

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246072

研究課題名(和文)高機能光集積化ルーティングシステムの研究

研究課題名(英文)High Performance Photonic Integrated Routing System

研究代表者

佐藤 健一 (SATO, Ken-ichi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00377805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,700,000円、(間接経費) 11,010,000円

研究成果の概要(和文)：トラフィックの増大に伴い、大容量の光ノードが必要となる。しかしながら現状のノードアーキテクチャはスケーラビリティが無く、新しいアーキテクチャの研究開発が必要となる。本研究では、ネットワーク内におけるブロッキングの要因を分析し、新しい構造のノードアーキテクチャを、複数考案した。適用するサービス形態に応じて、最適なアーキテクチャを使用することにより、超大規模の光クロスコネクタノードを実現可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The traffic increase forces the use of high port count WSSs to create large scale OXCs, however, it will be very difficult to substantially increase the WSS port count, for example ten times. To resolve this issue, we have developed various technologies. We have clarified the role of inter- and intra-node blocking in the creation of bandwidth abundant networks utilizing such OXCs. We conducted the rough investigations to identify the best arrangement that matches the envisaged requirements. The different OXC architectures that exploit intra-node blocking includes are invented. It is shown that by properly introducing a slight limitation on routing performance and by applying the contention-aware RWA algorithm, the required hardware scale can be significantly reduced while the performance offset can be marginal. As a result we succeeded in developing very large scale and cost effective OXCs.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：フォトニックネットワーク 光スイッチ 光ネットワーク 光通信

### 1. 研究開始当初の背景

光伝送技術は導入以来その後の20年間で4桁に及び伝送容量の拡大を実現し、今日のブロードバンド時代の基礎を築いた。1990年代の中頃以降、WDM (Wavelength Division Multiplexing)伝送方式が導入され、現在ではファイバ当たりの伝送容量が1 Tb/sを超える方式が実用化されるとともに、100 Tb/sを超える容量の伝送実験が行われている。一方、ノードにおけるルーティング/スイッチング容量は、現在の最大級の電気ルータで1架当たり1.9 Tb/s (WANカウンタ)程度であり、光ファイバの伝送可能容量と比べて小さな容量しか転送できない。また、電気ルータのスループットの拡大は既に飽和傾向に有る。実際、CISCO CRS-1 (スループット640 Gbps, LANカウンタで1.2 Tbps)に代表される大容量コアルータは、1架当たりの消費電力は10 kwを優に超え、スループット並びに消費電力ともに限界に達しつつ有る。将来予測される2桁から3桁のトラフィック増(10~20年後)に対応するためには、革新的なネットワーク技術の導入が必要となる。

現在、世界の主要なキャリアでは、IPレイヤをより低位レイヤ(レイヤ1または2)の転送によりカットスルーする通信方式の導入を加速している。その中で、申請者が提案した光パスを用いる方式は大容量性、低消費電力性の観点で極めてインパクトが大きいことが認識され、現在ROADM (Reconfigurable Optical ADD/Drop Multiplexer)を用いて世界的に広く導入が進みつつある。光パスのルーティンに必要な消費電力は、同じスループットのルータと比べて、2桁から3桁小さい(勿論機能は異なる)。しかしながら光パスルーティングの導入は、現在リングネットワークや小規模なノードに限定され、メッシュネットワークを含む大規模なノードへの導入は実現されていない。その主な理由は、

(1) 現行のROADMシステムではノードで始終端する信号のadd/drop部における波長や方路選択の自由度(Colorless/Directionless/Contentionlessと呼ばれる)が大きく制約される構成

(2) 効率的な大規模光ルーティングスイッチが経済的に実現できない  
にある。本課題に関する研究開発は世界的に加速されつつ有るものの、有効な解決手段は未だ見いだされていない。本提案研究はこれを解決する技術を開発するものである。

### 2. 研究の目的

上記2つの目標課題の各々に関する研究目的を以下に示す。

(1) ノードで始終端する信号のadd/drop部の波長や方路の自由度(Colorless/Directionless/Contentionless)を実現する経済的なハードウェアの実現

研究期間内に、大規模光ルーティング装置構成(入/出力ファイバ各々10本以上、1ファイバ当たりの波長多重数100程度)に適用できるColorless/Directionless/Contentionless光信号add/drop部の実現性を実証する。これを実現する上でキーとなる光モジュールを光集積導波回路技術を用いて試作する。経済的な導入には、トラフィックの増加に応じた拡張性がキーとなる為、波長毎、或は複数波長毎(例えば、4波又は8波毎)に拡張できるモジュラー構成を実現する。

(2) 効率的で大規模な光ルーティングスイッチの実現

大規模光スイッチを構成する上でキーとなる、各種の粒度の光信号を合分波する新しい光機能モジュール、大規模光ルーティング用光機能モジュール、を光集積導波回路技術並びに空間光学系を一部適用して試作し、大規模な光ルーティングスイッチの実現性を実証する。開発したモジュールを利用したスイッチ部と上記add/drop機能モジュールを組合せ、多ノードの伝送実験を行いノード全体としての機能と特性を実証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、ルーティングノード用光機能デバイスを開発する。新しいアイデアに基づく幾つかのキーデバイスの実現性・有用性を、試作・評価を通して実証する。研究手順は、23年度に、(1)信号のadd/drop部に関する所要の自由度を実現する提案方式の詳細検討を行い、最も有効と思われる複数の構成について、光集積回路チップを試作し特性評価を行う。その結果、最適なものを決定する。(2)に関して高密度集積化ツリー型スイッチPLCチップ試作と評価を行う。24年度にこれらをモジュール化し、機能検証を行うとともに他の必要な部品開発を行う。最終年度では、システムの全体実験を行う為に必要な機能をそろえ、伝送実験により提案方式のフィジビリティを評価する。本研究課題では、世界最先端の性能を有する光機能集積回路を試作する為に、同分野で最も高い技術力を有する国内企業と共同研究を行う。

### 4. 研究成果

Contentionless機能を緩和しC/D機能C/Nとも記される。N: non-directional)でチューナブルフィルタ機能(コヒーレント検波、WSSの利用など)と組み合わせたもの、或はクライアントサイドに大規模なファイバクロスコネクタを導入した構成を広く検討した。一方、ダイナミックな光パス設定において、ノード内ブロッキングを考慮したルーティングアルゴリズムを適用することにより、ある条件下で、C/Dと分割型C-FXCを組み合わせた構成でブロッキング率がC/D/Cと比べて殆ど低下しないことが示されている。しかし、ノード内ブロッキングを考慮するには、全てのノードの詳細な設備状況(ノードのフ

ファイバ数、チャンネルバンクの分割数、各チャンネルバンクの実装数、C-FXC の分割数等)並びに各ノードの状況変化の度にデータベースの更新が必要となり、ネットワーク運用に際して大きな負荷となる可能性がある。

本研究では特に、C/D/C の実現に必要なとなる光スッチ規模を削減するためには、add/drop 率に制約を設けることが有効であることを明らかにした。ここで add/drop 率とはノードで終端する光パス数と全入力ファイバから入力される光パス数との比で定義される。勿論、この add/drop 率をあまり低く設定すると、ネットワークの端に位置する通過トラフィックが少ないノードでは、スルースイッチ等に無駄が生じるため、適切な値を選択する必要がある。add/drop 率に関する制約はネットワークで一律の値を与える方式が最もシンプルである。これにより、add/drop 部が簡略化される。またネットワークの設計/動的な光パスの設定に当たっては、個々のノードの諸条件を一切考慮すること無く上記の制約値のみを考慮した RWA(Routing and Wavelength Assignment)アルゴリズムを用いれば良く、運用もシンプルである。また、他のメリットとして、ノードの最適化(アンプのゲイン、用いるスターカップラのポート数或は損失の最適化)が図れる点も重要である。なお、add/drop 率に制約を与える方法としては、グループによる制約(ルーティングのための波長群とは直接リンクしない)を与える方式や、各波長レベルで制約を与える方式があり、その各々にに関して、全ての波長パスに関する制約、ファイバ毎の制約、波長インデックス毎の制約など、各種の制約の与え方とその効果が明らかにした。

C/D/C を実現する方式として各種の方式を述べたが、効率的なチューナブルフィルタが実現できれば極めて有効である。将来的にコヒーレント受信が全てで利用されれば、チューナブルフィルタ機能が自動的に実現されるが、全ての領域でコヒーレント伝送が適用されることは想定できない。固定グリッドで簡単にチューナブルフィルタを実現する方法は、例えば  $1 \times L$  ( $L$ :ファイバ内の波長数)の AWG と  $L \times 1$  の光スイッチを組み合わせれば可能である。しかし、 $L$  は例えば 96 と大きな値であり、スイッチ規模が大きくなる。最近、複数段の波長選択を利用することにより、スイッチ規模を大きく削減する方法を提案した。例えば  $N$  段の選択を用いることにより達成されるスイッチ数の下限は  $N \times (L-1)^{1/N}$  となる。本研究では、例えば 2 段型の構成、即ち  $1 \times 9$  と  $1 \times 11$  のサイクリック AWG 並びに  $1 \times 9$ 、 $1 \times 11$  のスイッチを組み合わせたものを、PLC チップ ( $15 \times 70 \text{ mm}^2$ ) 上にコンパクトに集積化した。1 段構成と比較してスイッチ規模は約 80% 削減できることを明らかにした。

以上の研究開発成果をもとに、新しいノード構成を提案し、プロトタイプシステムを試

作し、伝送実験によりその有効性を実証した。以下に結果のポイントを述べる。現在の OXC は波長選択スイッチ(Wavelength-selective switch: WSS)を用いており、大規模化にはポート数の大きな WSS が必要となる。しかし、実用的な WSS のポート数は 20 が限界であり、これを超える大規模 OXC の実現は困難である。そこで本研究では、 $1 \times 9$  光カプラ(Optical coupler: OC)および  $1 \times 9$  WSS を用いた小規模な  $9 \times 9$  OXC をサブシステムとして複数接続することで大規模  $64 \times 64$  OXC を実現した。また add/drop 部は所望のファイバを選択する光スイッチ(SW)と所望の波長チャンネルを抽出する光可変フィルタで構成した。本研究では PLC 技術で実装した小型  $64 \times 1$  SW および TF(Tunable filter)を用いて add/drop 構成を実装した。提案した OXC および add/drop 構成を組み合わせることで超大容量光ノードを試作し、機能実証を行った。提案ノードは 220 Tbps(43 Gbps、80 波、64 ファイバを仮定)の処理能力を有する。

開発した光ノードの構成を図 1 に示す。OXC 部は各入力ポートに  $1 \times 9$  OC、各出力ポートに  $1 \times 9$  WSS を配置した分配選択型の  $9 \times 9$  OXC のサブシステムより構成される。9 つのサブシステムを連続的に接続することで、大規模  $64 \times 64$  OXC を実現した。add/drop 部では  $1 \times 20$  WSS、 $1 \times 16$  OC、 $1 \times 8$  OC により光信号は 2,520 に分岐される。その後、 $64 \times 1$  SW により所望のファイバが選択され、最後に TF で所望の波長チャンネルを抽出する。本構成の分配割当部では 1 ファイバ当たり 80 波、ノード当たり 64 ファイバで、add/drop 率は全チャンネル数の 50% と仮定している。本構成は、サブシステムの追加で OXC 全体の処理能力を容易に拡大できる。

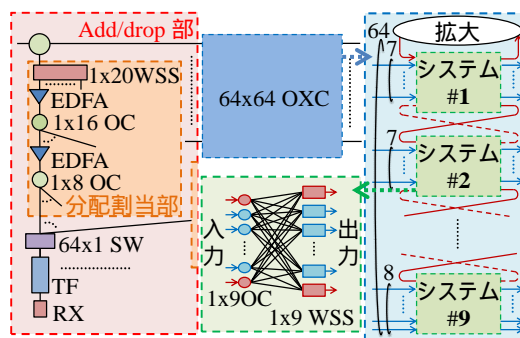


図 1 開発した光ノード構成

提案構成の性能を評価するため、サブシステムを複数経由後に抽出した信号(43 Gbps DQPSK)の符号誤り率(Bit-error ratio: BER)測定を行った。サブシステムを経由しない場合を基準とし、BER が  $10^{-3}$  におけるパワーペナルティを測定した。ペナルティはサブシステム経由数に応じて変動するが、6 段経由後であってもその最大値は  $\sim 0.25 \text{ dB}$  であり十分小さいことが確認された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

1. L. H. Chau, H. Hasegawa and K. Sato, "Performance evaluations of large-scale multi-stage hetero-granular optical cross-connects," *Optics Express*, Vol. 22, Iss. 3, pp. 3157-3168, February 2014
2. Z. Shen, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, and A. Hirano, "A novel elastic optical path network that utilizes bitrate-specific anchored frequency slot arrangement," *Optics Express*, Vol. 22, Iss. 3, pp. 3169-3179, February 2014.
3. T. Ban, H. Hasegawa, K. Sato, T. Watanabe, and H. Takahashi, "A novel large-scale OXC architecture and an experimental system that utilizes wavelength path switching and fiber selection," *OSA Optics Express*, Vol. 21 Issue 1, pp.469-477, 2013.
4. Y. Iwai, H. Hasegawa, and K. Sato, "A large-scale photonic node architecture that utilizes interconnected OXC subsystems," *OSA Optics Express*, Vol. 21 Issue 1, pp.478-487 (2013).
5. T. Ban, K. Ishii, H. Hasegawa, K. Sato, H. Takahashi, and M. Okuno, "Performance evaluation of large capacity ultra-compact waveband cross-connect," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, Issue 5, pp. 446-449, March 2013.
6. 佐藤 健一, "フォトニックネットワーク技術の展望," *電子情報通信学会誌* Vol. J96-B, No.03, pp. 220-232, March 2013. (招待論文)
7. Y. Taniguti, Y. Yamada, H. Hasegawa, K. Sato, "Coarse granular optical routing networks utilizing fine granular add/drop," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 5, Issue 7, pp. 774-783, 2013.
8. K. Sato, H. Hasegawa, and T. Watanabe, "Large scale wavelength routing optical switch for data center networks," to appear in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, No. 9, September 2013, pp. 46-52. (招待論文)
9. Z.-S Shen, H. Hasegawa, and K. Sato, "Effectiveness of wavelength/waveband conversion and its allowable cost bound for hierarchical optical path networks," *IEEE/OSA JOCN*, Vol. 5, Iss. 11, November, 2013, pp. 1262-1274.
10. T. Niwa, H. Hasegawa, K. Sato, T. Watanabe, and H. Takahashi, "A large port count wavelength routing optical switch that consists of cascaded small-size cyclic Arrayed Waveguide Gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, Issue 22, pp. 2027-2030, November 2012.
11. F. Naruse, Y. Yamada, H. Hasegawa, K. Sato, "Evaluations of different optical path add/drop ratio restriction schemes on OXC hardware scale and network resource requirement," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking (JOCN)*, vol. 4, No. 11, pp. B26-B34, November, 2012. (招待論文)
12. T. Niwa, H. Hasegawa, K. Sato, T. Watanabe, and H. Takahashi, "A large port count wavelength routing optical switch that consists of cascaded small-size cyclic Arrayed Waveguide Gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, Issue 22, pp. 2027-2030, November 2012.

〔学会発表〕(計 7 2 件)

1. Z. Shen, H. Hasegawa, K. Sato, "Impact of wavelength/waveband convertors and the cost bound in hierarchical optical path networks," *OFC/NFOEC 2013, OM3A.5*, Anaheim, March 17-21, 2013.
2. Y. Iwai, H. Hasegawa, K. Sato, "OXC hardware scale reduction attained by using interconnected subsystem architecture," *OFC/NFOEC 2013, NW1J.2*, Anaheim, March 17-21, 2013. (A semi-finalist in the 2013 Corning Outstanding Student Paper Competition)
3. T. Niwa, H. Hasegawa, K. Sato, "A 270 x 270 optical cross-connect switch utilizing wavelength routing with cascaded AWGs," *OFC/NFOEC 2013, OTh1A.3*, Anaheim, March 17-21, 2013. (A semi-finalist in the 2013 Corning Outstanding Student Paper Competition).
4. K. Sato, "Prospects and development of large capacity future optical transport node," *15th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2013, Tu.A1.1*, Cartagena, Spain, June 23-27, 2013. (招待論文)
5. K. Sato, "Challenges and

- opportunities of photonic networking technologies,” The 18th OptoElectronics and Communications Conference/Photonics in Switching 2013, PS/OECC 2013, WQ1-1, Kyoto, June, 2013. (招待論文)
6. L. H. Chau, H. Hasegawa, and K. Sato, “Performance evaluation of large-scale OXC architectures that utilize intra-node routing restriction,” OECC/PS 2013, MQ2-2, June 30-July 4, 2013. (CLEO-PR & OECC/PS 2013 Best paper award)
  7. L. H. Chau, H. Hasegawa, and K. Sato, “Performance evaluations of large-scale OXCs that utilize multi-stage hetero- granular optical path switching,” ECOC 2013, Th.2.E.3, Sept., 2013. (Invited for Optics Express ECOC special issue)
  8. Z. Shen, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, and A. Hirano, “A novel semi-flexible grid optical path network that utilizes aligned frequency slot arrangement,” ECOC 2013, We.2.E.2, London, September 22-16, 2013, (Shortlisted for student paper prize, also Invited for Optics Express ECOC special issue)
  9. Y. Tanaka, Y. Iwai, H. Hasegawa, K. Sato, “Subsystem modular OXC architecture that achieves disruption free port count expansion,” ECOC 2013, Th.2.E.4, London, September 22-16, 2013.
  10. Y. Taniguti, Y. Yamada, H. Hasegawa, K. Sato, “A novel optical networking scheme utilizing coarse granular optical routing and fine granular add/drop,” OFC/NFOEC 2012, JW2A.2, Los Angeles, March 4-8, 2012.
  11. Y. Yamada, R. Hirako, H. Hasegawa, K. Sato, “Colorless/Directionless/Contentionless optical add/drop architecture applying waveband technologies and colorless MUX/DEMUX,” OFC/NFOEC 2012, JTh2A.44, March 4-8, 2012.
  12. F. Naruse, Y. Yamada, H. Hasegawa, K. Sato, “Evaluations of different optical path add/drop ratio restriction schemes on OXC hardware scale and network resource requirement,” OFC/NFOEC 2012, OTh1A.5, Los Angeles, March 4-8, 2012.
  13. T. Niwa, R. Hirako, H. Hasegawa, K. Sato, M. Okuno, and T. Watanabe, “Compact Wavelength Tunable Filter Fabricated on a PLC Chip that Realizes Colorless/Directionless/Contentionless Drop Function in Optical Cross-Connect,” OFC/NFOEC2012, OTh3D.6, Los Angeles, March 4-8, 2012.
  14. K. Sato, “Optical transport network architecture; the future transport node technologies,” Photonics in Switching 2012 (PS 2012), Th-S33-I04, Corsica, September 11-14, 2012. (招待論文)
  15. K. Sato, “Role of electronics and optics in creating future transport networks,” 14th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2012, Mo.C1.2, Warwick, U.K., July 2-5, 2012. (招待論文)
  16. T. Ban, H. Hasegawa, K. Sato, T. Watanabe, and H. Takahashi, “A novel large-scale OXC architecture that employs wavelength path switching and fiber selection,” ECOC 2012, We.3.D.1, Amsterdam, September 16-20, 2012.
  17. L. H. Chau, H. Hasegawa and K. Sato, “A Large Capacity Optical Cross-connect Architecture Exploiting Multi-Granular Optical Path Routing,” Photonics in Switching 2012 (PS 2012), Fr-S26-O14, Corsica, September 11-14, 2012.
  18. T. Niwa, H. Hasegawa, and K. Sato “Compact tunable filter realized with combination of wavelength routing and switch function,” Photonics in Switching 2012 (PS 2012), Th-S23-006, Corsica, September 11-14, 2012.
- 〔図書〕(計0件)
- 〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)
- 〔その他〕  
<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/satolab/index2.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
佐藤 健一 (SATO, Ken-ichi)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00377805
- (2)研究分担者  
長谷川 浩 (HASEGAWA, Hiroshi)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：40323802