネクタがスタックされかつ相互接続されていること、波長群用クロスコネクタ（WaveBand Cross-connect, BXC（図 5））では波長群選択スイッチ[10][11]が用いられていることである。すなわち、光カプラでの複製と波長群選択スイッチおよび波長選択スイッチでの取捨選択を経て、波長群マルチキャスト内の全ての波長マルチキャストが同時に所望の全終点ノードへ配信され、各終点ノードでは所望の波長マルチキャストのみを抽出する。波長マルチキャストの始終点を通過する範囲内で波長群マルチキャストの経路には任意性があり、適切なマルチキャストの収容設計を行うことが重要となる。



内部アーキテクチャ

モジュール全容

- 5x5 波長群クロスコネクタ
- フットプリント: 135 x 220 [mm]
- 40 wavelengths/fiber
 - 100GHz spacing on ITU-T grid
 - $194.6 + 0.1 \times n$ [Thz]; $n=0$ to 39
- 5WB/fiber (8 wavelengths/WB)

図 5 5 × 5 波長群クロスコネクタモジュール[11]

階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

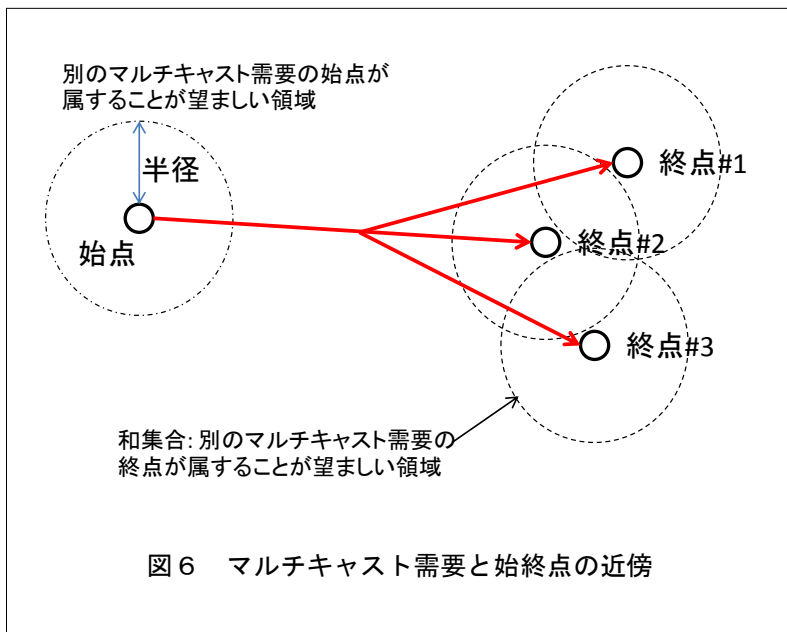
2.3 波長群マルチキャストの収容設計

複数の波長パスを波長群パスへ効率よく収容する上では、多くの場合、始点・終点が近い波長マルチキャスト要求同士を組み合わせ、同一の波長群マルチキャストへ収容することが望ましい。従来の階層化光パスネットワークでは、波長パスの始点・終点間の距離を直接用いて組み合わせるべき波長パスを探索していたが[6]、マルチキャスト通信では終点の個数は一定では無く、距離を直接用いることはできない。

そこで今回の検討ではまず、マルチキャスト通信に適したメトリックを提案した。このメトリックは、ある波長マルチキャスト需要の始点および終点の近傍（図6）に、他の波長マルチキャストの始点および終点が全て含まれることが波長群マルチキャストへの収容の容易さを示すという考えの下、定式化されている。近傍を定義する半径を順次拡大することで波長マルチキャスト需要間の類似性を計り、類似性の高い需要を適当数束ねることにしている。

続いて、束ねられた波長マルチキャスト需要を包含する波長群マルチキャストを設計する上で、以下の階層構造を利用している。

"波長群マルチキャスト" \supset "波長マルチキャスト"
 \supset "波長マルチキャスト内の各始終点对間のパス"

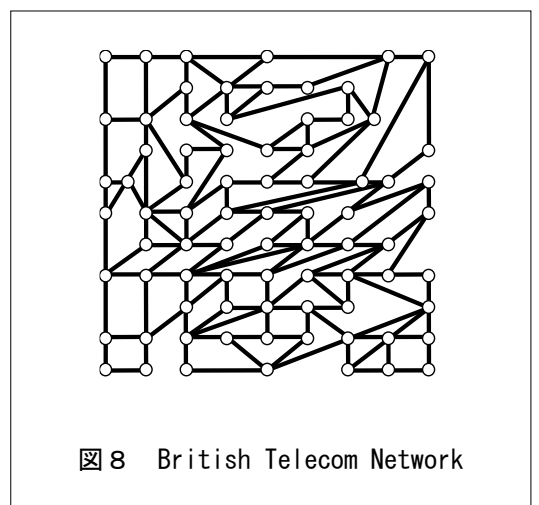
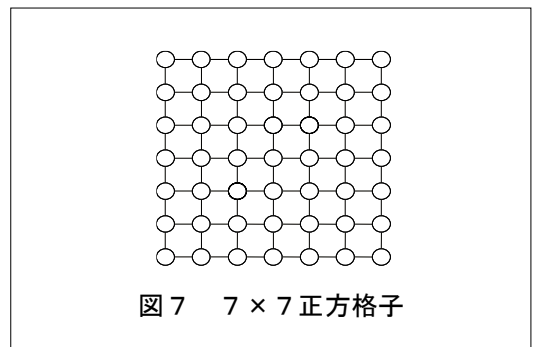


この階層構造に基づき、始終点間のパスの通過リンク情報を、リンク・パス毎に定義される2値変数として表し、パスの連続性と、上記包含関係を線形制約として表現した上で、波長群マルチキャストの延べ通過リンク数を評価関数として最小化する。すなわち、整数線形計画法にて解を求める。当該最適化についてはIBM CPLEXをソルバとして用いた。

なお、本研究においては、信号劣化特性の考慮やそれに伴う最適な再生器の配置についての検討[17]等、上記定式化に付帯する検討も実施しているが、紙面の都合上本稿では割愛する。

2.4 数値例

提案する波長群マルチキャストのインパクトを評価するため、3つのネットワーク（7x7 正方格子（図7）/ 9x9 正方格子 / British Telecom Network（図8）：ノード数 49/81/79、リンク数 84/144/139）を想定し、数値実験を行った。

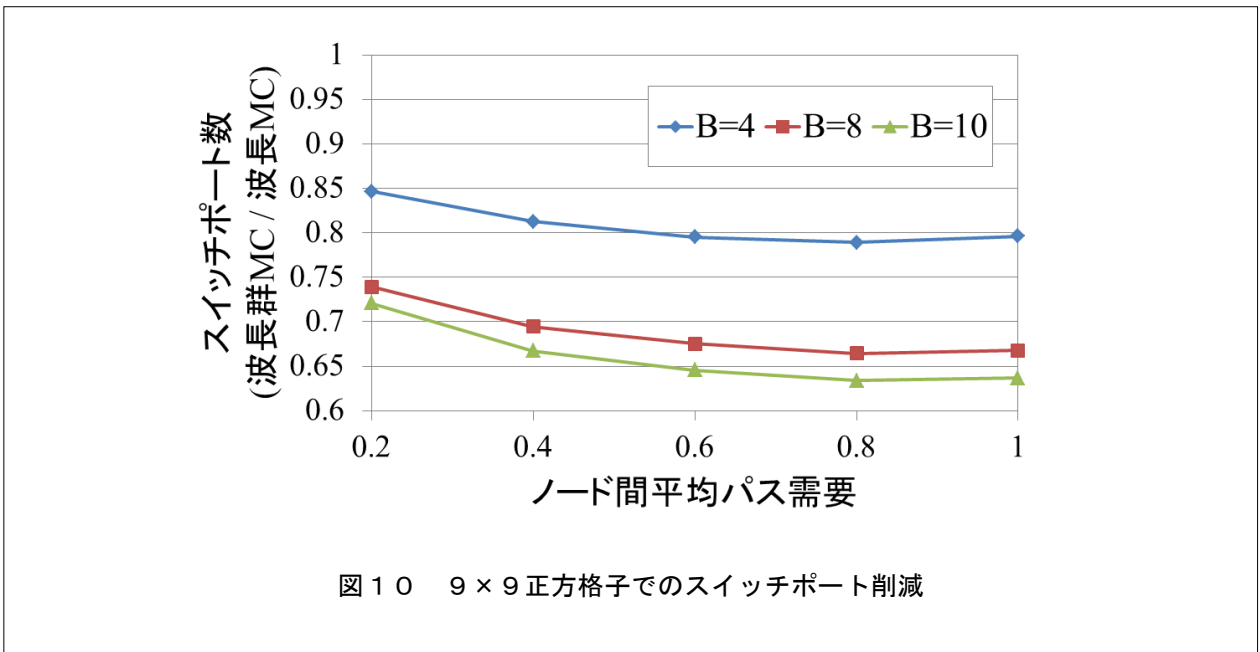
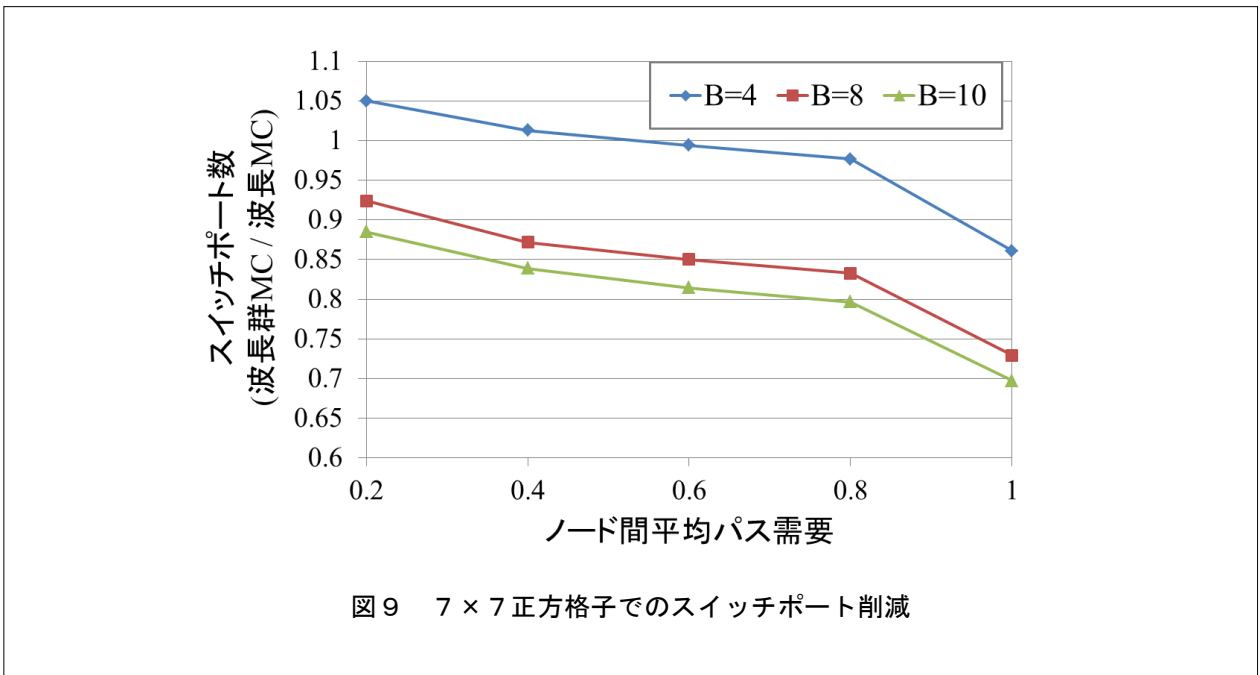


階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

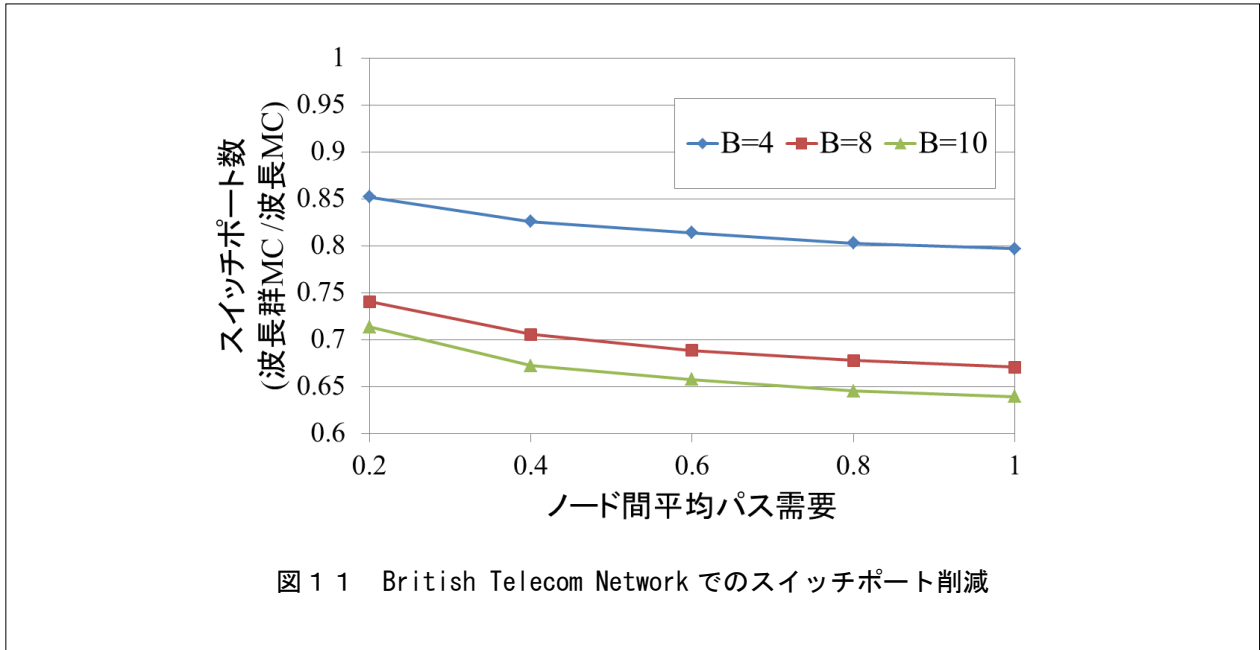
波長多重数（光ファイバ内の波長数）を 80、波長群内の波長数を 4, 8, 10 とした。波長マルチキャスト設立需要は、単一の始点と 3 つの終点を持つものとし、これら始終点はネットワーク内のノードからランダムに選んでいる。複数の波長マルチキャスト需要を生成し、必要十分な数の波長群マルチキャストに収容している。占有するネットワーク資源の評価をマルチキャスト

スト収容に必要となる光スイッチポート数に換算し、従来型光クロスコネクタとの相対値により行った。図 9, 10, 11 に各ネットワークでの結果を示す。ノード数の多い大規模ネットワークであるほど効果は大きく、特に 9x9 正方格子にて 4 割弱のネットワーク資源の削減を実現していることが見て取れる。



階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks



3. まとめ

本稿では、光マルチキャストの階層化光パスネットワーク上での効率的な実現に関する検討を行った。特に、波長群マルチキャストへの収容が重要であることから、波長マルチキャスト間の類似性を評価するメトリックを新たに定義し、これに基づき波長群マルチキャストとして集約した上で、整数線形計画問題にて最適なマルチキャストを設計する手法を提案した。大規模ネットワークでのインパクトが特に大きく、9x9 正方格子ネットワークでは使用ハードウェア量が 4 割弱削減されることを数値実験により確認している。

デジタルコヒーレント受信の実用化と商用 100Gbps 伝送の実現、各光パスの使用する周波数帯域を固定値とせず、フレキシブルに必要な十分な帯域を割り当てるエラスティック光パスネットワークの標準化 [18]、波長選択スイッチの超多ポート化 [19] 等、本検討と平行して様々な新技術が開発されてきた。階層化光パスネットワーク自体も、波長群選択スイッチと波長単位の終端を組み合わせ、新たなグループ化ルーティングネットワーク [20] へと発展を遂げるなど、進化を続けている。通信量の増加に伴うフォトニックネットワークの適用領域の拡大と、高精細映像配信に代表される大容量通信・配信の必要性の高まりから、本研究で取り上げた光マルチキャストの重要性が増してい

くと予想される。

本稿でのマルチキャスト集約や波長群マルチキャストの最適化は、整数線形計画問題など、本来は多くの変数・制約式をもって表現される形式にて記述される。しかし、今回の報告では数式の使用を極力避ける必要があった為、ごく限定的な範囲についてコンセプトのみを文章で述べている。より詳しい内容は、例えば文献 [17] をご覧いただきたい。

参考文献

- [1] K. Harada, K. Shimizu, T. Kudou, and T. Ozeki, "Hierarchical optical path cross-connect systems for large scale WDM networks," Opt. Fiber Commun. Conf. National Fiber Optic Eng. Conf., pp. 356–358, Feb. 1999.
- [2] L. Noirie, C. Blaizot, and E. Dotaro, "Multi-granularity optical cross-connect," Eur. Conf. Opt. Commun., pp. 269–270, Oct. 2000.
- [3] K. Sato and H. Hasegawa, "Prospects and challenges of multi-layer optical networks," IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, no. 8, pp. 1890–1902, Aug. 2007.

階層化光パスネットワークにおける多地点配信通信の効率的な収容法

Efficient Accommodation of Point to Multi-point Distributions to Hierarchical Optical Path Networks

- [4] M. Li, W. Yao, and B. Ramamurthy, "Same-destination-intermediate grouping versus end-to-end grouping for waveband switching in WDM mesh networks," *Int. Conf. Commun.*, vol. 3, pp.1807–1812, May 2005.
- [5] X. Cao, V. Anand, Y. Xiong, and C. Qiao, "A study of waveband switching with multilayer multigranular optical cross-connects," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 1081–1094, Sep. 2003.
- [6] 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 J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no.6, pt. Supp., pp. 22–31, Aug. 2008.
- [7] ITU-T G.707 : Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH) <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.707/en>
- [8] ITU-T G.709 : Interfaces for the optical transport network <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.709/en>
- [9] S. Mitsui, H. Hasegawa, and K. Sato, "Hierarchical Optical Path Cross-Connect Architecture Using WSS/WBSS," *Photonics in Switching*, S-04-1, Aug. 2008.
- [10] K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, S. Kamei, H. Takahashi, and M. Okuno, "Monolithically Integrated Waveband Selective Switch Using Cyclic AWGs," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) 2008*, Brussels, Belgium, Paper Mo.4.C.5, Sep. 2008
- [11] K. Ishii et al., "An Ultra-compact Waveband Cross-connect Switch Module to Create Cost-effective Multi-degree Reconfigurable Optical Node," *ECOC*, Paper 4.2.2, Sep. 2009.
- [12] N. Singhal, C. S. Ou, and B. Mukherjee, "Cross-sharing vs. self-sharing trees for protecting multicast sessions in mesh networks," *Computer Networks Journal*, Special Issue on Optical Networks, vol. 50, pp. 200–206, Feb 2006.
- [13] N. Singhal and B. Mukherjee, "Dynamic provisioning of survivable multicast sessions in optical WDM mesh networks," *Optical Fiber Communications Conference*, pp. 207–209, March 2003.
- [14] J. Y. W. Xijun Zhang and C. Qiao, "Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 18, pp. 1917–1925, December 2000.
- [15] Y. Morita, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, K. Yamada, M. Jinno, "Optical Multicast Tree Construction Algorithm Considering SNR Constraint and 3R Regeneration", in *Proc. ECOC*, Vol. 3, pp. 155-156, Sep. 2008.
- [16] X. Cao, V. Anand, Y. Xiong, and C. Qiao, "A Study of Waveband Switching With Multilayer Multigranular Optical Cross-Connects," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 1081-1094, Sep. 2003.
- [17] Y. Hachisuka, H. Hasegawa, and K. Sato, "Impairment-Aware Multicast Tree Design for Hierarchical Optical Path Networks," *Photonics in Switching 2012*, Th-S33-O08, Sep. 2012.
- [18] ITU-T G.694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
- [19] K. Suzuki, Y. Ikuma, E. Hashimoto, K. Yamaguchi, M. Itoh, and T. Takahashi, "Ultra-High Port Count Wavelength Selective Switch Employing Waveguide-Based I/O Frontend," *OFC2015*, Tu3A.7, Mar. 2015
- [20] Y. Taniguchi, Y. Yamada, H. Hasegawa, and K. Sato, "Coarse granular optical routing networks utilizing fine granular add/drop," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Volume:5, Issue: 7, pp. 774 - 783, Jul. 2013.

この研究は、平成22年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成23～25年度に実施されたものです。