

3-3 空間多重光交換技術

3-3 *Spatial Division Multiplexing Optical Switching Technology*

古川英昭

Hideaki FURUKAWA

世界規模でデータ通信量が増加しており、大量のデータ通信を将来にわたって支える大容量光ネットワークの構築が急務となっている。近年、波長多重技術をベースとする既存の光ファイバ伝送システムの能力を大幅に向上させる、マルチコア光ファイバなどを用いた空間多重光伝送技術の研究開発が盛んに行われている。一方で、1対1の光伝送から複数のポイントを接続するネットワーク化が期待されている。そこで我々は、空間多重光ネットワークを実現するために、ネットワークの中継点において光信号の経路を切り替える空間多重光交換技術の研究開発を行っている。本稿では、開発した空間多重用光スイッチや、本スイッチを用いて達成した従来の世界記録を4倍以上更新する53.3 Tbpsの光パケット信号の経路切替実験等、得られた成果について紹介する。

It is an urgent matter to achieve high-capacity optical network technologies to support data traffic which is continuously increasing in the future. Recently, spatial division multiplexing (SDM) optical transmission technologies using multi-core/multi-mode optical fiber has been actively researched to improve the capacity of current optical fiber transmission system based on wavelength division multiplexing. Furthermore, it is necessary to extend from a point-to-point transmission to a network that enables connection of multiple points. In order to realize an SDM optical network, we have researched optical switching technologies for multi-core/multi-mode optical fiber. In this paper, we show achievements of research such as a packet spatial super-channel scheme, three types of 7-core joint optical switches, and 53.3 Tbps optical packet switching demonstration which is more than 4 times the conventional world record.

1 まえがき

世界規模で年率30%を超える勢いで増大し続ける通信トラフィックに対応するために、基幹光ネットワークにはますます大容量化・低消費電力化が求められている。現在の光ネットワークでは、光回線交換(OCS: Optical Circuit Switching)方式によって、波長領域で光パス(=波長パス)が多数設定されている。光パスはそれぞれ独立して設定されているため、高品質な通信を実現できる。光レイヤにおける通信の最小粒度は、1つの光パスの帯域で決定される。近年、周波数利用効率の向上を目的としたエラスティック光ネットワークが提唱されており、光パスの帯域を柔軟に設定することが可能となる[1]。しかし、更なる帯域有効利用を考えた場合、光パス単位では不十分であるため、現在、電子ルータなどによる電気レイヤでのパケット交換が併用されている。

一方、光レイヤにおける効率的な帯域利用を目指し

て、時間領域における微細な粒度の光パケットに対して高速な経路切替えを行う光パケット交換(OPS: Optical Packet Switching)方式が提案されている。電気処理を介さないで様々なビットレートや複雑なフォーマットの光パケット交換を実現する技術は、省エネルギーで大容量なデータ伝送を実現するために重要なものである。特に、データセンターでは、大量のバーストデータの効率的な収容や低遅延化を目指して、時間分割多重方式(TDM: Time division multiplexing)の1つである光スロット多重の利用が検討されている[2][3]。光パケット交換や光スロット交換のような時間分割多重方式を実現するためには、高速な光スイッチシステムが必要となる。我々はこれまで、光ネットワーク上のパケットを光信号のまま高速に経路切替えをする、光パケットスイッチネットワークの研究開発を進めており[4]、2014年には、データ速度が12.8 Tbpsの光パケットスイッチシステムを開発した[5]。

近年、既存の波長多重分割多重(WDM: Wavelength

division multiplexing) 光ネットワークにおける容量限界を超えるために、マルチコア光ファイバやマルチモードを用いた空間分割多重(SDM: Space division multiplexing) 技術の導入が検討されており、大容量SDM-WDM 光ネットワークの研究開発が盛んに行われている。マルチコア・マルチモード光ファイバ伝送では、現在、10.16 Pbps の光信号伝送が実証されている [6]。光パケットスイッチネットワークにおいても、空間多重技術により複数の空間チャンネルを束にした光パケットを構成することで、更なるデータ速度の向上が見込まれる。このため、空間多重光パケット用の高速な経路切替処理が可能な光スイッチシステムの実現が期待されている。我々は、多数の空間・周波数資源から構成される空間・周波数スーパーチャネル光パケットを一括して光交換処理する空間・周波数スーパーチャネル光パケットスイッチング方式を提案した [7]。本方式は、スーパーチャネル及びジョイント光スイッチングの概念を基本としており、OPS システムを構成するハードウェアの簡素化や制御プレーンにおける処理負荷低減に貢献する。また、空間・周波数スーパーチャネル光パケットは空間・周波数領域では粒度が荒くなるが、時間領域にて細粒度を実現できるため、SDM-WDM 光ネットワークにおいて多粒度の光チャンネルを提供することができる。また、空間多重によるパイロット信号伝送も可能であり、デジタル信号処理の負荷を軽減することが可能である [8]。本稿では、考案した空間・周波数スーパーチャネル光パケットフォーマットや新たに開発した3種類の空間多重用光スイッチについて紹介する。また、最近、空間多重用光スイッチを用いて従来の光パケット交換のデータ速度の世界記録を3年ぶりに4倍以上更新する、53.3 Tbps の光パケットスイッチング実験に成功し [9]、その後、83.3 Tbps の更なる記録更新を達成した [10]。図1に光パケットスイッチング技術の進展を示す。本稿では、53.3 Tbps の光パケットスイッチング実験の

結果について述べる。

2 空間・周波数スーパーチャネル光パケット及び空間多重用光スイッチシステム

光パケットの更なる大容量化のために、空間・周波数スーパーチャネル光パケットを提案した。図2に、空間・周波数スーパーチャネル光パケットのフォーマットを示す。光パケットは、マルチコア光ファイバのコア数 M 、波長多重数 W の場合、 $M \times W$ の光ペイロードから構成される。光ペイロードはマルチコア光ファイバのコアをそれぞれ伝送する。光ペイロードの1つに、宛先アドレスやパケット長情報を含んだヘッダ信号が付加される。また、光ペイロードが伝送されるコアとは異なるコアを使用して、パイロット信号の付加が可能である。パイロット信号を用いることで、自己ホモダイン検波が可能であるため、受信機のデジタル信号処理の負荷を低減することができる。さらに、この空間スーパーチャネル光パケットを波長軸に拡張展開することで、空間・周波数スーパーチャネル光パケットとして使用できる。ここではコアごとに W 波長分の光ペイロードが追加されている。例えば、1つの光ペイロードのデータレートを10 Gbps とすると、空間・周波数スーパーチャネル光パケットのビットレートは $M \times W \times 10$ Gbps となる。

図3に、空間・周波数スーパーチャネル光パケットに対応した OPS システムの基本構成を示す。 N はシステムに接続された入出力ポート用のマルチコア光ファイバの本数を示す。また、 M はマルチコア光ファイバ1本あたりのコア数を示す。また、 L は光バッファにおけるマルチコア光ファイバ遅延線の本数を示す。OPS システムは、スイッチコントローラ(ヘッダ処理装置、スケジューリング装置を含む)、 M 個のコアの光ペイロードを一括してスイッチング可能な $1 \times N$ マルチコア一括光スイッチ、 $N \times 1$ 光バッファから構成される。 $N \times 1$ 光バッファは、 $1 \times L$ のマルチコア一括光スイッチと L 本のマルチコア光ファイバ遅延線からなる。スイッチング時の動作内容について述べる。各ポートに入力された光パケットから、ヘッダ信号を含む光ペイロードが分離され、ヘッダ処理装置で受信される。ヘッダ処理装置にてヘッダ信号の中の宛先アドレスが認識処理され、光パケットの出力ポートが決定される。ヘッダ処理装置の制御信号により、転送先の出力ポートの光スイッチのみ ON 状態になり、光パケットを通過させる。一方、別のポートから入力された光パケットが同タイミングで出力ポートに転送される場合、事前に衝突可能性がスケジューリング装置によって解析され、衝突する可能性がある場

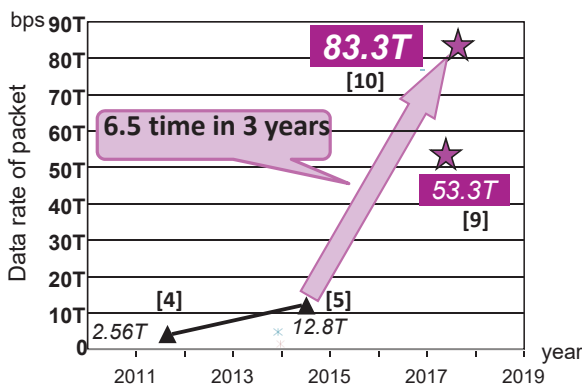


図1 光パケットスイッチングにおける光パケットのデータ速度の進展

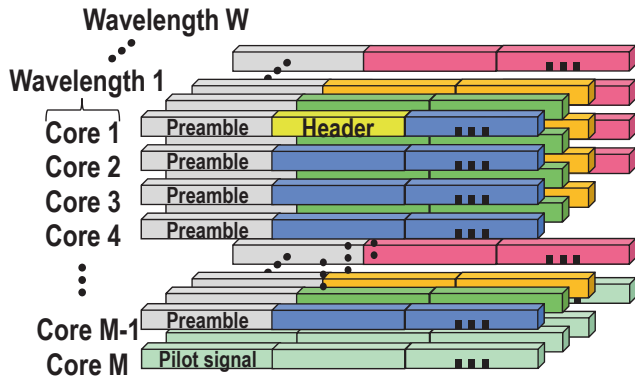


図2 空間・周波数スーパーチャネル光パケットフォーマット

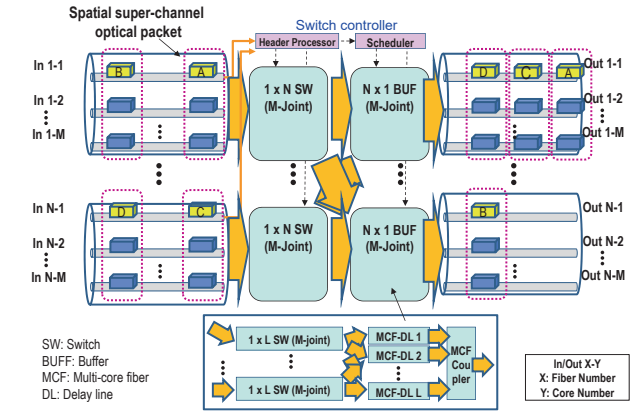


図3 空間・周波数スーパーチャネル光パケットに対応した光パケットスイッチシステム

合は、光バッファの光スイッチに制御信号を送り、適切な長さの光ファイバ遅延線に経路を切り替えて、出力タイミングをずらすことで衝突を回避する。

今回、我々は7コア光ファイバに適応した OPS システムとして、1 × 4 超高速並列光スイッチシステムを開発した [9]。図4に示すように、本システムは、複数の電界吸収型光変調器 (EAM: Electro-absorption modulator) を並列に並べた光スイッチと、複数の電界吸収型光スイッチを同時に駆動させるスイッチコントローラの要素技術から構成される。

本システムは、7コアの空間チャンネルから構成される空間スーパーチャネル光パケットに対して、各コアの光を一括で同方向の経路に切り替えることができる。EAM ベースの光スイッチは、ナノ秒オーダーの高速動作が可能であり、なおかつ光信号の波長や偏波、位相の変化によるスイッチ特性への影響が少ないため、波長多重方式や高度な信号変調方式にも対応可能である。本スイッチシステムは、約 80 ナノ秒の時間で7コアスーパーチャネル光パケットの経路切替えが可能

である。

マルチコアファイバはコア数拡大により大容量化伝送を実現する一方で、中継装置におけるスイッチシステムのスイッチ素子の数はコア数に比例して増加する。このため、我々はスイッチ素子数の削減や空間多重信号分離素子の不使用を目指して、空間光学技術を活用したマルチコアファイバ一括光スイッチを提案した。

初めに、ミラーベース7コア一括光スイッチを開発した(図5)。本スイッチでは空間多重信号分離素子を使用しておらず、1個のスイッチング素子で多種多様な空間多重用ファイバに対応可能である。2入力、2出力のポート数を持ち、中央の素子を回転させると、光信号の反射・半透過・透過を選択することができ、出力ポートを選択することができる。スイッチング速度は数ミリ秒である一方、挿入損失が2 dB以下の低損失な光スイッチである。

さらに、マルチコアファイバ一括光スイッチの更なる高速化を目指して、音響光学変調器(AOM: Acousto optic modulator)ベース7コア一括光スイッ

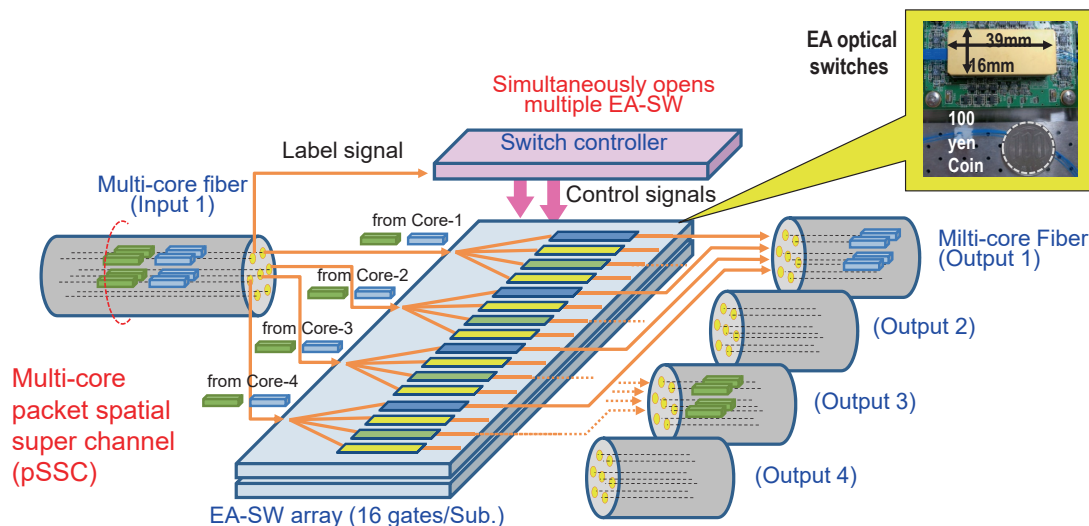


図4 EAM ベース超高速並列光スイッチシステム

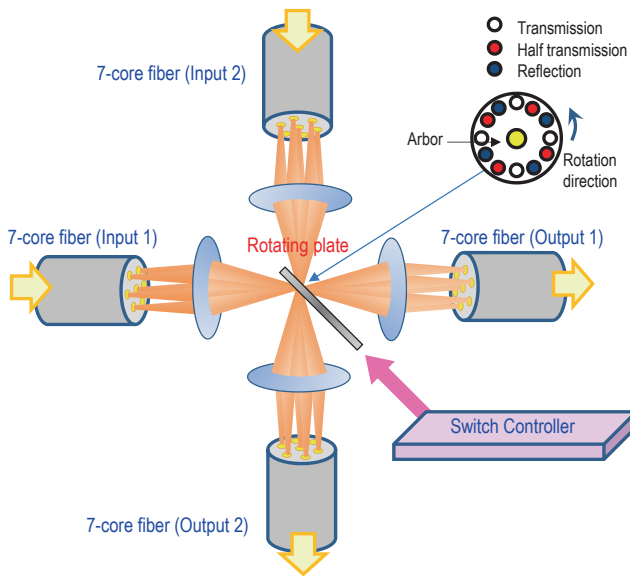


図5 ミラーベース7コア一括光スイッチ

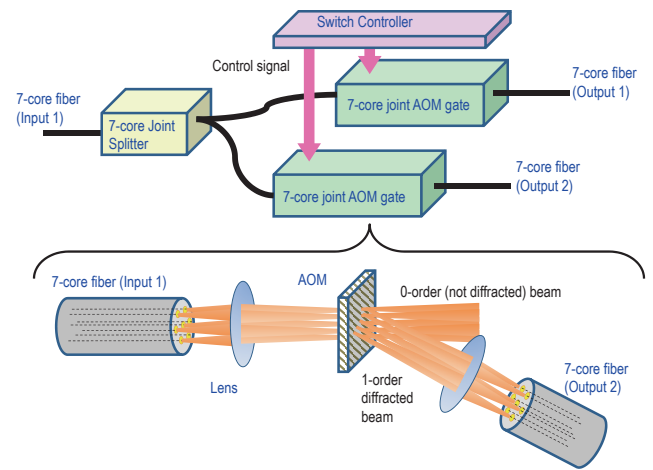


図6 AOMベース7コア一括光スイッチ

チを開発した(図6)。本スイッチにおいても、空間多重信号分離素子を使用しておらず、1個のスイッチング素子で駆動する。1入力、1出力のポート数を持ち、制御信号のON/OFFによりAOMを制御して、光信号の透過・遮断を選択することができる。ここで、前段に1×2マルチコアファイバカップラを用いると、1×2光スイッチとして利用可能である。スイッチング速度は数マイクロ秒であり、挿入損失は10 dB程度である。

システム、AOMベース7コア一括光スイッチ、ミラーベース7コア一括光スイッチのそれぞれの特長を活かして、ネットワークに必要なパケット転送機能やパケット輻輳回避機能、プロテクション機能、バイパス機能等を実現する。図7にSDM-TDMネットワークの概念図とネットワーク機能及び使用する光スイッチを示す。

3 7コアスーパーチャネル光パケットスイッチングの実証実験 [9]

我々は、空間多重光ネットワークに必要な各種機能を実現するために、様々な空間多重用光スイッチング技術を開発した。EAMベース超高速並列光スイッチ

今回我々は、53.3 Tbps 空間・周波数スーパーチャネル光パケットスイッチングの動作を実証する。図8に実験系を示す。光送信機では、偏波多重された32 Gbaud・QPSK変調方式の光ペイロードが64波長分生成される。それら64波長は1537-1562.23 nmの波長帯で50 GHz間隔となっており、短波長側からλ₁-λ₆₄とする。これらの光ペイロードを光学的に複製して、28 km・19コア光ファイバ及び2 km・7コアファイバそれぞれの7コア(コア1~コア7)に同じタイミングで入力した。データの送信時に付加した冗長データであるFEC(Forward Error Correction)はペイ

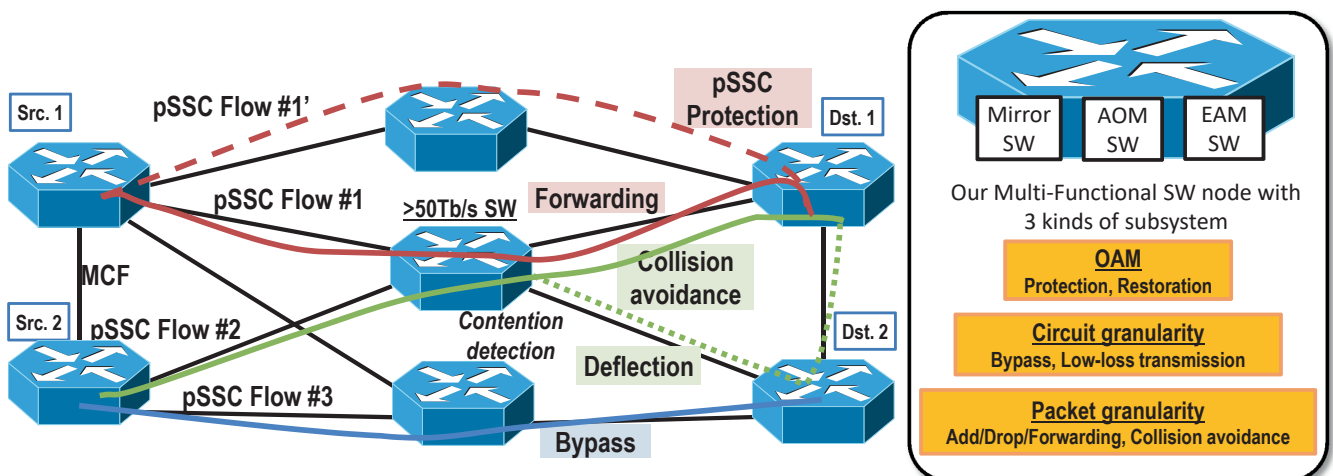


図7 SDM-TDMネットワークにおけるネットワーク機能と光スイッチ

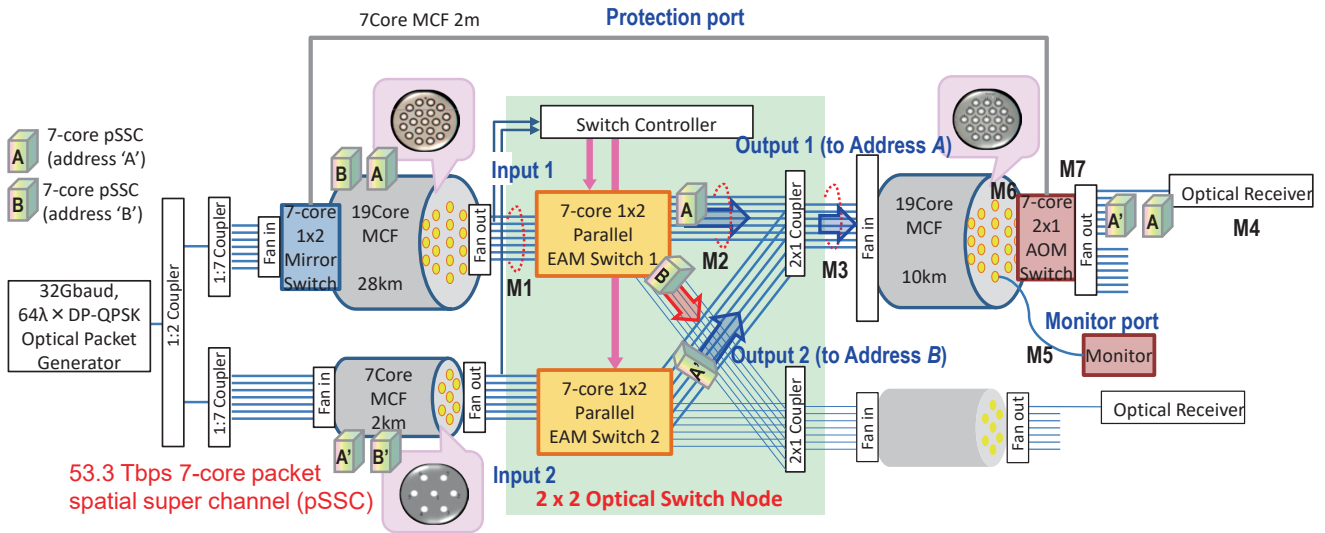


図8 53.3 Tbps 空間・周波数スーパーチャネル光パケットスイッチング実験系

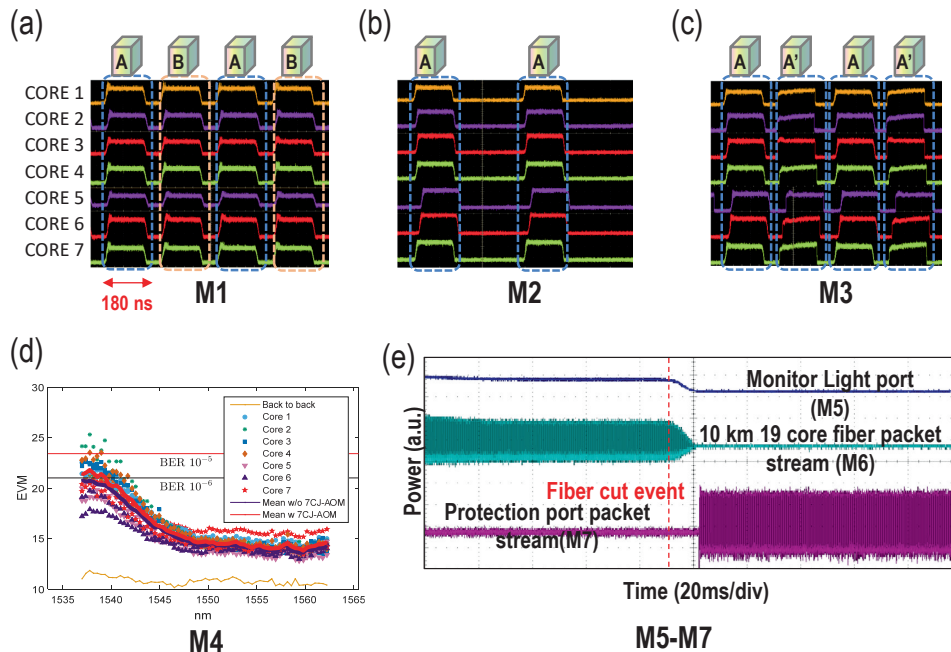


図9 (a) 入力ポート1における光パケット列の時間波形、(b) 1 × 2光スイッチシステム1によって出力ポート1へ転送されたアドレスAの光パケット列の時間波形、(c) 1 × 2光スイッチシステム1、2によって転送された後にマージされたアドレスAの光パケット列の時間波形、(d) 計測された各光パイロートのBER、(e) プロテクション動作時の各ポートの光信号の時間波形

ロードの7%である。結果として、7コアを用いた53.3 Tbpsの空間・周波数スーパーチャネル光パケットとなる。我々は、16ビットの“0x0001”宛先アドレス(アドレスAとする)を持つ光パケットと、“0x0010”宛先アドレス(アドレスBとする)の2種類の光パケットを生成した。

パケット転送機能を実証するために、28 km・19コア光ファイバ及び2 km・7コアファイバを1 × 2 EAM ベース超高速並列光スイッチシステム2台から構成される2 × 2のOPSシステムに接続し、それぞれ入力ポート1、入力ポート2として7コアスーパー

チャネル光パケットを入力する。スイッチコントローラが光パケットの宛先を判断し、超高速並列光スイッチへ制御信号を送り、出力経路を切り替える。ここでは、アドレスAの7コアスーパーチャネル光パケットのみを出力ポート1である10 km・19コアファイバに転送するように設定している。なお、今回出力ポート2は、マルチコア光コアファイバは接続せず、結合器までの実験としている。図9(a)–(c)にパケット転送時の光パケット時間波形を示す。これにより、宛先アドレスに応じて、光パケットの出力ポートが正しく切り替わっていることが分かる。なお、図8及び9の

M1～M7は波形や信号品質を計測した場所を示す。その後、光パケットを光受信機で受信し、各光パイロートのエラー・ベクトル振幅(EVM: Error vector magnitude)を測定し、ビットエラーレート(BER: Bit-error rate)を算出した。図9(d)に示すように、全ての光パイロードでBERが7% FECによる回復限界の 3.3×10^{-3} 以下となり、高い通信品質であることを確認した。

次に、プロテクション機能を実証するために、28 km・19コア光ファイバの前に1×2ミラーベース7コア一括光スイッチを設置して、2出力ポートから同時に光信号が出力されるように半透過状態にした。また、10 km・19コア光ファイバの後に2×1 AOMベース7コア一括スイッチを設置し、入力ポートの一方を2 mの7コアファイバでミラーベース7コア一括光スイッチと接続し、プロテクションポートとした。なお、10 km・19コア光ファイバの後に、ファイバ切断などによる光の途絶を検知するためのモニタポートとモニタを設置している。モニタリングの結果を基に、2×1 AOMベース7コア一括スイッチの入力ポートを切り替える設定にした。光パケット列を10 km・19コア光ファイバやプロテクションポートを通過している状態で、10 km・19コア光ファイバの接続を外した。図9(e)に各ポートにおける光信号波形を示す。モニタへの光信号が途絶した瞬間に、2×1 AOMベース7コア一括スイッチが作動して、10 km・19コア光ファイバからプロテクションポートに切り替わっていることが分かる。ファイバ切断を手動で行ったため、切り替わりの時間は約10 msであったが、AOMスイッチの動作時間は数マイクロ秒のため、更に切り替わりの時間を短縮することは可能である。

5 結論

空間多重光ネットワークの実現を目指して、ネットワークの中継点において光信号の経路を切り替える空間多重光交換技術の研究開発を行っている。本稿では、開発した空間多重用光スイッチや、本スイッチを用いて達成した従来の世界記録を4倍以上更新する53.3 Tbpsの光パケット信号の経路切替実験等、得られた成果について紹介した。

【参考文献】

- 1 M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol.47, no.11, pp.66–73, Nov. 2009.
- 2 K. Tokas, I. Patronas, C. Spatharakis, D. Reisis, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, "Slotted tdma and optically switched network for disaggregated datacenters," in 2017 19th International Conference on

- Transparent Optical Networks (ICTON), no.Mo.B3.4, pp.1–5, July 2017.
- 3 S. Okamoto, Y. Imakiire, M. Hirono, and N. Yamanaka, "Data-center network (dcn) architectures with reduced power consumption," in 20th Annual Conference Net-Centric 2017, Jan. 2018. [Online]. Available: http://biblio.yamanaka.ics.keio.ac.jp/file/Net-Centric2017_okamoto.pdf
- 4 S. Shinada, H. Furukawa, and N. Wada, "2.56 Tbit/s/port Dual-Polarization DWDM/NRZ-DQPSK Optical Packet Switching and Buffering," in Proc. of the 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), no. Tu.3.K.3, Sept. 2011.
- 5 S. Shinada, J. M. Delgado Mendinueta, R. S. Luis, and N. Wada, "Operation of a 12.8 Tbit/s DWDM polarization division multiplexing 16-QAM optical packet switching node after 50-km of fiber transmission," in Proc. of the 40th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC), no.We.3.5.4, Sept. 2014.
- 6 D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," in Proc. of the 43rd European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC), no. Th.PDP.A.1, Sept. 2017.
- 7 H. Furukawa, J. M. Delgado Mendinueta, N. Wada, and H. Harai, "Spatial and Spectral Super-channel Optical Packet Switching System for Multigranular SDM-WDM Optical Networks," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.* vol.9, no.1, pp.A77–A84, 2017.
- 8 J. M. Delgado Mendinueta, R. S. Luis, B. J. Puttnam, J. Sakaguchi, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, and T. Kawanishi, "Digital signal processing techniques for multi-core fiber transmission using self-homodyne detection schemes," in Proc. the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.1880–1884, Sept. 2014.
- 9 J. M. D. Mendinueta, S. Shinada, R. S. Luis, Y. Hirota, H. Furukawa, H. Harai, and N. Wada, "Time-division Packet Spatial Super-channel Switching System with 53.3 Tb/s/port for Converged Inter/Intra Data Center Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8329231/>
- 10 J. M. D. Mendinueta, S. Shinada, Y. Hirota, R. S. Luis, H. Furukawa, and N. Wada, "83.33 Tb/s Coherent PDM-8PSK SDM-TDM Spatial Super-channel and High-speed Core-joint Switching System," in Proc. of the Optical Networking and Communication Conference and Exhibition (OFC 2018), no.Th3H.2, March 2018.

古川英昭 (ふるかわ ひであき)

ネットワークシステム研究所
フォトリックネットワークシステム研究室
研究マネージャー
博士(工学)
フォトリックネットワーク、光情報処理