

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」  
平成 17 年度採択研究代表者

佐藤 健一

名古屋大学大学院工学研究科・教授

## 超低消費電力光ルーティングネットワーク構成技術

### 1. 研究実施の概要

情報システムの低消費電力化は次世代ネットワーク構築における焦眉の課題となっている。この課題の解決に向けたブレークスルーをもたらす技術として、光ルーティング技術(フォトニックネットワーク技術)が有る。本技術では光のパッシブデバイスによるルーティングを用いる事により、通信ノードにおける電気レイヤの処理を大幅に削減し、通信ネットワーク全体での抜本的な低消費電力化を達成することができる。本研究では低消費電力化をネットワーク全体でとらえ、リンクとノードを構成要素とし、HAN(Home Area Network)/LAN(Local Area Network)から WAN(Wide Area Network:コア並びにメロネットワーク)までのネットワーク全体をあたかも一つのサーキットボードとして、低消費電力化の観点から最適化を図る。フォトニックネットワーク技術における各種の通信方式(光ストリーム、光バースト等)が有する超低消費電力のポテンシャルを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャ、ネットワーク設計概念を明らかにするとともに、それを構成する超低消費電力ノードシステムの構成並びに究極の低消費電力性能を明らかにする。

平成 20 年度は、効率的な波長群クロスコネクトノードを実現するために波長群合分波器の高性能化、特に多段の合分波器を経由した場合の通過帯域幅の狭窄化の低減に関して、分散配置型波長群構成に基づくサイクリックなアレイ導波路回折格子を適用した新しいノードアーキテクチャを開発し、大幅な特性改善が図れる見通しを得た。ネットワークアーキテクチャに関しては、メッシュ主体のネットワークに加え、メロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して、波長群の導入によりスイッチ規模を大幅に削減できることを明らかにし、システム実験により実証した。尚、波長群の導入による波長パスのブロッキング確率の上昇を定量評価する為の手法の開発に着手し、ILP(Integer Linear Programming)による定式化と性能評価を行った。その結果、波長群の導入によるブロッキング確率の上昇が軽微に押さえられる事が明らかになり、波長群導入の有効性が実証された。また、より長い継続時間のバーストに対して高速光パス(回線)設定/解放手順を利用する Optical FCS(Fast Circuit Switching)に関し、性能評価のモデリングを開始した。

上記波長群クロスコネクトノードの実機を用いたシステム実験においては、開発した部品(波長群合分波器、マトリクススイッチ、波長合分波器など)を使用した、模擬波長群クロスコネクトネット

ワークを構築し、信号速度 10Gbps の信号を用いて評価を行った。多少の伝送特性劣化があるが、原理通りの動作を確認することに成功した。また、メロポリタンエリアや LAN への適用を目指したパッシブデバイスを用いた波長ルーティングシステムの研究では、昨年度までの成果・知見を生かし、ノードで用いられる合波用 AWG と、波長ルータ部分で用いられる AWG の波長設計に工夫を加えることで、リアルタイムで設定変更が可能な波長ルーティングシステムを提案し、その動作検証に成功した。今後は、最終的なデモンストレーション実験に向け、波長群クロスコネクトノード装置や波長ルーティングシステムの詳細な動作実験や特性評価を実施して行く予定である。

なお、PLC 型デバイスの試作・作製としては、本研究期間では波長群クロスコネクトノードの構築に必要な新しい群合分光フィルタのモジュール化や光スイッチの大規模化を進め、システム実験に必要な全ての光デバイスの準備を完了させた。また、上記パッシブデバイスを用いた波長ルーティングシステムの検証で用いる光デバイスの開発に加え、前年度から継続して取り組んでいる光信号処理技術の研究に必要な光デバイスの装置化を行った。一方、光スイッチの消費電力を 1/100 以下にすることを目的とした基盤技術開発では、実績のある石英系導波路と電気光学効果で駆動するニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ ) 導波路を組み合わせた光スイッチ (電圧駆動のためデバイスでの消費電力≒ゼロ) の検討を進めており、昨年度の動作確認を受け、今年度は駆動回路を含めた超低消費電力化技術と大規模化の検討を進めた。

以上の検討を基に、コアネットワーク部におけるノードシステムとして、従来の電気ルータによる構成と比較して 1/100~1/10 の低消費電力化の見通しを得た。ここで前者は広範囲に Optical FCS (Fast Circuit Switching) / バーストが導入された場合 (終端トラフィックの 80%程度)、後者は終端トラフィックがパケット主体の場合である。また、数 10km 程度をターゲットとしたメロ/ LAN における波長ルーティングシステムにおいては、電力消費の大半を占める電気ルータ装置を、電力を消費しないパッシブな波長ルーティングデバイスに置き換える効果によって、従来のシステムと比較して 1/10 以下の低消費電力化の見通しを得た。更に、光デバイスのレベルからも新しい構造と材料の適用を進めており、従来に比べ 1/100 の低消費電力化が達成出来る可能性を見出した。

## 2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### ①超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

超低消費電力光ネットワークアーキテクチャとして、これ迄フォトニックネットワーク技術における波長ルーティングを最大限に活かした新しいネットワークアーキテクチャの検討、光クロスコネクトノード並びにキーとなる光機能素子の構成の研究開発を進めて来た。本年度の主要な成果を以下にまとめる。

#### ア. フレキシブル光クロスコネクトノード

ネットワークのスループット拡大の観点からストリームとして波長パスに加えてウェーブバンドパス (波長群パス) を利用するネットワークは重要で有る。これを実現する上でキーとなる波長群クロスコネクトノードの新しい構成法を考案した。図1に連続配置波長群と分散配置波長群を説明する。これ迄は連続配置型を主に検討し、それに適した PLC (Planar Lightwave Circuit) を用いたモノリシックな波長群合分光器を開発してきた<sup>3), 4)</sup>。今回、分散配置波長群に基づく新しい波長群クロス

コネクタノード構成を提案した。分散配置波長群の合分波器としては、従来よりCyclicなAWG (Arrayed Waveguide Grating)が利用できることが知られていたが、同波長群合分波器はAWGの端に近い出力ほど過剰損失が大きく、それを各ノード当たり2段経由(分波器並びに合波器)するとその過剰損失が加算されて損失が増加した。本研究では、図2に示す様に、入力側波長群分波器と出力側波長群合波器の接続構成を工夫することにより、過剰損失を1/2程度に低減出来ることを考案し、波長群合分波器を試作しその特性を実証した。本構成を利用した波長群クロスコネクタシステムは、最終年度のネットワーク実験に向けて、試作中である。

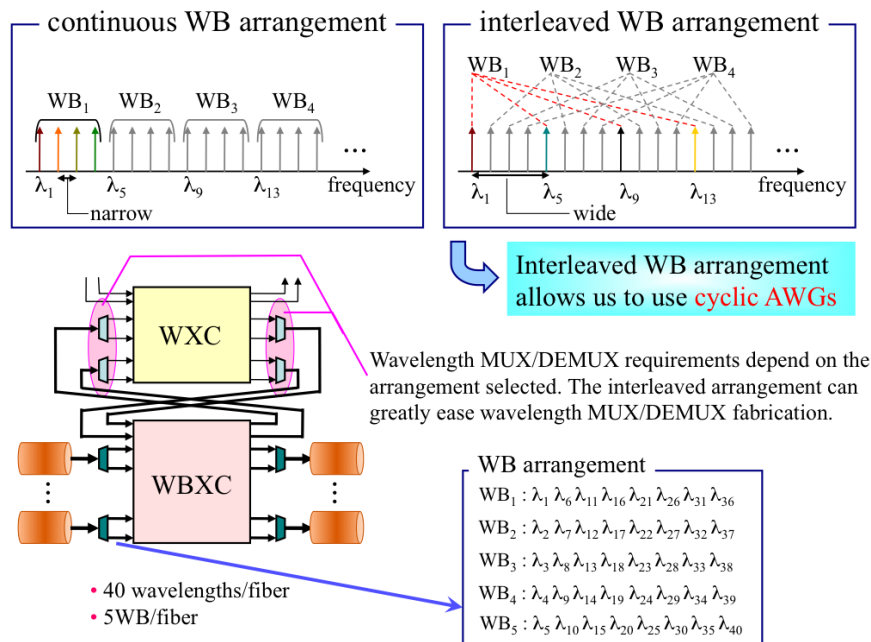


図 1 連続配置波長群と分散配置波長群並びに階層型光クロスコネクタにおける波長群／波長パス合分波器

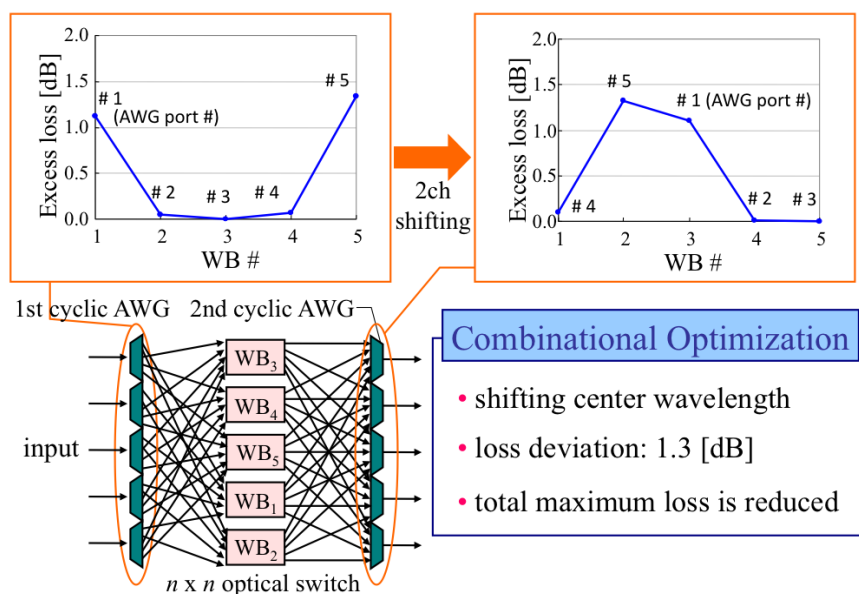


図 2 入力側波長群分波器と出力側波長群合波器の新しい接続構成による低損失化

## イ. FCS ネットワーク実現法

長い継続時間のバーストに対して高速光パス(回線)設定/解放手順を利用する Optical FCS(Fast Circuit Switching)を実現する為には、シグナリングの負荷を最小限にするアーキテクチャが必要となる。すなわち、光パス(回線)の途中のノードでの設定制御を不要とする、階層的な波長群クロスコネクタが必須となる<sup>5)</sup>(図3参照)。これに基づき、階層型光クロスコネクタを用いて構成される FCS ネットワークのパフォーマンスを評価する為の基本モデルを開発した。

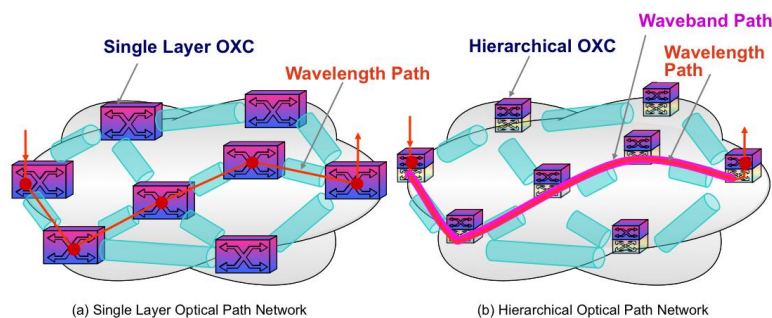


図 3 FCS における波長群クロスコネクタの機能

## ウ. 接続リングネットワーク

メトロポリタンエリアへの適合性の高い接続リングネットワークに関して、波長群の導入によりスイッチ規模を大幅に削減できることをシステム実験により実証した。波長群の導入による波長パスのブロッキング確率の上昇を定量評価する為の手法の開発に着手し、ILP による定式化と性能評価を行った。その結果、波長群の導入によるブロッキング確率の上昇が軽微に押さえられる事が明らかになり、波長群導入の有効性が実証された。

## ②超低消費電力光ネットワーク構成技術

### ア. 波長ルーティング装置の開発

パッシブデバイスを用いた波長ルーティングネットワークの研究においては、昨年度までに AWG 波長合分波器からなる波長ルータの構成について検討を行い、通信方路ごとに異なる通信量に比例した帯域割り当てができるよう、帯域幅が不均一および帯域幅が可変な構成について、提案および実験による検証を行ってきた。今年度はこれらの知見をベースにさらに発展させて、動的(瞬時)に帯域・方路を変更する方法を見出し、その検証実験を行った。図 4 に示すように、送信ノードの合波用 AWG と波長ルータ用 AWG の周回性を生かし、その周期(U:波長間隔で規格化したフリースペクトルレンジ) が互いに素な整数(図では 5 と 8 とした)であることが特徴である。

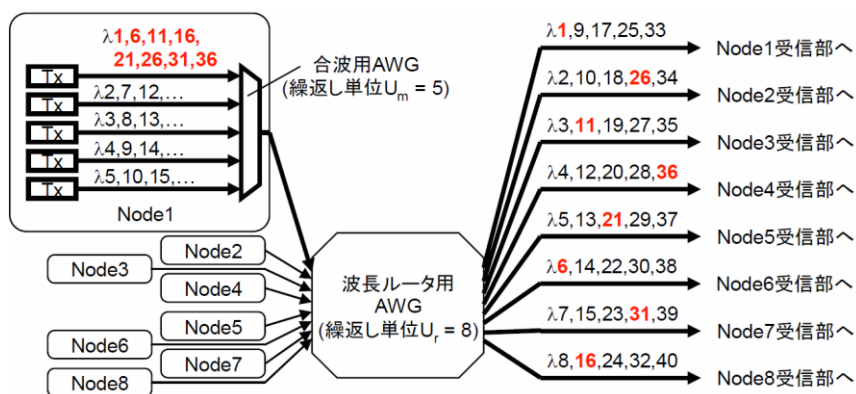


図4 再構成可能な波長ルーティングシステムの構成

例えばノード1の第1の送信器では8つの波長( $\lambda_1, \lambda_6, \lambda_{11}, \lambda_{16}, \lambda_{21}, \lambda_{26}, \lambda_{31}, \lambda_{36}$ )のいずれかを送信するが、いずれの波長も合波用AWGで問題なく1本のファイバに合波される。波長ルータでは、これらの8波長は異なるポートから出力され、異なるノードへと送られることになる。したがって、送信器内のレーザの発振波長を変えることで瞬時に行き先を切り替えることができる。なお、その他の送信ノードからの信号は、波長ルータの異なる入力ポートに接続されており、複数の送信ノードから同じ波長を送っても混信はしない。結果として、H17-18年度にアダプティブネットワークインターフェースの研究で開発した可変波長光源を組み合わせ、動的(瞬時)に帯域・方路を変更できる運用効率の高いメトロポリタンエリアネットワークやLANの構築が可能となる見通しを得た。

#### イ. 光ラベル処理装置の開発

昨年度までに原理確認を完了した光信号処理(光CDMA)の研究では、総合評価用のシステム実験系の構築に向け、各種光部品を集約した送信器・受信器の装置化を完了させた。次年度、光CDMAのシステム動作確認実験を行う予定である。また、光ラベル処理の新たな方法として、多波長ラベル認識用集積型光D/A変換回路を提案した。これは複数波長における光の有無を光ラベル(二進数)とするもので、その認識(ラベルの値がいくつであるかを知る)回路として、AWGと遅延線を組み合わせて前記二進数を光パワーのアナログ値に変換する構成を考案した。実際にPLC技術を用いて作製して動作実験を行い、4ビット(0~15)を認識することに成功した。今後は光ラベル処理を用いたNWの検討を進める。

#### ③超低消費電力光ルーティングネットワーク用PLC光デバイス

上記波長群クロスコネクタノード、波長ルーティング装置、光ラベル処理装置等、通信ネットワークの抜本的な低消費電力化を目指し開発を進めている各種通信システムの実現に必要な不可欠な専用光デバイスを、最先端な石英系PLC技術を駆使して開発している。最重要研究テーマである“波長群クロスコネクタノード”システムの開発に関して、今年度はノードの実証装置製作の最終段階を迎えており、必要な光デバイスの仕様策定・設計等を行った。また、「②超低消費電力光ネットワーク構成技術研究」で実施している、光信号処理(光CDMA)研究用の光デバイスやパッシブデバイスを用いた波長ルーティングの研究に用いる光フィルタの開発においても、共同で設計等

を行った。

一方、デバイス自身の低消費電力化を図る技術開発も極めて重要なテーマであり、消費電力を従来の1/100に低減するという極めて困難な目標に向けて、革新的なPLC光スイッチの開発を進めている。研究開始当初から進めていた石英基板を用いたPLCスイッチ研究によって消費電力を1/10に低減することを達成しているが、これ以上の低減には加工技術上の限界があることが明らかになった。これに伴い、昨年度後半から新たな2つの検討を開始した。1つは、初年度から培ってきた超深溝加工技術をベースに、抜本的な構造の見直しを図った光スイッチである。加工技術を中心に検討を進めたが、現状の技術では必要な形状が得られないことが判明したため、今年度末で検討を中断することとした。もう1つは、低損失で光ファイバとの接続性に優れた石英系PLC回路と電気光学効果で駆動可能なLiNbO<sub>3</sub>導波路位相シフタとを組み合わせた極限的な低消費電力光スイッチ(電圧駆動のためデバイスでの消費電力≒ゼロ)である。本手法については、「②超低消費電力光ネットワーク構成技術研究」と連携してプロトタイプを試作し光スイッチとして動作することを確認しており、今年度は駆動回路を含めた超低消費電力化技術と大規模化の検討を進めた。今後は、低消費電力化に関する各種アイデアの検証を進め、消費電力の1/100化に目処を付ける予定である。更に、大規模化に関する検討も平行して進め、40連2x2スイッチ(VOA)の試作によって多連化による問題点を把握し、目標としている4x4マトリクススイッチのベースとなる多連1x4スイッチの実現を目指す。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「名古屋大学」グループ

①研究分担グループ長:佐藤 健一(名古屋大学大学院 教授)

#### ②研究項目

超低消費電力光ネットワークアーキテクチャ

- ・フレキシブル光クロスコネクタノードの設計
- ・フレキシブル光ネットワーク設計法の開発
- ・ラベルスイッチ並びにFCSネットワーク実現法
- ・アダプティブ光ネットワークの設計法の開発
- ・ネットワーク実験

#### (2)「NTTフォトニクス研究所」グループ

①研究分担グループ長:高橋 浩(日本電信電話株式会社 研究グループリーダー)

#### ②研究項目

- ・波長ルーティング装置及びネットワークノード装置の開発
- ・光ラベル処理装置の開発
- ・アダプティブネットワークインタフェースの開発
- ・ネットワーク実験

#### (3)「NTTエレクトロニクス」グループ

①研究分担グループ長:大森 保治(NTTエレクトロニクス株式会社 所長)

②研究項目

- ・超低消費電力光ルーティングネットワークに必要な不可欠な専用 PLC デバイスの開発
- ・PLC 光スイッチの抜本的低消費電力化を実現する基盤技術の開発

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. K. Suzuki, T. Yamada, O. Moriwaki, H. Takahashi, M. Okuno, " Polarization-Insensitive Operation of LithiumNiobate Mach-Zehnder Interferometer with Silica PLC-Based Polarization Diversity Circuit", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, No. 10, May 15, 2008, pp. 773-775.
2. I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An efficient hierarchical optical path network design algorithm based on traffic demand expression in a Cartesian produce space," IEEE Journal of Selected Areas in Communications (J-SAC), Supplement on Optical Communications and Networking (OCN), vol. 26, No. 6, August 2008, pp. 22-31.
3. S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, and S. Kamei, " Optical cross-connect switch architectures for hierarchical optical path networks," IEICE Trans. Commun., vol. E91-B, No. 10, October 2008, pp. 3174-3184.
4. S. Kakehashi, H. Hasegawa, K. Sato, O. Moriwaki, and S. Kamei, " Analysis and development of fixed and variable waveband MUX/DEMUX utilizing AWG routing functions," IEEE Journal of lightwave technology, vol. 27, No. 6, January 2009, pp. 30-40.
5. K. Sato and H. Hasegawa, "Optical networking technologies that will create future bandwidth abundant networks," to appear in OSA JON Special Issue on Optical Networks for Future Internet.
6. K.Takiguchi, H.Takahashi, and M.Okuno"Integrated-optic digital-to-analogue converter for recognizing multi-wavelength pulse patterns" accepted to Electronics Letters (in press)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 7 件 (CREST 研究期間累積件数 : 15 件)