

平成 21 年 4 月 23 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007-2008

課題番号：19500050

研究課題名（和文） 次世代エフキャストスイッチの設計に関する研究

研究課題名（英文） Design of Next-Generation f-cast Switches

研究代表者

JIANG, Xiaohong (JIANG XIAOHONG)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号:00345654

研究成果の概要：

我々はFキャスト・フォトニックスイッチ設計方式のための新しい最適化手法の開発を行った。この手法に基づき、Fキャストリクエストと様々なクロストーク制約のもとで、スイッチがノンブロッキングになるための条件を決定することに成功した。さらに、Fキャストスイッチに対する経路制御手法について取り組み、構成方式の完全な理解をする目的で開発を行った経路制御アルゴリズムや新しい統計モデルに対してブロッキング解析を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：情報ネットワーク，スイッチ

1. 研究開始当初の背景

マルチキャストアプリケーションを効果的に実現するために、ネットワークスイッチは1対多数のマルチキャスト（同報）能力を持つ必要がある。現在利用可能なマルチキャストスイッチ設計方式は、多くの場合1対全体のマルチキャスト（ブロードキャスト）能力を持つ。ブロードキャスト能力は最も理想的なマルチキャスト機能を実現することができるが、製造コストがとても大きく制御機構も複雑になるため、そのようなスイッチ設計方式は大規模なスイッチ構成では困難である。実際のネットワークではほぼ全てのマルチキャスト

アプリケーションは、マルチキャストの最大数がグループユーザー数となるため、ブロードキャストアプリケーションはほとんど存在しない。そのため各ネットワークスイッチが非常に高価なブロードキャスト能力を有し、その実現のために必要な膨大なハードウェアを必要とすることは、マルチキャストスイッチを実現する上でほとんどの場合において莫大なコストを浪費するだけである。また、(ウイルスやワームの伝播に対する効果的な制御など) 公平な資源分配とネットワークセキュリティの観点から、マルチキャストの最大ファンアウト数を制限する必要性がある。現実

的には、マルチキャスト木の構築といった適切なネットワークの経路制御方式を用いてファンアウト数が限られた複数のスイッチ（ルータ）を用いることで、頻度の少ないブロードキャストを実現することができる。従って、我々は最大ファンアウト数を F で制限された次世代 F キャストスイッチ設計に取り組む。 F キャストスイッチは、通常ブロードキャストよりも少ないハードウェアコストで構成できる。そして F キャストスイッチの一般的なスイッチ設計方式は、ユニキャスト設計やブロードキャスト設計の両方を F キャストの特別な状態として含んでいる。そのため、一般的な F キャストスイッチ構成方式がネットワーク設計者にとって将来のマルチキャスト志向のネットワーク設計に柔軟性を持たせ、ハードウェアコストの大幅な削減を達成できると期待している。

2. 研究の目的

(1) ノンブロッキング F キャストスイッチ設計

スイッチ設計に関する従来の理論は、主に電気信号を切り替えるユニキャストスイッチとブロードキャストスイッチどちらかに注目している。これらは、リンクブロッキングのみを考慮しており、一般的な F キャストスイッチのごく限られた場合でしかない。しかしながら一般的なフォトニック F キャストスイッチ設計は、リクエストの最大ファンアウト数 F とクロストークブロッキングを同時に考慮する必要がある。従来の「最悪状態」に基づいた設計方式では、パラメータ F と2種類のブロッキングに対する確率モデルの解析は複雑すぎて困難である。そこで我々は、フォトニック F キャストスイッチのノンブロッキング設計に対する新しい解析手法の開発を行う。このときのスイッチ構成技術として、将来的に有望な方向性結合器（DC）やアレイ導波路回折格子（AWG）技術とBanyan型スイッチやClosアーキテクチャを用いる。我々は F キャストスイッチ設計方式に対するブロッキングの解析方法は、スイッチ設計に対する従来の理論をさらに拡張し、将来のマルチキャスト志向通信網に対するスイッチアーキテクチャに役立つと期待している。

(2) 経路制御アルゴリズム

：接続のセッティングを行う経路制御アルゴリズムは、最終的なスイッチ性能を保証するために慎重に設計する必要がある。しかしながら、 F キャストスイッチに対して重要な経路制御アルゴリズムに対する研究はこれまでにない。これまでのスイッチ経路制御方式の戦略（例えば、random, packing, minimum index そして cyclic dynamicなど）は、主に電気で信号を切り替えるユニキャストスイッチに対する研

究成果がある。ユニキャストスイッチでは、全ての接続は個別に経路が割り当てられ、リクエスト間に競合（リンクブロッキング）が生じる。 F キャストスイッチでは、 F キャストセッションで全てのリクエストは個別に経路を割り当てられるか各段のスイッチで制限されたファンアウト数に基づいて同時に経路割り当てが行われるかのどちらかである。そのため接続の競合だけでなく、セッション間の競合も解決されなくてはならない。そして F キャストフォトニックスイッチに関するクロストークブロッキングは、リクエストの経路制御をさらに複雑にするため、 F キャストスイッチに対する経路制御アルゴリズム設計の研究を行う。効率的なパケットスイッチとバーストスイッチ技術を保証するためには、高速経路制御アルゴリズムは必要不可欠な要素であり、高速経路制御アルゴリズム設計に関しては、並列処理と自己ルーティングの2つのアプローチが考えられる。効果的な経路制御アルゴリズムは、次世代 F キャストスイッチでの処理を簡素化し、効率を改善すると期待されている。

(3) ブロッキング F キャストスイッチ設計

：ブロッキングスイッチ設計方式に取り組む主な動機は、ユニキャストフォトニックスイッチに關した最近の研究成果に基づいている。これはブロッキングスイッチ設計方式で生じる無視できるほど小さなブロッキング率を容認することで、ノンブロッキングスイッチと比べてハードウェアコストと経路制御の複雑さの両方を大きく改善することができる。ブロッキングスイッチ設計方式に対して重要なことは、ブロッキング率とネットワークパラメータの関係を解析的に明らかにすることができるブロッキング率のモデル化である。ユニキャストスイッチのブロッキング率に関しては、単純な二項式を使って十分モデル化することができるが、一般的な F キャストスイッチのブロッキング率の解析は非常に複雑である。我々はユニキャストスイッチに関するこれまでの研究結果の拡張を行うことで F キャストスイッチに対するブロッキングモデルの開発を行う。ブロッキング F キャストスイッチ設計方式に関する研究は、これまでにない新しいブロッキングスイッチ設計方式であると考えており、無視できるほど小さなブロッキング率、高速なスイッチ速度、そしてノンブロッキングスイッチと比べてかなり低コストに構成可能である。

3. 研究の方法

(1) DCに基づいた設計方式：DC技術とBanyan型スイッチアーキテクチャの組み合わせは、高速フォトニックスイッチを構築するための

優れたアプローチの1つである。DC技術は(ナノ秒台の)高速な信号切り替えを可能とし、Banyan型アーキテクチャは小さなスイッチ段数で構成できる。しかしながらDCに基づいたFキャストスイッチの設計方式に対して、従来のリンクブロッキング問題と新たなクロストークブロッキング問題の組み合わせは、従来の「最悪状態」に基づいた設計技術は、複雑過ぎて利用する事ができない。Banyan型スイッチとDCに基づいたフォトニックFキャストスイッチの効果的な設計に関して、新しい手法の開発を行う。基本的には線形計画法(LP)最適化問題と従来の「最悪状態」に基づいた設計技術を組み合わせることで、従来の設計技術に関する組み合わせ爆発を緩和することができる。上記の研究方針に基づいて、我々はDCとClos型スイッチアーキテクチャに基づいたFキャストスイッチ設計方式の研究を行うことでDCに基づく一般的なFキャストスイッチ設計方式が十分に解決できる。

(2) AWGに基づく設計方式: AWGは将来の高性能フォトニックスイッチの構築に関して優れたもう一つの技術である。AWGが高速に信号切り替えできると、スイッチの大規模化が容易である。近年AWGに基づくユニキャストスイッチ設計方式への取り組みが行われている。我々のこれまでのDCに基づいたFキャストスイッチ設計方式の研究成果に基づいて、さらに(Clos型やBanyan型のような)異なるスイッチアーキテクチャを用いたAWGに基づくFキャストスイッチ構成方式の研究を行う。特に重要な波長変換能力や波長変換機の配置問題に取り組む。我々は、DCとAWGに基づくスイッチ設計方式両方の研究が未来の高速Fキャストスイッチの設計に対して、有望なアーキテクチャになると考えている。

(3) 経路制御アルゴリズム: ブロードキャストスイッチに関して、唯一利用可能なブロッキングウインドウ経路制御アルゴリズムはリンクブロッキングが起こる電気信号を切り替えるスイッチ用に設計された。我々ははじめに、このブロッキングウインドウ経路制御アルゴリズムの拡張を行う。具体的には、クロストークブロッキングのような経路制御過程に考慮すべき制約を与える。注目すべき点として、ブロッキングウインドウアルゴリズムは逐次経路制御方式であるため、本質的に高い複雑性を持つ。それゆえ高速アプリケーションのためのDCやAWGに基づくFキャストスイッチには現実的でない。我々は、並列経路制御技術と自己ルーティングアーキテクチャブロッキングウインドウアルゴリズムの計算量の低減を試す。我々は、Fキャストスイッチの経路制御に対してこれまでに研究されたユニキャスト向けのrandom, packing, minimum

indexやcyclic dynamicなど経路制御アルゴリズムのような戦略を模索する。

(4) Fキャストスイッチのブロッキング率の解析: 我々は、さらに異なるFキャストスイッチに対する論理モデルを導き、ブロッキング率や切り替え速度、ハードウェアコストに関して様々なブロッキング設計方式の開発を行う。我々のユニキャストスイッチのモデリング方法は、Fキャストスイッチ用に拡張できる。具体的にはブロッキング解析の組み合わせ爆発を回避するために、動的プログラミングのアイデアに基づいた新しい再帰計算技術をモデリングの中に用いることで拡張する。

4. 研究成果

(1) Strictly ノンブロッキング Fキャストフォトニックネットワーク: Banyan型アーキテクチャと方向性結合器技術を用いて構築するフォトニックスイッチングネットワークに対して、我々は一般的なFキャストトラフィックをサポートするためにこれらのネットワークの性能について研究した。このFキャストトラフィックは、特別な場合としてユニキャストとマルチキャストトラフィックを含む。我々は、これらのネットワークを様々なクロストーク制約のもとでFキャストstrictly ノンブロッキングにするための状態を明らかにした。特に、一般的なクロストーク制約を課すときにFキャストフォトニックネットワークのノンブロッキング状態を決定するためのILPに基づいた最適化手法を開発した。

(2) Rearrangeable Fキャストネットワーク: マルチ $\log_2 N$ ネットワーク(またはスタック型Banyanネットワーク)は、 $O(\log M)$ 程度の少ないスイッチ段数や完全な信号損失の均等性、優れた耐故障性から魅力的なスイッチネットワークである。近年、F. K. Hwangは一般的なFキャストの場合のマルチ $\log_2 N$ ネットワークの研究を拡張し、入力層と中間層の両方でファンアウトが可能であるときに、Fキャストstrictly ノンブロッキングになるための条件を決定した。我々は、(フォトニックスイッチに関連した)ノードブロッキングと(電気信号を切り替えるスイッチに関連した)リンクブロッキングが同時に起こるrearrangeable Fキャストマルチ $\log_2 N$ ネットワークを研究した。特に、1) ファンアウト能力に制限なし、2) 入力層にファンアウト能力なし、3) 中間層のBanyanスイッチにファンアウト能力がないという、3つのファンアウトの条件に基づいて解析を行った。そしてはじめの2つの条件に対する必要条件を決定し、3つ目の条件に対する必要十分条

件を決定した。

(3) 経路制御アルゴリズム：マルチ $\log_2 N$ ネットワークアーキテクチャは光スイッチを構築する上で魅力的である。そして、関連する経路制御アルゴリズムはスイッチの効率的な処理に関して非常に重要である。これまでに様々な経路制御アルゴリズムがマルチ $\log_2 N$ ネットワークに対して提案されているが、これまでに完全な性能比較は行われていない。そのため、我々は特にクロストーク制約を持つ DC に基づくフォトニックネットワークに対するブロッキング率、計算量、負荷分散に対する比較を行った。特に負荷分散はスイッチのピーク電力装置の低減に重要である。そのため、我々は光マルチ $\log_2 N$ ネットワークでよりよい負荷分散を達成するために新しい経路制御アルゴリズムを開発した。AWG に基づいたスイッチは、低コスト、商用利用可能、高い伝送能力、高速信号切り替え能力、そして高い集積能力を持つ魅力的なスイッチである。我々は AWG に基づくスイッチに対する 2 つの発見的な経路制御アルゴリズムの開発を行った。一つ目の発見的アルゴリズムであるグループ固定経路制御アルゴリズム (GFR) は、非常に単純だが、リクエストの出力ポートに基づいて各リクエストに波長を割り当てる方法に基づいた効率的なアルゴリズムである。GFR アルゴリズムは、光ファイバに多重化できる波長数 K に対して最適な $O(K)$ の計算量を持つ。2 つ目の経路制御アルゴリズムである競合経路交換

(ECR) アルゴリズムは、GFR アルゴリズムの拡張であり、GFR アルゴリズムと比べて低いブロッキング率を実現することができる。ECR アルゴリズムでは、波長割り当てで競合が起こる場合は、一方に波長を割り当て、もう一方のリクエストはすぐに破棄する。ECR アルゴリズムは、WDM スイッチで光ファイバに多重化する最大波長数 K と入力ファイバ数 F に対して、 $O(KF)$ の最適な計算量を持つ。これらの 2 つのアルゴリズムは共に、従来の辺彩色に基づくアルゴリズムより低い計算量を持つ。そして、AWG に基づく光スイッチの高速経路制御に利用できる。

(4) AWG に基づくスイッチ設計方式：AWG は高速かつ大容量の光スイッチの構築に関して将来有望な技術である。AWG は高速に信号切り替えが可能かつ大規模化が容易であり、低消費電力である。高速 AWG の長所を全部活かすために、AWG に基づいた大規模なスイッチの経路制御はできる限り単純であるべきである。我々は、 $O(1)$ の定数の経路制御計算量を持つ AWG に基づくスイッチの自己ルーティング設計方式の研究を行った。そして、波長-波長リクエストと波長-ファイバリクエ

ストの 2 つのリクエストモデルに対してノンブロッキングを保証できる新しい自己ルーティング型 AWG スイッチを提案した。我々はまた、ブロッキング特性やハードウェアコスト、そしてクロストーク性能を従来の構成と比較することで提案設計方式の解析を行った。提案構成は、将来の超高速光パケット/バーストスイッチの完全光実装に対して利用できると期待できる。

(5) Fキャストスイッチの統計的モデリング：マルチ $\log_2 N$ ネットワーク (スタック型 Banyan ネットワーク) は、 $O(\log N)$ の小さいスイッチ段数、完全な信号損失の均等性と優れた耐故障性を有する大変優れたスイッチネットワークである。我々はリクエストのブロック率を研究し、ノードブロッキングを仮定した場合の Fキャストマルチ $\log_2 N$ ネットワークの統計的なブロック率のモデルを開発した。提案モデルは Fキャストネットワークなどの局面で使用でき、ハードウェアコストとブロッキング率のトレードオフを解決する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

(1) Bin Wu, Kwan L. Yeung, Pin-Han Ho and Xiaohong Jiang, "Minimum Delay Scheduling for Performance Guaranteed Switches with Optical Fabrics," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology (Accept). (Peer Reviewed)

(2) Yusuke Fukushima, Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Self-Routing Nonblocking WDM Switches Based on Arrayed Waveguide Grating," IEICE Trans. Communications, Vol. E92-B, No. 04, pp. 1173-1182, Apr. 2009. (Peer Reviewed)

(3) X. Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "New Bounds on the Feedforward Design of Optical Output Buffer Multiplexers and Switches," IEICE Trans. Communications, Vol. E92-B, No. 04, pp. 1183-1190, Apr. 2009. (Peer Reviewed)

(4) Yusuke Fukushima, Xiaohong Jiang, and Susumu Horiguchi, "Routing Algorithms for Packet/Circuit Switching in Optical Multi- $\log_2 N$ Networks," IEICE Transactions on Communications, Dec. 2008,

E91-B(12):3913-3924. (Peer Reviewed)

(5) Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Rearrangeable f -cast Multi- $\log_2 N$ Networks," IEEE Transactions on Communications, vol. 56, no. 11, Nov. 2008, pp. 1929-1938. (Peer Reviewed)

(6) X. Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "Maintaining Packet Order in Reservation-based Shared-Memory Optical Packet Switch," IEICE Trans. Communications, Vol. E91-B, No. 9, pp. 2889-2896, Sep. 2008. (Peer Reviewed)

(7) Jianming LIU, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "Recursive Formula for the Moments of Queue Length in the M/M/1 Queue," IEEE Communications Letters, vol. 12, no. 9, Sept. 2008, pp. 690-692. (Peer Reviewed)

(8) Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Strictly Nonblocking f -cast Photonic Networks," IEEE/ACM Trans. on Networking, VOL. 16, NO. 3, pp. 732-745, JUNE 2008. (Peer Reviewed)

(9) Kaikai Chi, Xiaohong Jiang, Susumu Horiguchi and Minyi Guo, "Topology Design of Network Coding-Based Multicast Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 19, no. 5, pp. 627-640, May 2008. (Peer Reviewed)

(10) Mohamed Mostafa A. Azim, Xiaohong Jiang, Susumu Horiguchi and Minyi Guo, "Restoration Probability Modeling for Active Restoration-Based Optical Networks with Correlation Among Backup Routes," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 18, no. 11, pp. 1592-1606, Nov. 2007. (Peer Reviewed)

[学会発表] (計 12 件)

(1) Yang Wang, Hung Q. Ngo and Xiaohong Jiang, "Strictly Non-Blocking f -cast $\log_d(N, 0, p)$ Networks Under Fanout and Cross-Talk Free Constraints," IEEE ICC08, May 19-23, 2008.

(2) X. Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "Construction of Optical Shared Buffer Queue with Switched Delay

Lines," IEEE HPSR08, May 15-17, 2008.

(3) Yusuke Fukushima, Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Self-Routing Design of Nonblocking WDM Switches Based on Arrayed Waveguide Grating'," IEEE HPSR08, May 15-17, 2008.

(4) X. Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "Improved Bounds on the Feedforward Design of Optical Multiplexers," I-SPAN08, May 7- 9, 2008.

(5) Xiaoliang Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "Maintaining Packet Order in Reservation-based Shared-Memory Optical Packet Switch," IEEE ANIA08, Mar. 25-28, 2008 (IEEE Press).

(6) Xiaohong Jiang, Achille Pattavina, Susumu Horiguchi and Jianfeng Ma, "Statistical Modeling of Optical f -cast Multi- $\log_2 N$ Networks," HPSRN08, March 13-14, 2008.

(7) Hung Q. Ngo, Yang Wang, Anh Le and Xiaohong Jiang, "Better Necessary Conditions for Rearrangeably Nonblocking f -cast d -ary Multi- \log Networks under Fanout and Crosstalk Constraints," HPSRN08, March 13-14, 2008.

(8) Xiaoliang Wang, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "CBX-1 Switch: An Effective Load Balanced Switch," PDCAT07 (IEEE Press), December 3-6, 2007.

(9) Yusuke Fukushima, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, "On the routing algorithms for Optical Multi- $\log_2 N$ Networks," 2007 IFIP International Conference on Networks and Parallel Computing (NPC 2007), September 18-21, 2007.

(10) Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Strictly Nonblocking Design of f -cast Photonic Multi- $\log_2 N$ Networks with Crosstalk Constraints," IEEE HPSR07, May 30-June 1, 2007.

(11) Xiaohong Jiang, Achille Pattavina and Susumu Horiguchi, "Rearrangeable f -cast Switches with Limited Fan-out Capability," HPSRN 2007, Mar. 14, 2007.

(12)Xiaochang Liu, Xiaohong Jiang and Susumu Horiguchi, “Fast Routing Algorithms for Arrayed Waveguide Grating-based Optical Switches,” HPSRN 2007, Mar. 14, 2007.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

JIANG, Xiaohong (JIANG XIAOHONG)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号:00345654

(2) 研究分担者

堀口進 (HORIGUCHI SUSUMU)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 60143012

(3) 連携研究者