

超大容量映像配信ネットワークに向けた波長群マルチキャストの実現及び構成に関する研究

長谷川 浩

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

Grooming and Design of Waveband Multicast Trees in Hierarchical Optical Path Networks for Future Video Distribution Services

Hiroshi Hasegawa

Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, JAPAN

1. まえがき

ブロードバンドアクセスの急速な進展により、バックボーンネットワークにおけるIPトラフィック量は大幅に増加し続けている。また、高精細映像配信等の大容量を要求する新たなサービスの登場により、今後もこの傾向が続くと予想される。そこで現在、大容量化・低消費電力化を目指し、光ファイバ中に多重された波長の異なる多数の信号(波長パス)を、波長をラベルとして電気信号への変換なしに光スイッチで経路制御する光ネットワーク(一階層光パスネットワーク)が実用化され始めているが、将来予測される膨大なトラフィックは必要なファイバ数とのべ波長パス数の大幅な増大を意味する。ファイバ数や波長数の増大は、波長単位で経路制御する光スイッチの規模拡大をもたらし、ノードの高コスト化を招く。そこで、複数の波長パスを波長群パスとして論理的に束ね一括して中継処理し、光スイッチ規模を抑制しながら超大容量通信を実現する多階層光パスネットワーク[1-3]が検討されている。多階層光パスネットワークを効率的に実現する上では、クロスコネクトノードのアーキテクチャ[4-7]、波長群パスを扱う上で必要となる合分波器[8, 9]、そしてパスの階層構造を維持しながら適切に波長・波長群番号と経路を割り当てるネットワーク設計手法[10, 11]の連携が不可欠である。

一方、従来型の光パスネットワークにおいては、映像配信等のP2MP(point to multipoint)サービスを効率化するために、光パスマルチキャスト技術が検討されてきた。IP等の電気処理に依存するネットワークでは、データの複製を電氣的に作成することで複数宛先へのデータ配信を可能にする。これに対し、光ネットワークでは、スターカプラと呼ばれる光の合流・分配を実

現する受動素子を用いて、効率的にデータの複製を実現する。一方で、光パスネットワークでは光パスを電気信号への変換なしに経路制御するため、送信元から受信先に至るまで同一の波長が使用され(波長連続性制約)、かつ経由する光ファイバの中で、他の全ての光パスと異なる波長を用いていることが必要である。波長連続性制約は、マルチキャスト通信を行わないネットワークにおいても、光パスの経路と波長割当を適切に割り当て光ファイバ資源の最小化を目指す最適化を極めて困難(NP完全)にする。しかし、光パスマルチキャストでは、マルチキャストする通信経路の最適化(シュタイナー木構築問題)自体がすでに計算コストの高い問題で有り(NP困難)、複数の通信の関係性を考慮しながらネットワーク全体での光パスの配置の準最適値を導くことが一つの大きな課題である。

本研究では、波長群パスによる超大容量化の可能性と、光パスマルチキャストの重要性に鑑み、階層化光パスネットワークにおける効率的なマルチキャスト通信の実現を目指した。これにあたり、階層化光パスネットワークのノード装置におけるマルチキャスト動作の実現法をまず示した。続いて、波長マルチキャストツリー設立要求の集合として与えられる通信需要を、的確に波長群マルチキャストツリーに収容してこれを最適化し、占有ハードウェア量を削減する、新たな波長群マルチキャストネットワーク設計手法を新たに提案した。この手法では、波長マルチキャスト通信相互間の類似性を測る尺度を新たに導入し、互いに類似したと見なせる波長マルチキャスト設立要求を探索する。続いてこれらの要求を波長群マルチキャストツリー設計として定式化し、単一のシュタイナー木構築問題として整数線形計画問題とし、解決する。数値実験により、

光ノード装置における占有ポート数が、従来型の一階層型光パスネットワークにおけるそれと比較して大幅に削減されることを示した。

2. 階層化光パスノードでのマルチキャスト実現

光ファイバ通信で一般的である高密度の波長多重通信 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) では、複数の波長の異なる信号を多重して光ファイバ中を伝送し、伝送後に波長が異なることを利用して分離することで、単一光ファイバをあたかも複数の光ファイバが並列に存在するように扱い、大容量通信を実現している。具体的には、C帯と呼ばれる特定の周波数領域において、ITU-T で国際的に標準化された等間隔周波数グリッド上で定義される波長が用いられる。現在一般的であるのは、100GHz 間隔の 40 波長、50GHz間隔の80-96 波長である。

これら多数の波長を、適当なルールに従って幾つかのグループに分割し、可能な限りこのグループ単位でルーティングするのが多階層光パスネットワークである。分割後の波長番号のグループは波長群と呼ばれ、パスは波長についても波長群についても定義される。また、波長パスは必ず波長群パスを経由して伝送される(図1)。なお、以降では、通常のpoint to point のパスを単にパスと呼び、point to multipoint のマルチキャストツリーを単にツリーと呼ぶ。ツリーも波長及び波長群それぞれに定義され、波長ツリーは波長群ツリーのみに含まれる。

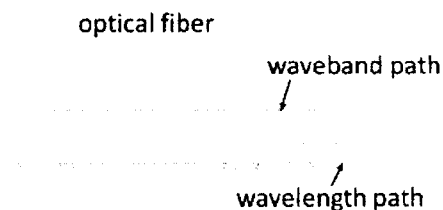


図1 波長パス・波長群パス・ファイバの関係

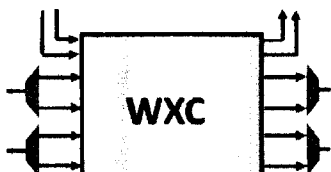


図2 一階層型OXC

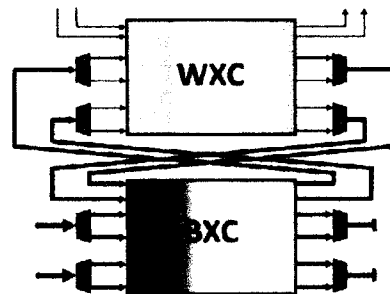


図3 階層型OXC(HOXC)

波長パスを扱う光クロスコネク(Optical Cross-connect, OXC)は図2に示すような構造を持つ。一方、波長パスと波長群パスの階層化光パスを扱う光クロスコネクノードは、一般に、図3に示すように波長群パスを扱う波長群クロスコネクと、波長パスを扱う波長クロスコネクとをスタックした構造を持つ。階層化光パスネットワークでは、可能な限り波長群パス単位でのルーティングを行う。また、波長パス単位での処理が必要となる、波長パスのadd/drop 処理や、複数の波長群パス間で、包含されている波長パスを入れ替えるgrooming 処理を行う際には、当該波長群パスは一端そのノードで終端され、波長パス毎に分解された上で波長クロスコネクにてルーティングが行われる。

波長群クロスコネクおよび波長クロスコネクの実現には、平面光波回路等で実現された分波器・合波器[9] とマトリクススイッチを組み合わせるアーキテクチャ[5] と、波長群選択スイッチ[12] および波長選択スイッチを組み合わせたアーキテクチャ[6] (図4)が主に想定される。本研究では近年の波長選択スイッチの普及とスイッチ規模削減に向けた検討の進展に鑑みて、図5に示す、add/drop部分を分離した、選択スイッチベースのノードアーキテクチャを仮定して議論を行った。この選択スイッチベースのノードでは、入力光ファイバからの信号はスターカプラにより複製されて全ての選択スイッチに配信され、各選択スイッチ側ではいずれの入力ファイバからの信号を出力するかを選択する。複数の波長群選択スイッチが、同一入力ファイバからの信号を選択したとき、波長群パスのマルチキャスト動作が実現される。この際、電気信号への変換を経ない、受動素子であるスターカプラのみを用いた信号複製のため、入力と出力側の双方で波長群パスは同一の波長群を用いるという制約は付与されるものの、効率的なマルチキャストが可能になる (図6)。

波長群マルチキャストの実現で必要となるもう一つの処

理が、波長群マルチキャストツリーに含まれている幾つかの波長マルチキャストツリーの一部から信号を受信インターフェースまで導く処理(drop 処理)である。このdrop 処理においては、波長群クロスコネクにおいては、隣接ノードへ配信される信号と、波長クロスコネクに導く信号の双方を出力し、波長クロスコネクにおいてはdrop 処理が必要となる波長のみを抽出するという形で実現する。

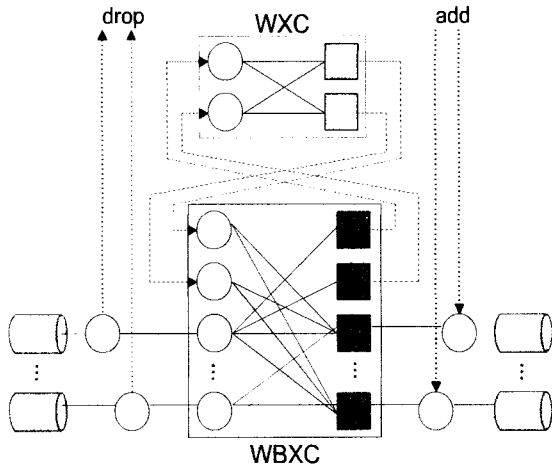


図 4 従来型選択スイッチベース HOXC

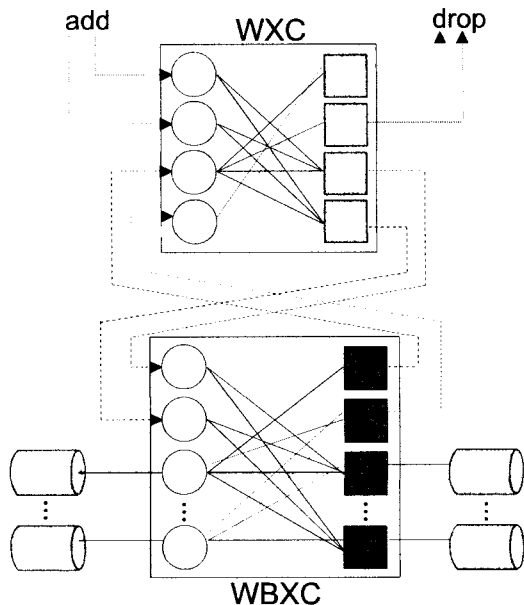


図 6 add/drop 分離型選択スイッチベース HOXC

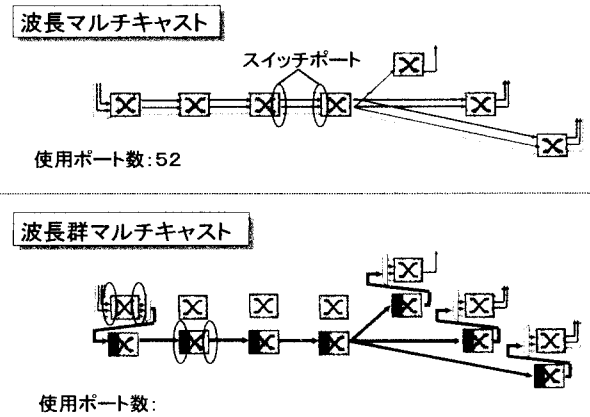


図 6 ポート数削減の例

3 マルチキャスト需要の類似性に基づくツリー集約を用いた波長群マルチキャストツリー構築法

3.1 マルチキャスト需要の類似性の尺度

前節で述べたように、多階層光パスネットワークにおいては複数の波長パスが集約され、波長群パスに收容される。波長変換のための装置を仮定せず、ある波長パスが複数の連続した波長群パスを経由する場合、それらの波長群パスは同一の波長群に対応していなくてはならない。また、波長群パスには適切な経路・波長群番号が与えられる。以上のプロセスを適切に実施し、最終的に必要となるファイバ数およびノードのハードウェア規模を極力少なくすることが目的となる。

後者の波長群パスの経路・波長群最適化に関してはこれのみをとってもNP完全で計算困難である。しかし前者は多階層光パスネットワークに特有の最適化であり、特に波長群パスをどのノード間にどれだけの本数を設定するか、および各波長パスをいずれの波長群パスに收容するかについても高い自由度がある一方で、探索領域が広大であって続く問題が計算困難であることから、目的関数を直接最適化することは難しく、近似的な尺度を導入して前者の課題について準最適解を得た後、後者の課題を近似的に解くことが一般的であり、おそらく現実的なアプローチである。

これまで、このパス配置最適化問題においては、始点・終点に近い波長パスの集合を探索し、これを波長群パス網に同時に收容するという戦略が有効であることが示されている [11]。この戦略の有効性は、始点・終点に近い波長パスを適切な地点で一端集約し、集約後に単一の波長群パスに收容していること、この波長群パスの利用率が高く、

かつ波長単位の処理をせずに多くの中継ノードを経由することから生まれている。

波長ツリーでは終点の数が複数存在しうることから、同一の波長群マルチキャストツリーに効率よく収容できるということの評価の上では、全く別個の評価尺度を導入する必要がある。そこで我々は、各ツリーにおける終点の集合について、集合の拡張と、一般化した包含関係を定義して、包含に最低限必要な集合の拡張度合いを尺度とする方式を提案する。

3.2 k次拡大と一般化包含関係

無向グラフ $G = (V, E)$ (V, E : グラフ中のノード及びエッジ全体の集合) において、ノード集合 $V_0 \subseteq V$ の k 次拡大 $V_0^{(k)}$ を以下で定義する。

$$V_0^{(k)} = \left\{ v \in V \mid \min_{m \in V_0} \text{hop}(m, v) \leq k \right\}$$

ただし、 $\text{hop}(m, n)$ ($m, n \in V$) は、 m から n までの最短のホップ数(たどり着くために最小限必要な経路リンク数)である。

このとき、二つのノード集合 $V_1, V_2 \subseteq V$ 間の“距離 d ” を以下で定義する。

$$d(V_1, V_2) = \min_k \{ V_1 \subseteq V_2^{(k)} \text{ or } V_2 \subseteq V_1^{(k)} \}$$

3.3 一般化包含関係に基づく波長ツリー集約および波長群ツリー最適設計法

Super headend より多数の Headend への映像配信アプリケーションを念頭に置き、始点及び終点集合対で与えられる波長ツリー要求について、全てのツリーの始点は同一であるとする。ただし、終点集合については必ずしも一致しないものとする。この時、提案する波長ツリー集約手続きの概要を以下に示す。

(一般化包含関係に基づく波長ツリー集約法)

波長群内の波長数を B とする。与えられた波長ツリー設定要求 $T = \{t_1, \dots, t_D\}$ において、互いの終点集合の距離が最小となる波長ツリー要求対を選ぶ。続いてこれらの集合の和集合を取り、和集合から最も距離が近い別の波長ツリー要求を選び、さらに和集合とする。この手続きを、和集合を構成する波長ツリー要求の個数が B となるか、距離が閾値(別途定義)がまで継続する。これらの波長ツリー要求を

グループ化し、波長ツリー設定要求集合 T より除く。これを T が空集合となるまで繰り返す。

上記で得られた波長ツリー要求の各集合について、共通の始点から、波長ツリーの終点の和集合を端点とする最小重みツリーを整数線形計画問題として定式化し、IBM CPLEX 等のソルバによって解く。(上記集約により単一ツリーの構築問題に帰着されるため、最適木を直接計算した。定式化の詳細は本研究に関わる学会原稿等をご覧ください)

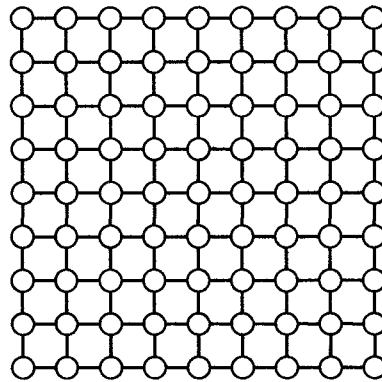


図 7 9x9 正方格子型トポロジ

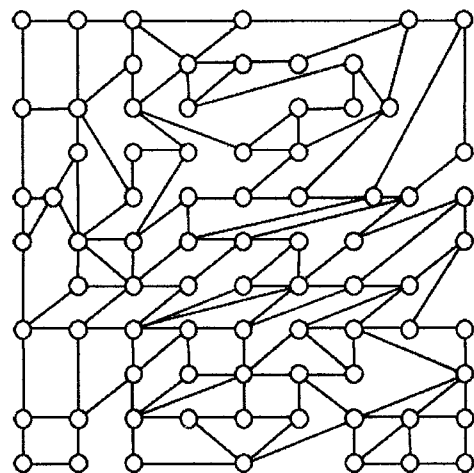


図 8 British Telecom ネットワーク

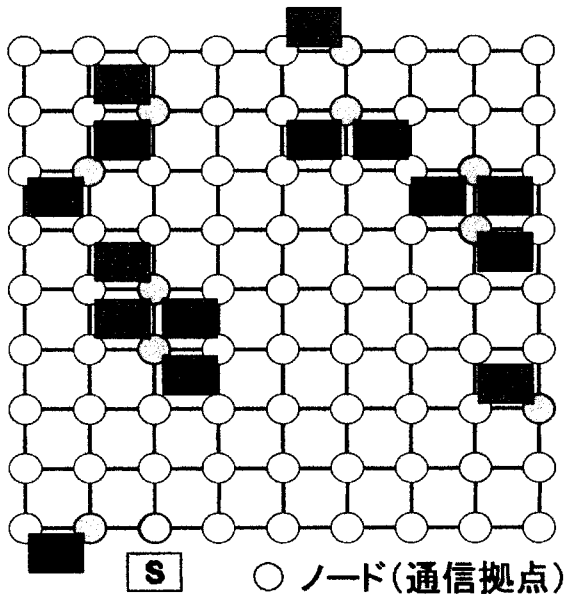


図9 始点・終点配置の例

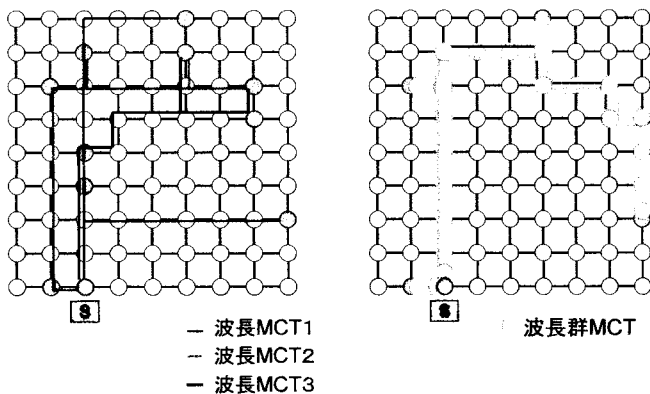


図10 波長MCTの構築 図11 波長群MCTの構築

4 数値例

光信号を直接処理可能なノード装置は相対的に高価であり、そのハードウェア規模は、アーキテクチャにより異なるが、一般的には入出力ポート数で見積られる。以下では、従来の一階層型光パスネットワークにおいて波長ツリーの収容に必要となるポート数と、多階層型光パスネットワークにおいて、波長群ツリーの収容に必要となるポート数を比較し、波長群ツリーとして集約することで大きくポート数が削減されることを示す。

本評価では、7x7および9x9の正方格子形ポロジ(9x9のみ図7)およびBritish Telecomネットワーク(図8)を用い、各隣接ノード間には十分な本数のファイバが存在するものとする。各ファイバには80個の波長が収容され、この波長は各々が4もしくは8個の波長のグループとなる、20もしくは

10個の波長群に均等に分割されているものとする。

単一のSuper headendより、複数のheadendへの配信を模擬するため、まず一つの点をランダムに選んでSuper headendとなる始点とし、残りの点からランダムに選んだ20点をheadendの集合とした(図8)。各波長ツリー設立要求は、この始点から、後者の点集合からランダムに選択した5点への配信を実施するツリーの構築要求として与えられるものとする。波長ツリー要求を複数与え、前節で示した提案法により適宜波長群ツリー要求としてまとめた上で、シュタイナー木構築問題を解いて波長群ツリーを決定する。また、波長群ツリーに集約を行わず、各波長ツリー設立要求に対してシュタイナー木構築問題を解いた、一階層形光パスネットワークにおける最適波長ツリーも算出し、比較に用いる(図9および10)。

以上の手続きを20回繰り返して、ポート数を平均化する。続いて、多階層光パスネットワークで必要となるポート数を、一階層形光パスネットワークのそれで正規化した値を図12に示す。効果はトポロジに依存するものの、適切な集約を実施することで大きくポート数が削減できることが示されている。

5 むすび

本論文では、波長マルチキャストツリーを論理的に束ねた波長群マルチキャストツリーの階層化光パスネットワークへの導入と、波長群マルチキャストツリーの最適構築による利用ハードウェアの最小化を提案し、数値実験によりスイッチポート数の削減効果を明らかにした。

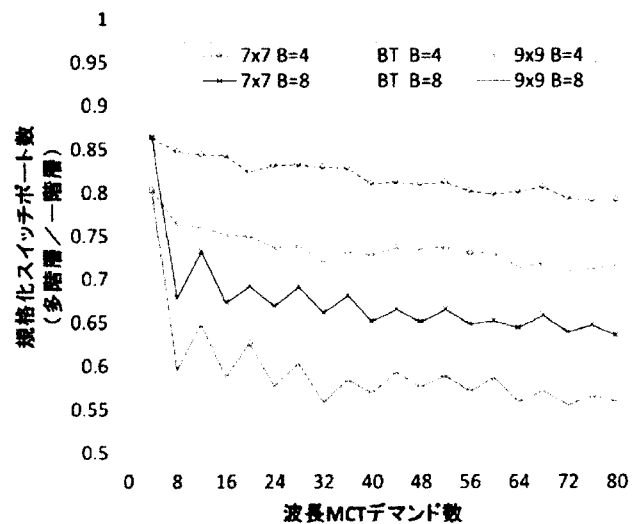


図12 提案手法におけるポート数削減効果 (B: 波長群あたりの波長数)

6 関連研究発表

1. 蜂須賀 悠介, 長谷川 浩, 佐藤 健一, 「階層化光パスネットワークにおける波長群マルチキャスト配信」電子情報通信学会2011年総合大会, 2011年3月

2. Yusuke Hachisuka, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato, “Design Algorithm of Waveband Multicast Tree in Hierarchical Optical Path Networks that Utilizes Grouping of Destination Node Sets,” Proc. SPIE 8310, 831003 (2011), 2011年11月

3 蜂須賀 悠介, 長谷川 浩, 佐藤 健一, 「受信ノード群間の一般化包含関係を用いた波長群マルチキャストツリー設計法」フットニックネットワーク研究会学生ワークショップ予稿集, 2012年3月

7 謝辞

本研究を支援くださいました貴財団に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. Harada et.al., Proc. OFC, pp.356-358, Feb. 1999.
- [2] L. Noirie et.al., Proc. ECOC, pp. 269-270, Oct. 2000.
- [3] K. Sato and H. Hasegawa, IEICE Trans. Commun., vol. E90-B, no. 8, pp. 1890-1902, Aug. 2007.
- [4] X. Cao et.al., Journal of Optical Networking, vol.5, no.12, pp.1043-1055, Dec.2006.
- [5] S. Kakehashi et.al., IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, no. 10, pp. 3174-3184, Oct. 2008.
- [6] S. Mitsui et.al., Proc. Photonics in Switching, S-04-1, 2008.
- [7] R. Hirako et.al., Proc. Photonics in Switching, Fr12-2, 2009.
- [8] S. Chandrasekhar et.al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 17, No. 3, pp. 579-581, Mar. 2005.
- [9] S. Kakehashi et.al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 16, pp. 1197-1199, Aug. 15, 2007.
- [10] S. Verma and J. P. Jue, OSA J. Opt. Netw., vol. 5, no. 11, pp. 790-806, Nov. 2006.
- [11] I. Yagyu et.al., IEEE JSAC, Supp. on OCN, vol. 26, no. 6, Aug. 2008, pp. 22-31.