大容量で高効率なダイナミック光パスネットワークに向けた要素技術

並木 周

産業技術総合研究所 ネットワークフォトンクス研究センター（〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2）

Enabling Photonic Technologies for the Extremely Energy-Efficient High-Capacity Dynamic Optical Path Network

Shu NAMIKI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Network Photonics Research Center
1-1-1 Umezono, Central 2, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received February 13, 2012)

This article will review dynamic optical path network (DOPN), recently proposed by AIST, that is a promising technology to dramatically reduce the energy consumption allowing the sustainable growth of the network traffic in the forthcoming ultra-high definition video era. Then, some of the enabling photonic technologies being developed at AIST will be introduced: they are intersubband quantum well waveguide devices; silicon photonics optical switches; and all-optical signal processing through highly nonlinear fiber.

Key Words: Optical network, Green ICT, Optical signal processing, Parametric processes, Optical path network

1. 増大するネットワークトラフィックと 行き詰まる既存技術

インターネットトラフィックは、現在も年率30~40%の割合で増加し続けている。スマートフォンやタブレット型PCの普及などにより、将来もこの傾向は続くものと考えられる。トラフィックの成長は新しいアプリケーションひいてはイノベーションを引き起こし、それが社会経済の発展に大きく貢献している。

年率1.4倍のトラフィック増をたとえば20年間支え続けることは、その間に1000倍程度の大容量化を行うことを意味しており、容易ではない。光通信技術だけ見てもこれまでの20年間は、Erbium doped fiber amplifier (EDFA) の実用化、wavelength division multiplexing (WDM) 伝送技術の普及、ラマン増幅技術や誤り訂正符号の導入、最近では位相変調など高度な変調方式によるスペクトル効率の向上など、多くの革新的技術が生み出されてきた。そして、ついに学会では光ファイバ伝送の原理限界といわれる非線形シャノン限界¹⁾であるファイバ1芯あたり100 Tbit/s伝送が達成された²⁾。

この様に、光ファイバ1芯の伝送容量を将来に向けて桁違いに改善することはもはや望めなくなっている。一方、ネットワークのもう1つの重要な構成要素である、電子デバイスやIPルータの性能の進展を見ても同様に将来に向けて桁違いの特性改善が望めなくなりつつ

ある。まず、現在のハイエンドIPルータのスループットはシングルシェルフで数Tbit/s程度にすぎず、光ファイバの伝送容量に遥かに及ばない。さらにスループットを増大する阻害要因として近年注目されているのが、ネットワーク全体の消費電力である³⁾。

Fig. 1に、日本のトラフィックと対応する国内のIPルータ全体の電力消費量を示す。この図から明らかなように、IPルータはそもそも消費電力がスループットに大きく依存する。その比例係数は多少の改善傾向はある

Fig. 1 Transition of the total power consumption of IP routers and traffic.

が、概ね数nJ/bit(W/Gbps)である⁴⁾。その結果、トラフィックが数桁増大するためには、電子デバイス技術の改善を考慮しても、いずれはIPルータ全体の消費電力も数桁増大せざるを得ない。ところが、国全体の電力供給量も限られており、トラフィックの増加可能な量も限られることになる。

このように、ネットワーク・トラフィックは現状の延長ではスケールしないことが懸念される。その大きな要因は、上述のとおりネットワーク機器の消費電力がトラフィック量に強く依存するためである。そこで、この依存性を断ち切る新しい技術が望まれる。それが、光による抜本的な解決である。光スイッチは、基本的に光の伝搬経路を空間的に切り替えるものであり、そこを通る信号の帯域にはほとんど依存しない。すなわち、光スイッチの消費電力はスループットには依存せずに、扱う光パスの数に依存する。その依存性は、光スイッチそのものを駆動する消費電力というよりもむしろ、光スイッチのポートに設置する光増幅器の消費電力によって決まり、比例係数は、 ~ 1 W/portである。このように、光スイッチの、IPルータとは異なるエネルギースケールに着眼した省エネな新しいネットワークの実現が強く望まれる。

2. 光スイッチを駆使する ダイナミック光パスネットワーク

光スイッチはそれ自体では、どの入力ポートをどの出力ポートに切り替えればよいかという情報を持ち合わせないので、光スイッチによって構成される光ネットワークとは別に、これを制御する制御プレーンとなるネットワークを併設して、多数のユーザからのリクエストに応える資源管理技術が不可欠となる。こうした新しく目指すべきネットワークを、我々はダイナミック光パスネットワーク(dynamic optical path network: DOPN)と呼び、そのための垂直連携型要素技術開発を推進している⁵⁾。

概してダイナミック光パスネットワークは、ユーザのリクエストによって切り替わる光回線交換網であり、転送するデータ量が巨大だがばらつきが小さく、事前予約によるサービスに適し、安定かつ保証された回線帯域が重要となる。映像中心のサービスを提供することに適している³⁾。事実、増大するトラフィックのほとんどが映像コンテンツの転送であることが報告されており[†]、ダイナミック光パスネットワークはまさに増大する巨大トラフィックを収容し映像系サービスを提供するのに最適なネットワーク形態となりえる。

では、実際に光スイッチを駆使して全国規模の光パスネットワークを構成した場合、どの程度の省エネが期待できるのか。この問いに答えるために、我々は、ごく簡単なトポロジーを想定し大まかにネットワーク全体のトラフィックあたりの消費電力を試算した。その結果、現在のインターネットに比べて数桁の効率改善が見出され

Fig. 2 Power efficiency of DOPN.

た³⁾。Fig. 2にその結果のみを示す。横軸は、ユーザあたりの平均伝送レートを10 Gbit/sとしたまま、ユーザ数を変化した際のネットワーク全体の総トラフィックである。現在のインターネットは、総トラフィックがおおよそ1 Tbit/sで、ルータの総消費電力が年間1 TWhなので、トラフィックあたりの効率を比較すると5桁近い改善が見込まれる。

実際にダイナミック光パスネットワークを現実のものとするためには、波長やファイバ単位などの階層型ルーティング⁶⁾を導入して、さらにネットワークの効率化を図る必要があるだけでなく、以下に言及するようにさまざまな光通信技術を見直し新たに開発していく必要がある。

3. ダイナミック光パスネットワークを 実現する要素技術

ダイナミック光パスネットワークは、Fig. 3にその概念図を示すように、従来のIPネットワークと併設され、得意な映像を中心とした巨大情報のやり取りに用いられることを想定している⁷⁾。従って、ダイナミック光パスネットワークのユーザには、光スイッチを介して、巨大な映像情報をやり取りするための光パスが提供されることになる。

ダイナミック光パスネットワークに用いられる光通信技術は、次の3つに分類される：(1) 光パス・インタフェース(光トランシーバ技術)、(2) 光パス・プロセッサ(各種光スイッチ技術)、(3) 光パスコンディショニングである。光パスコンディショニングは、光パスプロセッサによって切り替えられた光パスを光パス・インタフェース間で適切に光伝送するための伝送路調整・補償技術である。この3つが揃うことで、ダイナミック光パスネットワークはその物理レイヤーの機能が完成するこ

[†] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2008-2013 [Online]. Available: URL: http://www9.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html

Fig. 3 Conceptual diagram of the DOPN co-installed with the conventional IP networks.

とになる。

以下は、産総研における活動例をそれぞれについて紹介していく。

- (1) 光パス・インタフェース：集積光デバイスによって構成される時分割多重光ネットワークインタフェースカード(OTDM-NIC)技術

ダイナミック光パスネットワークの重要な利点に、そこを通る光信号の変調フォーマットが自由であることがある。ユーザは、それぞれの目的に応じてさまざまな帯域や伝送方式を採用することができ、ネットワーク上でこれらが混在することも可能である。

OTDM伝送は、超短パルスを用いて時間軸上で光信号を多重分離する技術であり、電子デバイス速度以上の速度で伝送することが可能であり、次世代伝送技術として期待されてきた⁸⁾。ところが、最近のデジタル信号処理技術の進展によってデジタルコヒーレント技術が実用化され、今後の光伝送技術の主流になりつつある⁹⁾。しかし、さらにその先の技術を見据えたとき、同技術ではデジタル信号処理が性能的にもエネルギー的にもボトルネックになることが懸念される。その点、OTDMは伝送速度が電子デバイスによって制限されないために、比較的低電力で電子デバイスを超えて高速化できる点で有望である。

ただし、OTDM伝送技術には依然として3つの大きな技術的課題がある。ひとつは、超短パルスを発生し非線形光学現象を用いて超高速光ゲート処理を行うため、サイズが大きなモード同期レーザーや非線形ファイバ、EDFAなどを用いるために、集積化が困難であること。2つ目は、OTDMの受信器におけるクロック抽出および分離時のチャンネル識別が困難であったこと。そして、3つ目は、超短パルスが伝送路の高次分散の影響を受けその補償が困難であったことである。

産総研では、これら3つの課題に対して革新的な技術を提案し研究開発を進めている。まず1つ目の課題である集積化について、産総研は近年発見されたサブバンド間遷移(ISBT)量子井戸導波路中の相互位相変調効果^{10,11)}を用いた超高速光ゲートを開発した¹²⁾。我々は、ISBT

素子と主要部品に集積可能な半導体光増幅器(SOA)、クロック光パルス光源にモノリシック半導体モード同期レーザー(MLLD)、OTDM前の43 G光信号光源に電界吸収型変調器内蔵型半導体レーザー(EML)を用いた172 Gbit/s OTDM伝送に成功した¹³⁾。その際の実験構成、信号波形、ビットエラー特性をFig. 4に示す。

ビットエラー特性は、単位時間当たりのビットエラー数(BER)の受信器への光パワー依存性を調べたもので、信号自体のSNが劣化すると同じ入力パワーでも悪いエラー特性となる。Fig. 4右下の曲線を比較するとOTDMしたことで大きなSN劣化が見られないことが分かる。基本的な伝送特性は、ISBTの動作効率を改善することでさらに改善されることが予想される。

2つ目の技術課題である、クロック抽出とチャンネル識別については、4つの43 G OTDMトリビュタリ光信号毎に時間的な隙間を空けることにより、常に172 Gbit/s信号に43 GHzの信号トーンを設け、かつ、その信号トーンの位相がOTDMチャンネルに対して常に固定となるように工夫した¹⁴⁾。その結果、光スイッチで2つの172 Gbit/s OTDM信号を切り替えても、受信側で高速かつ安定的にクロック抽出を実現し、さらに常に所望のチャンネルを抜き出すことに成功した。その際、光スイッチで送信器を切り替えても10 μ 秒には切り替え後のOTDM信号からクロック抽出が完了し位相ロックがかかることが確認された。チャンネル識別が毎回安定的に動作することについては、実際に映像信号を通し、所望の映像が伝送されることで確認をした¹⁵⁾。

3つ目の課題について、産総研では独自の光パラメトリック過程を用いる可変分散補償(P-TDC)を提案し¹⁶⁾、ピコ秒パルスによる172 Gbit/s OTDM伝送の可変分散補償を行った¹⁷⁾。さらに、4次分散補償まで考慮したフェムト秒パルスの可変分散補償に成功している¹⁸⁾。P-TDCに関する詳細は、(3)光パス・コンディショニングで述べる。

このように、OTDM技術は、光送受信部が集積化によりバタフライパッケージ程度の大きさになり、既存の電子デバイスによる安定したクロック抽出・チャンネル識別が適用され、伝送路の高次分散も自律的に補償され安定

Fig. 4 Experimental setup and results (eye pattern and BER characteristics) of 172 Gbit/s OTDM transmission. In the BER curve, triangles are for the 43 Gbit/s NRZ Back-to-back scheme, solid squares are for 43 Gbit/s RZ, open circles are for 172 Gbit/s OTDM. VSR: very short reach transceiver using EML for transmitter; CLK: clock; PD: photodiode; CR: clock recovery; PC: polarization controller; PM: polarization maintaining EDFA; Eye: eye pattern measurement; ED: error detector.

な伝送が可能となれば実用化の道も開ける。

(2) 光パス・プロセッサ：シリコンフォトニクスによる光マトリックス・スイッチ

現在までのところ、ネットワークにおいて本格的に用いられた光スイッチには、リコンフィギュラブル光アド・ドロップ・マルチプレクシング(ROADM)用の波長選択スイッチ(WSS)がある。言い換えれば、それ以外は、ほとんどネットワークに用いられた事例がないといえる。その要因として、光スイッチは、大規模なポート数の実現が難しい、コストや大きさに問題がある、などが挙げられる。

産総研では、シリコンフォトニクスによる光マトリックス・スイッチの開発を推進している。シリコンフォトニクスは、光の閉じ込めが強い従来石英平面光導波路に比べて飛躍的に小さくでき、その結果、ポート数の増大が可能である。実際に、 8×8 マトリックススイッチにアレイド・ウェーブガイド・グレーティング(AWG)を集積したシリコンフォトニクススイッチが、 $3 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ の大きさで実現されている¹⁹⁾。さらに、シリコンフォトニクスはCMOSとの親和性も良く、光スイッチ上にその制御回路を集積することも可能であり、その点でも大規模化に有利である。

産総研では、シリコンフォトニクスで光スイッチを実現する方法として、マッハツェンダー干渉計にヒータもしくは電極を形成しシリコンの熱光学効果もしくは電流注入によるプラズマ効果を利用するものを検討している。いずれも消費電力は非常に小さい。熱光学効果では、ポート当たり40 mW程度²⁰⁾、プラズマ効果では、1.5 mW程度²¹⁾と、光スイッチと併用する光増幅器の消

費電力に比べ無視できる程度である。さらに、スイッチ速度も、熱光学効果で μ 秒、プラズマ効果でn秒台が実現可能であり、MEMS、液晶、石英PLCなどを用いる既存技術に比して桁違いに優れた特性を示している。

この様にシリコンフォトニクスは、その材料の物理特性が大規模な光スイッチに適しているが、屈折率が石英に比べて大きく閉じ込めが強い分、導波路構造の要求精度も厳しく十分な性能を実現するには本格的な製造技術の高精度化が必要である。

(3) 光パス・コンディショニング：パラメトリック過程を用いる光ノード機能

光パス・コンディショニングは、光パスがダイナミックに切り替わる状況において、常に光パス上を流れる光信号が適切に送信先に伝送されるように伝送品質を維持する技術である。具体的には、(1)SNRの維持、(2)分散補償、(3)切り替えに伴うトランジェント対策、(4)これらを制御・監視するモニタ技術などが重要である。これら項目は、光通信全般においても重要な課題としてさまざまな取り組みが行われてきたが、実用化した実際の光通信においては、ダイナミックかつ不特定に光伝送条件が変わるような状況はほとんど想定されていない。従って、ダイナミック光パスネットワーク実現には、従来の光通信技術では未だ達成されていない「ダイナミック」という大きな課題を克服する必要がある。

産総研では、ダイナミック光パスネットワークで特に重要と思われる特長として、光信号フォーマットに無依存(位相・多値変調信号にも適用可能)であること、そして、信号の動作波長・帯域に無依存であることの2点を考慮し、光パラメトリック過程を活用する光信号処理技

術の研究開発を進めている²²⁾。

光ファイバを用いるパラメトリック過程は、超高速、広帯域、低雑音、高ダイナミックレンジ(線形性)、位相情報の保持、波長可変性、高信頼、潜在的にコンパクトかつ低コスト性がある、という比類ない特長を有するため、光パス・コンディショニング機能を実現する物理現象として非常に魅力的である。

光パラメトリック過程を用いて実現可能な光ノード機能としては、広帯域・任意波長変換器、高速波長スイッチ、高速・広帯域可変分散補償器(P-TDC)、広帯域可変光遅延装置、光増幅器、光信号再生器、全光変調フォーマット変換器、全光多重分離器、OTDM光ゲートなどがあり、全光信号処理に期待される光パス・コンディショニング機能としてはほぼすべての種類に、単に対応でき

るだけでなく、フレックスグリッドにも対応可能な高い柔軟性を兼ね備えている。

産総研の独自技術であるP-TDCの比類ない広帯域性を活用する一例として、172 Gbit/s OTDM伝送の結果をFig. 5に示す¹⁷⁾。OTDM伝送のような伝送路の高次分散が問題になる領域には不可欠な技術である。同様に、WDM信号を一括可変分散補償した結果をFig. 6に示す。

P-TDCの比類ない特長は、このような広帯域性だけでなく、可変分散の応答速度にもある。従来の可変分散補償技術は、熱や機械的な原理で分散を可変にしていたため、分散値を変化するのにm秒から秒オーダーの応答時間となっていた。これに対して、P-TDCは、分散値を変化させるのに、パラメトリック過程におけるポンプ波長を変化させればよいから、原理的にはn秒オーダーの高

Fig. 5 Experimental setup for 172 Gbit/s transmissions using P-TDC (left) and the results (right). Upper right: 172 Gbit/s eye patterns for the transmitter (up) and after P-TDC(down); Lower right: BER characteristics; LN mod: Lithium Niobate Modulator; HNLF: highly nonlinear fiber for parametric process; DSF: dispersion shifted fiber; DCF: dispersion compensating fiber; BPF: bandpass filter; VOA: variable optical attenuator; BERT: BER tester.

Fig. 6 Simultaneous dispersion compensation of WDM signals using P-TDC. T-FC stands for tunable frequency converter.

Fig. 7 Experimental setup for T-OPR (upper). And BER characteristics (lower) where ★ denotes B-to-B; △: degraded signals; □: signals after T-OPR.

速応答性が可能である。我々は、実際にP-TDCのポンプ波長の応答速度が μ 秒オーダーで動作することを確認し、分散補償としても良好なBER特性を得た²³⁾。

光パス・コンディショニングのもう1つの重要な機能として、SNRの維持、すなわち、光信号再生がある。光信号再生では、いわゆるマミシェブ型フィルタを用いた 10^6 km伝送が有名である²⁴⁾が、これは自己位相変調に基づいているために、位相変調信号には適用できない。そこで、位相変調信号に対してパラメトリック効果に基づいた光信号再生が研究されている²⁵⁾。さらに、位相変調信号の位相雑音の再生技術として、パラメトリック効果を用いる位相感応型増幅過程を活用する方法も提案されている^{26,27)}。

このように、パラメトリック効果を用いることで、さまざまな機能を実現できることが分かる。ところが、実際にこれらの機能を光ネットワークに盛り込む際、機能の数だけデバイスが必要ならばその分デバイスを多用しなければならなくなる。そこで、産総研では、極大複数の機能を1つないし集約された構成で実現できる検討を進めている。その一例として、波長可変型光信号再生器(T-OPR)の研究に取り組んでいる。これは、従来のパラメトリック光信号再生と異なり、再生される入力信号のアイドラ光を出力として使おうという提案である。このとき、パラメトリック過程のポンプ波長を変化させても均一な信号再生効果が得られるように設計できれば、可変波長変換と光信号再生機能の2つを同時にひとつの構成で実現できることになる。すでに我々は低スロープ型HNLfを用いてこれを実証した。その際の実験系とビットエラーレートの改善効果をFig. 7に示す²⁸⁾。図より、T-OPRによって、伝送ペナルティーが改善されたことが分かる。

パラメトリック効果を用いることで、光信号再生が位

相変調信号にも適用できることになるが、完全な光信号再生を実現するために振幅再生だけでなく、位相再生やタイミング再生を盛り込もうとすると、光信号再生動作が、光信号のビットレートや変調フォーマットに依存することになり、ダイナミック光パスネットワークの利点である光信号変調フォーマット無依存性が損なわれてしまう。そこで、今後は、簡易な遠隔操作で構成が切り替わり複数の変調フォーマットやビットレートに対応できる工夫が望まれる。

さらに産総研は、今後は、上記P-TDCとT-OPRを組み合わせることを検討する予定である。これにより、分散補償・任意波長変換・光信号再生の3つの機能がひとつのデバイスに構成されることになり、ダイナミック光パスネットワークに必要な光パスコンディショニングの主要機能がひとつのサブシステムに収容されることになる。

4. まとめ

将来にわたりネットワークの持続的発展を維持し、トラフィックを増大させ続けるためには、光スイッチを活用するダイナミック光パスネットワーク技術の創出が必要であり、その要素技術について、産総研の取り組みを中心に紹介した。

謝 辞

本研究成果の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」、および、文部科学省イノベーションシステム整備事業によるものである。

参考文献

- 1) R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel: *J. Lightwave Technol.* **28** (2010) 662.
- 2) D. Qian, M. Huang, E. Ip, Y. Huang, Y. Shao, J. Hu, and T. Wang: in *Proc. OFC, Los Angeles, 2011*, Paper PDPB5.
- 3) S. Namiki, T. Kurosu, K. Tanizawa, J. Kurumida, T. Hasama, H. Ishikawa, T. Nakatogawa, M. Nakamura, and K. Oyamada: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** (2011) 446.
- 4) R. Tucker: *the Opt. Fiber Commun. Conf. Expo. Nat. Fiber Opt. Eng. Conf.* [CD-ROM] (Optical Soc. Amer., Washington, DC, 2008) OMG1.
- 5) 石川 浩, 並木 周, 工藤 知宏: 産総研Today **10** (2010) 4. もしくは<http://www.aist-victories.org/>を参照のこと
- 6) K. Ishii, J. Kurumida, T. Hasama, H. Ishikawa, and S. Namiki: submitted to *Telecommunication Systems J.*
- 7) S. Shioda and S. Namiki: *Photon. Netw. Commun.* **19** (2010) 32.
- 8) H. G. Weber and M. Nakazawa (Eds.): *Ultrahigh-Speed Optical Transmission Technology* (New York: Springer, 2007).
- 9) S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** (2006) 1016.
- 10) K. S. Abedin, G.-W. Lu, T. Miyazaki, R. Akimoto, and H. Ishikawa: *Opt. Express* **16** (2008) 9684.
- 11) H. Tsuchida, T. Simoyama, H. Ishikawa, T. Mozume, M. Nagase, and J. Kasai: *Opt. Lett.* **32** (2007) 751.
- 12) R. Akimoto, S. Gozu, T. Mozume, and H. Ishikawa: *Conference on Lasers and Electro-Optics* (2011) paper CTuW2.
- 13) T. Kurosu, S. Namiki, R. Akimoto, H. Kuwatsuka, S. Sekiguchi, N. Yasuoka, K. Morito, T. Hasama, and H. Ishikawa: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** (2010) 1416.
- 14) 黒須 隆行: 特願2012-016123.
- 15) T. Kurosu, K. Tanizawa, S. Namiki, R. Akimoto, H. Kuwatsuka, T. Hasama, H. Ishikawa, T. Nakatogawa, K. Oyamada, Y. Tanaka, S. Ide, H. Onaka, and T. Asami: *OFC NFOEC 2012*, PDP5C.10.
- 16) S. Namiki: *J. Lightw. Technol.* **26** (2008) 28.
- 17) K. Tanizawa, T. Kurosu, and S. Namiki: *Opt. Express* **18** (2010) 10594.
- 18) T. Kurosu, K. Tanizawa, S. Petit, and S. Namiki: *Opt. Express* **19** (2011) 15549.
- 19) T. Hino, M. Sakauchi, J. Kurumida, S. Namiki, S. Takahashi, S. Nakamura, and A. Tajima: *The 16th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, 2011.
- 20) Y. Shoji, K. Kintaka, S. Suda, H. Kawashima, T. Hasama, and H. Ishikawa: *Opt. Express* **18** (2010) 9071.
- 21) S. Sekiguchi, T. Kurahashi, K. Kawaguchi, and K. Morito: *IEEE Photonics Society 23rd Annual Meeting*, 2010, p. WW3.
- 22) S. Namiki, T. Kurosu, K. Tanizawa, S. Petit, M. Gao, and J. Kurumida: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **18** (2012) 717.
- 23) K. Tanizawa, J. Kurumida, H. Ishida, Y. Oikawa, N. Shiga, M. Takahashi, T. Yagi, and S. Namiki: *Opt. Lett.* **35** (2010) 3039.
- 24) G. Raybon, Y. Su, J. Leuthold, R.-J. Essiambre, T. Her, C. Joergensen, P. Steinvurzel, and K. D. K. Feder: *the Optical Fiber Communication Conf. and Exhibit, Anaheim, 2002, Proc. Post-Deadline Papers*, Paper FD10.
- 25) M. Matsumoto and T. Kamio: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** (2008) 610.
- 26) K. Croussore and G. Li: *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **14** (2008) 648.
- 27) F. Parmigiani, R. Slavic, J. Kakande, C. Lundstr, M. Sj, P. Andrekson, R. Weerasuriya, S. Sygletos, A. D. Ellis, L. Grielsen, D. Jakobsen, S. Herstr, R. Phelan, J. O Gorman, A. Bogris, D. Syvridis, S. Dasgupta, P. Petropoulos, and D. J. Richardson: *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2010), paper PDPC3.
- 28) M. Gao, J. Kurumida, and S. Namiki: *Opt. Express* **19** (2011) 23258.

レーザーワード

ダイナミック光パスネットワーク (dynamic optical path network: DOPN)

ユーザやアプリケーションからのリクエストに直接応じて、光スイッチをダイナミックに切り替えることでネットワーク・サービスを行うことを特徴とする高速光回線交換網。従来のIPネットワークでは、パケット状データをIPルータで処理するため、データプレーンと制御プレーンが共通であり自由度が高い反面、超高精細映

像のような巨大容量データの転送には効率が悪いという問題があった。光スイッチの消費エネルギーは、IPルータと異なりデータ容量に対してほとんど一定であるため将来の持続発展的ネットワーク技術として期待されている。(並木 周)