

| | | | |
|---------|------------------------------|-------|--------------|
| 氏名（本籍地） | 福島 裕介 | | |
| 学位の種類 | 博士（情報科学） | | |
| 学位記番号 | 情博第432号 | | |
| 学位授与年月日 | 平成21年3月25日 | | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 | | |
| 研究科、専攻 | 東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）情報基礎科学専攻 | | |
| 学位論文題目 | 高速光デバイスによる大規模光スイッチ構成方式 | | |
| 論文審査委員 | （主査）東北大学教授 | 堀口 進 | |
| | 東北大学教授 | 亀山 充隆 | 東北大学教授 青木 孝文 |
| | 東北大学准教授 | 姜 暁鴻 | |

論文内容の要旨

第1章 序論

インターネット利用人口の増加とインターネット利用の多様化に伴い、ネットワークトラフィックの爆発的な増加が懸念されている。全てのデータ伝送を光で行う完全光ネットワーク（AON: all optical networks）は、高速かつ大容量のデータ伝送を実現する技術として注目されている。現在の電気信号による経路制御方式と異なり、光信号のみの伝送を行うことで、ルータの消費電力や発熱量が低減でき、高速かつ大容量な光信号の特性を活かすことができる。そのため将来の高速かつ大容量のネットワーク構成技術として期待されている。将来の大規模なAONでは、ルータやスイッチなどの経路制御装置の計算量の増大がネットワーク全体のボトルネックになるため、高速な経路制御を可能とするスイッチ構成方式が必要不可欠である。特に、伝送容量の増加を可能とする波長分割多重（WDM:wavelength division multiplexing）技術によって複数の波長を持つ信号の切り替えが必要となるため、光波長の粒度で切り替え可能な高速かつ低コストなスイッチ装置を実現するスイッチ構成方式の検討が必要である。本研究では、将来の大規模な高速光ネットワーク実現のために、WDMネットワークにおける光スイッチ構成の要である光クロスコネクタ（OXC:optical cross-connect）と波長分割多重クロスコネクタ（WXC:WDM cross-connect）構成方式の両方についてナノ秒の光パケット交換が可能なデバイスに基づいた大規模構成法の検討および新しい構成法の提案を行った。

第2章 高速光ネットワークとスイッチデバイス

WDMネットワークで必要となるスイッチ構成方式の要件を明らかにするために、WDM技術やスイッチ装置について説明している。OXC構成方式として方向性結合器に基づいた多段構成方式、WXC構成方式としてアレイ導波路回折格子をそれぞれ重要な構成要素として注目し、構成方式の要件を分析するために、従来の構成方式を比較検討した。

第3章 光クロスコネクタ（OXC）構成方式

光クロスコネクタ（OXC）は、スイッチ装置に対する任意の入力ファイバから伝送される信号を任意の出力ファイバに切り替えることを可能にする。マルチ $\log_2 N$ 多段光スイッチ構成方式[1]は、複数のスイッチプレーンを縦に重ねた構成になっている（図1(a)）。各スイッチプレーンは、方向性結合器（DC:directional coupler）を用いたBanyan型結合で構成される。DCはナノ秒の高速信号切り替えが可能であり、マルチ $\log_2 N$ 多段光スイッチ構成は少ないDC数で構成できることから、次世代のOXC構成として注目されている。複数の信号が単一のDCに同時に入るとクロストークが起こるため、DCに基づく多段スイッチ構成では、クロストークを回避するための適切な経路制御が

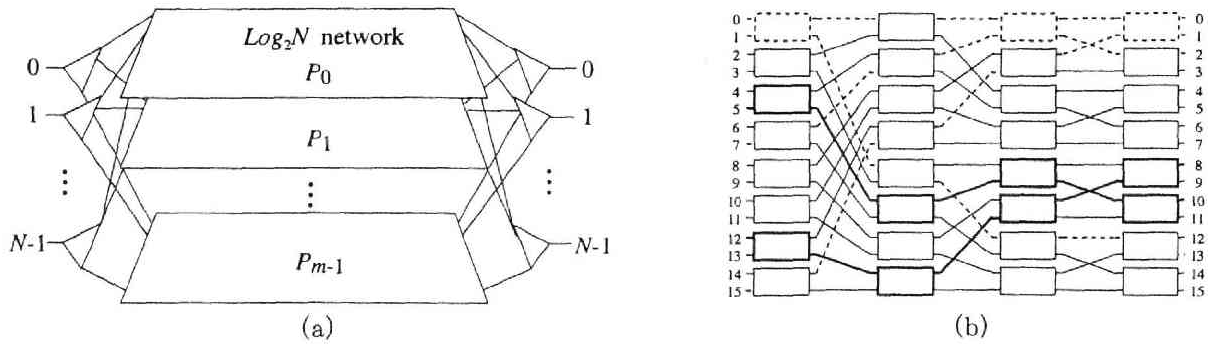


図 1: マルチ $\log_2 N$ 多段光スイッチ (a) と Banyan 型スイッチプレーン (b) .

必要不可欠となる。各リクエストに対する経路制御はスイッチプレーンの割当てによって実現される。これはスイッチプレーン割当てアルゴリズムと呼ばれる。DC の制御は電気で行うため、単一のスイッチプレーンに割り当てられるリクエストが集中すると、スイッチプレーンのピーク電力に対するコストの増加が無視できない。加えて、過負荷によるスイッチプレーンの早期故障が問題となっていた。本研究では、将来の大規模 OXC 構成実現のために、より優れた負荷分散型割当てを実現する Load Sharing (LS) アルゴリズムの提案を行った。そして、提案アルゴリズムと従来の割当てアルゴリズムをコンピュータシミュレーションに基づいて定量的に解析することによって、各アルゴリズムの性質の分析を行った。その結果、LS アルゴリズムが他のアルゴリズムと比べて優れた負荷分散の実現が可能であることを明らかにした。

第 4 章 自己ルーティング型波長分割クロスコネク (WXC) 構成方式

波長分割多重クロスコネク (WXC) は、スイッチの任意の入力ファイバに多重化されてる信号を任意の出力ファイバに伝送するクロスコネクである。WDM ネットワークでは、多くの伝送波長が多重化されるため、WXC はかつてないほどの入力信号数を同時に切り替える必要がある。一般的に複雑な経路制御機構を持つ WXC は、切り替え速度がネットワーク全体のボトルネックとなるため、WXC は入力数の増加に対しても妥当な計算量で経路割当て可能となる設計が求められる。加えて、WXC では波長変換器を用いて同波長の信号による衝突を回避する必要があるため、出来るだけ少ない変換器数で構成可能な設計が求められる。アレイ導波路回折格子型ルータ (AWGR: arrayed waveguide grating router) [2] は、低コストで大規模な WXC 設計を可能にする光デバイスとして注目されている。また、リクエストの宛先情報から経路がただの一点に決まる自己ルーティング構成を利用することで単純かつ高速な経路制御を実現することができる。本研究では、高速な経路制御が可能な自己ルーティング型相互結合網に着目し、AWGR に基づいたクロスコネクの入力数の増加に耐える構成の提案を行った。また、提案構成の特性を明らかにするために定量的かつ定性的な解析を行った。入出力ファイバ数 $f = 2$ 、伝送波長数 $w = 8$ の時の提案構成例を図 2 (a) に示す。提案構成は、出力ポートで信号の多重化が可能な波長多重スイッチ (WMS: wavelength multiplexing switch) と AWGR を組み合わせることで自己ルーティング機能、そして各経路で信号の衝突が起こらないことが保証されるノンブロッキング構成が実現できる。その結果、入力数に関わらず $O(1)$ の高速な経路制御を実現することができる。図 2 (b) に、3 入力 3 出力の WMS と AWGR の接続グラフの例を示す。ここで λ_i は i 番目の伝送波長を示す。提案構成の大規模化を検討するために、大規模な WXC 構成で問題となるクロストーク蓄積の評価を行った。クロストークは、スイッチデバイスが持つ信号のアイソレーション機能の欠陥や物理的な現象などによって信号の一部が漏れる現象であり、同波長のクロストークは一般的に取り除くことが困難とされる。解析の結果、提案構成が従来の構成に比べてクロストーク蓄積が少なく構成可能であることを示した。

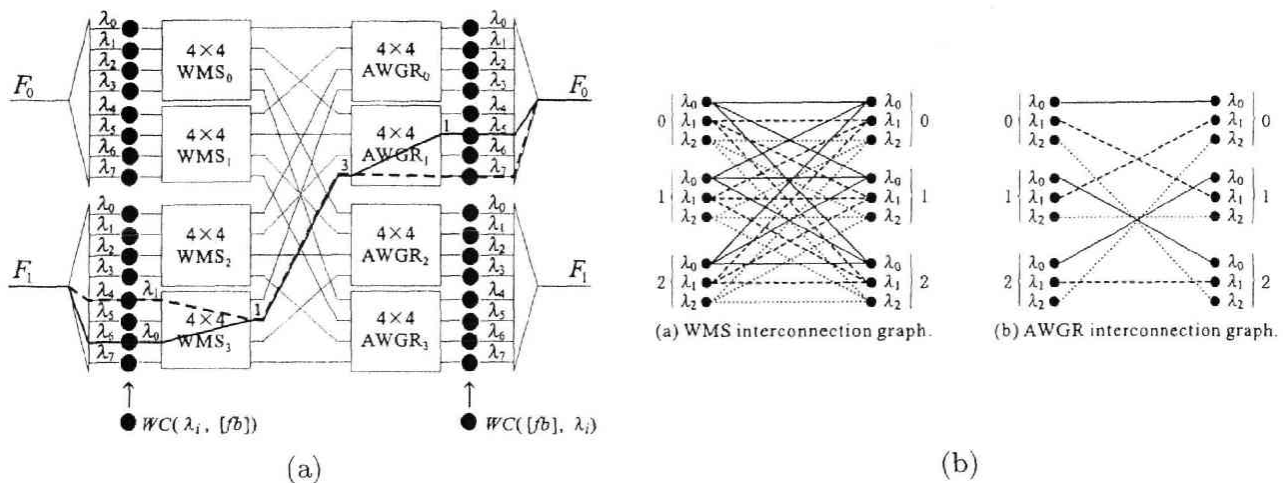


図 2: (a) AWG に基づいた自己ルーティング型 WXC 構成 ($f = 2, w = 8, n = 4, b = 2$), (b) WMS と AWGR 間のコネクショングラフの比較.

第 5 章 AWGR の周期性伝達関数に基づいた低コスト WXC 構成方式

アレイ導波路回折格子ルータ (AWGR) の信号切り替えは、光回折の自由スペクトラム領域に対して潜在的な周期性を持っていることが知られており [3], AWGR のサイズが小さくても大きな範囲の伝送波波長を扱うことができる。従って、周期性伝達関数を利用することで、WXC 構成に必要な AWGR のサイズの低減が可能である。しかしながら、AWGR に基づいたこれまでの WXC 構成方式で周期性伝達関数を利用したものはなく、従来の構成では、大きなサイズの AWGR の利用が必要不可欠であった。本研究では、初めて AWGR の周期性伝達関数の特性に基づいた WXC 構成方式の提案を行った。具体的には、AWGR の伝達関数の特性を活かすことが可能な相互結合網の開発を行い、波長変換器などの他の構成要素のコストを上げることなく AWGR のサイズの縮小化の実現を行った。

AWGR の周期性伝達関数に基づいた提案構成法を図 3 (a) に示す。提案構成方式は、高々 2 段の AWGR、マルチプレクサ、波長変換器のみで構成することができ、従来の構成と比べて、信号減衰の原因となるスイッチ段数が少ない。そのため、大規模な WXC 構成として期待できる。加えて AWGR は入力ポートと入力波長によって出力ポートが決定される受動波長ルータなので、周期性伝達関数に基づいて AWGR の出力ポートの接続先を少しずつシフトすることによって入力ポート数に対して必要な AWGR のサイズを最適化することができる。図 3 (a) から、WXC の入力数の総和と各段におけるスイッチデバイスの入出力数の総和が等しく、最適な光デバイスのサイズで構成可能であることがわかる。提案構成法の有効性を示すために、従来構成との構成コストの比較を行っている。そして提案構成について解析的にノンブロッキングの保証を行い、比較的高速なノンブロッキング経路制御アルゴリズムの提案も行っている。

伝送波長数 $w = 64$ のときの提案構成法で必要となる AWGR の最大サイズとバンド幅 (b) の関係を図 3 (b) に示す。従来の構成法で必要となる AWGR サイズ (N) と比べ、提案構成法では大幅に AWGR のサイズを縮小することができることが分かった。AWGR は、VLSI の様に基盤に集積化可能であるので、AWGR のサイズを小さくすることによって歩留まりを上げることができると考えられる。図の例で入出力ファイバ数 $f = 4$ のとき、構成 AWGR のサイズを $1/3$ 以下に抑えることが可能であるので、WXC 構成コストをさらに低減することが可能であり、また WXC 全体のサイズの低減も可能であることが分かった。

第 6 章 結言

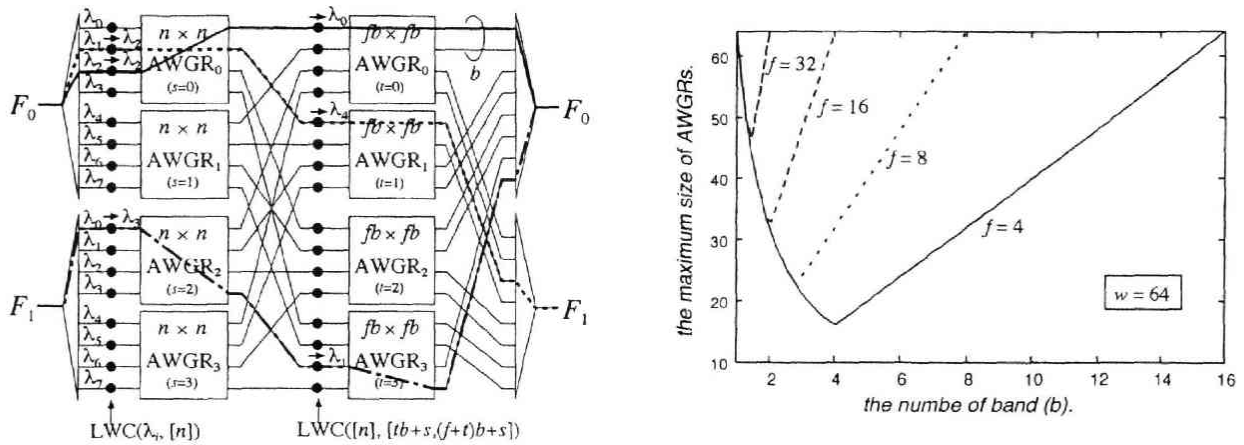


図 3: (a) $f=2, w=8, n=4, b=2$ の場合の提案構成法の例. (b) バンド数 (b) と AWGR の最大サイズの関係.

本研究では、光スイッチ構成の信号切り換えの基盤となる OXC 構成と WXC 構成に対する大規模向け構成方式の両方について、検討を行うことによって将来の高速完全光ネットワークシステムのみならず、膨大な帯域を実現する高密度 WDM 技術に基づいたネットワークのための一般的なスイッチ装置の信号切り換え速度を大幅に改善することが可能である。また、本論文の構成要素の比較は、ネットワーク設計者がスイッチ構成を考える上で役立つ情報となる。加えて、本研究で扱うような WDM 技術に基づいた相互結合網に対する研究は光通信ネットワークのみならず、グリッドコンピューティングやスーパーコンピュータ、その他の並列分散計算システムで利用可能である。著者は、これらのネットワーク構築で問題となる発熱の低減や装置の規模縮小、高速な信号切り換え機能によるバス遅延の低減等、ネットワークを必要とする様々な技術分野に寄与することができると考える。

参考文献

- [1] C. T. Lea, and D. J. Shyy, "Tradeoff of Horizontal Decomposition Versus Vertical Stacking in Rearrangeable Nonblocking Networks", *IEEE Trans. Commun.*, Vol.39, No.6 June, 1991.
- [2] K. A. McGreer, "Arrayed Waveguide Gratings for Wavelength Routing", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 62-68, Dec. 1998.
- [3] M. K. Smit and C. V. Dam, "PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications", *J. of IEEE Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 2, No. 2, June., 1996.
- [4] T. Lin, K. A. Williams, R. V. Penty, L. H. White, M. Glick and D. McAuley, "Performance and Scalability of a Single-Stage SOA Switch for 10×10 Gb/s Wavelength Striped Packet Routing", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 5, Mar. 2006.

論文審査結果の要旨

大規模光ネットワークにおいて、膨大な接続要求を直接切り替える高性能光スイッチの研究開発が重要になっている。著者は、高速光デバイスとして方向性結合器やアレイ導波路回折格子型ルータ（AWGR）の特性に着目した大規模光スイッチ構成法を考案し、ブロッキング性能やスイッチ性能などの詳細な検討を行うとともに、光クロスコネクタならびに波長分割多重クロスコネクタを実現する大規模光スイッチの構成法を明らかにした。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、光ネットワークのための多段光スイッチ結合網ならびに光スイッチデバイスの基礎的な考察を行い、光クロスコネクタならびに波長分割多重クロスコネクタを実現する光スイッチ構成方式について議論している。

第3章では、光クロスコネクタを実現するマルチ $\log_2 N$ 段光スイッチ構成法に着目し、従来のスイッチプレーン選択方式を詳細に検討し、その問題点を明らかにした。また、負荷分散が可能なプレーン選択方式を考案し、各種の性能評価によりその有用性を示した。

第4章では、波長分割多重クロスコネクタを実現する AWGR 光スイッチ構成方式を考案し、セルフルーティングでノンブロッキングであることを証明した。AWGR 光スイッチのクロストークモデルにより、従来の構成方式に比べクロストークの少ない大規模スイッチを構成できること示した。これは優れた成果である。

第5章では、AWGR の波長周回性を用いて大規模波長分割多重クロスコネクタを実現する新しいスイッチ構成方式を提案している。そのスイッチ構成方式に対する経路制御アルゴリズムを考案し、理論解析によりノンブロッキングな波長割り当て方式であることを証明した。これは重要な成果である。更に、大規模化による AWGR サイズやスイッチ段数などの評価を行い、従来の構成方式より低コストで実現できるスイッチ構成方式であることを示すなど実用上重要な成果を得ている。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、高速光デバイスによる大規模光スイッチ構成方式を新しく提案するとともに、プレーン選択方式およびスイッチ経路制御方式を考案しその有効性を実証したものであり、ネットワーク工学および情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。