

# 超高速フォトニック技術による光ファイバー伝送技術

宮 崎 哲 弥

## Ultrafast Photonic Technology for Optical Fiber Transmission

Tetsuya MIYAZAKI

Recent progress of ultrafast 160 Gb/s transmission technology was reviewed from various subsystem element technology, such as pulse sources, clock recovery techniques and optical switches. Field trial of 160 Gb/s transmission on installed fiber has also been reported. Employment of the new modulation/demodulation format including the choice of forward error correction (FEC) technique combination with novel photonic integrated device is expected to enhance the reality towards ultrafast transmission system of 160 Gb/s and beyond.

**Key words:** 160 Gb/s transmission, ultrafast, subsystem

インターネットトラフィックは経済状況にかかわらず伸び続けており、トラフィックを効率的に収容する光伝送技術の実現が要請される。その技術候補として、1波長あたりのビットレートが160 Gb/sの超高速光通信方式<sup>1-3)</sup>は、現在商用化されている10 Gb/sあるいは導入目前の40 Gb/s波長多重(WDM)システムに比べ、少ない波長数でトラフィックの収容が可能となるため、波長ごとのパス設定、品質監視、障害時の切り替えなどのネットワーク運用管理の大幅な簡便化が将来期待できる。100 Gb/sを超えるビットレートにおいては、電気信号処理のスピード限界のため、短パルス光源を用いた光時分割多重分離(OTDM)技術は、超高速160 Gb/s光信号と40 Gb/sあるいは10 Gb/s低速電気信号とのインターフェイスを提供する意義がある。しかし、160 Gb/s伝送の実現には、安定な光パルス信号の生成、伝送路で被る分散および偏波分散に対する対処、受信系の簡便化などの挑戦すべき多くの技術課題が依然残されている。

本稿では、160 Gb/s伝送方式についてのこれらの課題に関する最近の内外の研究成果の紹介と技術動向を概説する。

### 1. 超高速フォトニック技術を適用した160 Gb/s伝送サブシステム

図1に、160 Gb/s OTDM光伝送システムの概念図をベースレートが40 Gb/sの場合について示す。送信側(図1(a))はパルス光源(pulse source)および時分割多重部(OTDM-MUX)から構成され、受信側(図1(b))は分散およびPMD(polarization-mode dispersion)補償部(dispersion & PMD compensator)、クロック抽出部(clock recovery)、時分割分離部(DEMUX)、受信器(DET1-4)から構成される。

#### 1.1 パルス光源

パルス光源には、分散耐力の点から適度に短いパルス幅、さらに低ジッター性、高消光比(コントラスト)が要求され、160 Gb/sに用いるためのパルス幅の目安はビットスロット(パルス間隔)の3分の1(約2 ps)以下となる<sup>1)</sup>。そのほかに、波長可変性能さらに長期信頼性が要求される。パルス光源としては、すぐれた性能をもちかつ小型のモード同期レーザー(MLLD)が開発されている<sup>4)</sup>。また、連続光源(CW source)と電界吸収型変調器(EAM)あるいはLDの直接変調のゲインスイッチ動作で得られるための光パルスを、高非線形光ファイバー(HNLF)を用

いたパルス圧縮により、上記要求条件を十分に満足するパルス光源を構成できることが報告されている<sup>5)</sup>。この方法では、パルス光源の構成が大きくなるものの、MLLDで懸念されるロック状態の逸脱の心配はない。パルス光源の長波長側への波長可変範囲を拡張する手段として、フォトニッククリスタルファイバー (PCF) を用いた Raman soliton self-frequency shift 効果により、10 GHz 繰り返し光パルスの 1550~1680 nm までの連続波長可変動作が報告されている<sup>6)</sup>。

## 1.2 光時分割多重部 (OTDM-MUX)

光時分割多重部においては、多重される元光信号 (トリビュタリーチャンネル) を光パルスが重ならないように、一定のパルス間隔となるように多重する。トリビュタリーチャンネルのビットレート (ベースレート) が 40 Gb/s の場合、4 つの異なる情報信号のチャンネルを多重することにより 160 Gb/s の超高速光信号が得られる。4 個の電界吸収型光変調器 (EAM) とバルク光学系を用いた 40 Gb/s 4 チャンネル多重用 OTDM モジュールにより 160 Gb/s OTDM 光信号を生成し、EAM の温度設定により多重される光パルスの相対位相を調整して、対分散特性にすぐれた搬送波抑圧方式 (CS-RZ) 型に 160 Gb/s 光信号スペクトルを整形して送信できることが報告されている<sup>2)</sup>。また、小型化の観点から、多重部に PPLN (擬似位相整合 LiNbO<sub>3</sub>) 導波路を用いて 40 Gb/s、4 チャンネル光信号を一括多重する方式も報告されている<sup>7)</sup>。160 Gb/s の伝送評価実験においては機材を簡略化するため、1 つの変調器により生成された単一の元光信号を、多段遅延光回路によりコピーを時分割多重して 160 Gb/s 光信号を模擬的に生成する方式も用いられている<sup>3)</sup>。

## 1.3 分散および偏波分散補償

超高速光伝送システムでは、伝送路の温度変動による分散変動および偏波分散の変動によりパルス波形が変動するため、いかに信号品質としての符号誤り率 (BER: bit error rate) を所望値以下に維持するかが主要技術課題のひとつである。分散に関しては累積分散を ±1 ps 程度の精度で調整する必要があり<sup>1-3)</sup>、分散変動を他の劣化要因 (偏波分散および非線形) と切り分けて高精度に検出して、可変分散デバイスを制御する適応分散制御方式に関する研究が行われている。特に超高速システムでは、電気信号処理が困難であるため、非線形受光素子を用いた非同期チャープモニターなどの光信号処理による分散変動検出方法が提案されている<sup>8)</sup>。また、信号品質モニター法として、低速電気信号処理が可能な AM あるいは FM トーン検出法も適用可能であると考えられる。160 Gb/s 用可変分散デバイスとして

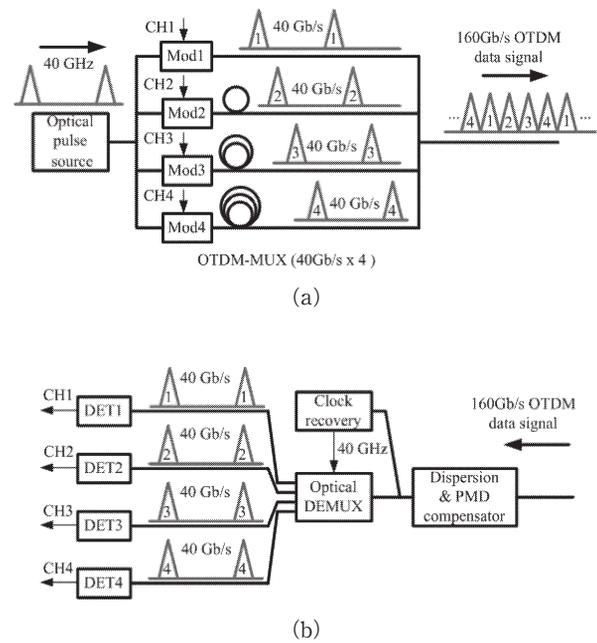


図1 160 Gb/s OTDM 光伝送システム概念図。(a) 送信系、(b) 受信系。

は、信号帯域幅 (約 3 nm) において群遅延リプルが少なく、大きな分散可変量が低損失で得られることが要求される。中心波長の分散に加え信号帯域内の分散スロープも制御する必要があり、光ファイバグレーティングを用いて印加する温度分布設定により、160 Gb/s 帯域内の分散スロープの補償が可能な可変分散スロープ補償器が開発されている<sup>9)</sup>。

偏波分散 (PMD) は、1 ビット時間の 10% 以下の平均 differential group delay (DGD) が要求され、160 Gb/s 伝送においては 6.25 ps の 10 分の 1 以下の 0.625 ps 以下となるが、PMD は波長ごとに異なる経時変動を呈しバースト的な符号誤りを引き起こすため、最も深刻な信号品質劣化および変動要因である。受信側に Stokes パラメータを抽出し偏光度を最大値制御する適応的 PMD 制御を偏波安定化制御とともに用い、さらに送信側に偏波スクランブラーを用いた、敷設光ファイバ上での 160 Gb/s 単一波長伝送実験が報告されている<sup>10)</sup>。DGD には波長依存性があるため、160 Gb/s の WDM 伝送を行う場合は、現状では光学的 PMD 補償制御を波長ごとに行う必要があり、小型低コスト化が課題となる。PMD の対処方針として、CS-RZ-DPSK などの帯域効率にすぐれた変調方式や、バースト耐力のある誤り訂正との組み合わせも技術候補として考慮すべきであろう<sup>11)</sup>。

## 1.4 クロック抽出

クロック抽出は受信系においては DEMUX (パルス分

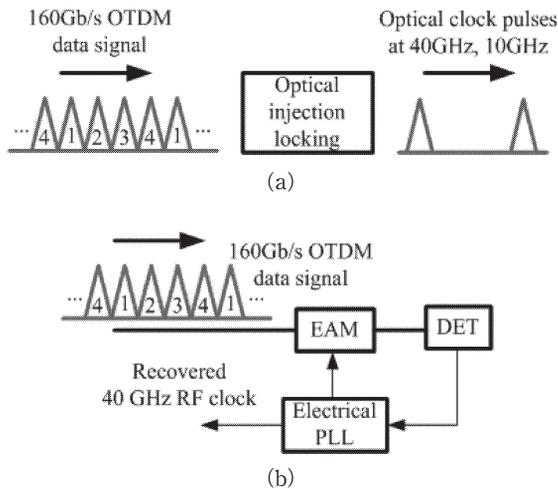


図2 クロック抽出方式。(a) 全光学的方式，(b) 光電気ハイブリッドPLL方式。

離)を行うために必須であり，図2に示すように，160 Gb/s から到来光パルスに同期したベースレート分周成分 (sub-harmonic) のクロック (40 GHzあるいは10 GHzなど) を抽出する方法として，注入同期 (injection locking) などによる全光学的的手法 (図2 (a)) と，光スイッチと電気PLL (phase-locked loop) を組み合わせた光電気ハイブリッドPLL方式がある (図2 (b))。前者のMLLDへの注入同期による分周成分クロック抽出においては，ランダムデータ光パルスの注入に起因する同期位相スリップを防ぐため，初段MLLDでビット同期光クロックを生成させ次段MLLDで分周光クロックを生成させる2段構成が提案されており<sup>12)</sup>，最近報告されている160 Gb/sから160 GHz光クロックを生成可能なMLLDを初段MLLDに適用することで実現できるであろう<sup>13)</sup>。注入同期によるクロック抽出は小型構成であるが，入力光パルスの偏波変動により動作が不安定となるため，160 Gb/s光ファイバー伝送よりはノードあるいは装置内における集積光信号処理回路

への適用が期待できる。次章で述べる160 Gb/sフィールド伝送実験におけるクロック抽出法として採用実績があるのは後者のハイブリッドPLL方式であり，電界吸収型変調器 (EAM) を160 Gb/s光信号と低速ゲートRF信号との位相比較器として用い，ゲートRF信号周波数で動作するVCO (voltage controlled oscillator) にPLL制御する構成となっている<sup>2,10)</sup>。

### 1.5 DEMUX

超高速DEMUX用デバイスとしては，制御光パルス (ポンプ光パルス) によりゲートされるさまざまな光制御光スイッチが開発されている<sup>14)</sup>。半導体光アンプ (SOA) を石英導波路基板上に並列集積し，外部制御光パルスを導入して，四波混合 (FWM) による160 Gb/s光信号の20 Gb/s 4チャンネルへのシリアルパラレル変換が報告されている<sup>7)</sup>。160 Gb/sを超えるビットレートでは，SOAを用いた対称マッハ・ツェンダー光スイッチ (SMZ) が336 Gb/sにおいて<sup>15)</sup>，分散フラット光ファイバーを用いた非線形ループミラー (NOLM) 光スイッチが640 Gb/sにおいてDEMUX動作しており<sup>16)</sup>，今後より少ないスイッチングエネルギーで安定に動作する光制御光スイッチの開発が期待される。2段のEAMを抽出したRFクロック信号により駆動する方式は，簡便に1つのトリビュタリーチャンネルを選択することができる<sup>2,3)</sup>。

## 2. 敷設光ファイバーを用いた160 Gb/s伝送実証実験

160 Gb/s光ファイバー伝送は依然先端的研究テーマであるが，敷設光ファイバーを用いたフィールド伝送実験において，PMD変動対処方式など実環境下での上記サブシステム要素技術の完成度と問題点を評価することにより研究開発を加速させることが期待できる。160 Gb/s光伝送のフィールド実証実験は，これまでHHI (Heinrich-Hertz-Institute) など欧州の研究機関から報告されている<sup>1,10)</sup>。今

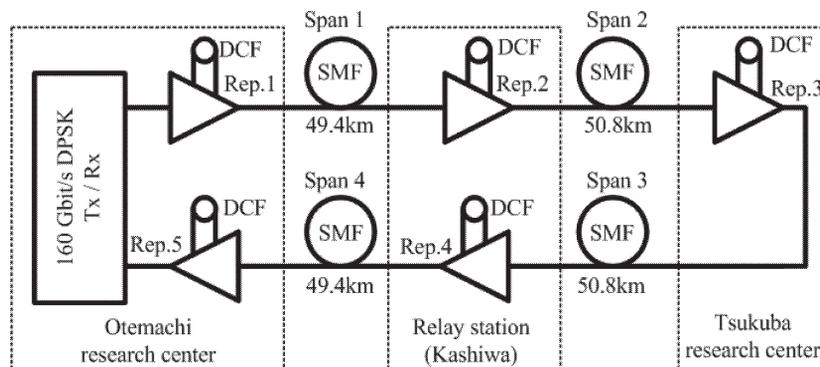


図3 光テストベッドのネットワーク構成。

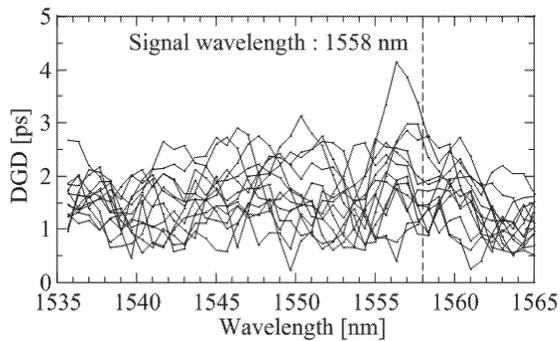


図4 DGDの波長依存性の経時変動。点線：信号光波長1558 nm。

年(2004年)7月に、KDDI研究所と共同でJGNII<sup>\*1</sup>光テストベッド(大手町〜つくば間)において160 Gb/s-DPSKフィールド伝送実験を実施した<sup>17)</sup>。図3に、光テストベッドのネットワーク構成を示す。大手町およびつくばのJGNIIリサーチセンター局と中継局(柏)に分散補償ファイバー(DCF)を含む光増幅中継器が設置され、各局間は約50 kmのSMF(ITU-T G.652準拠)で接続されており、今回大手町からの光信号をつくばで折り返す4スパン構成の総長200 kmの伝送路構成とした。スパン2と3の一部に架空ファイバー区間が含まれるため、実環境に即した光テストベッドとなっている。160 Gb/s送受信系の概略構成は図1と同等であり、送信側(Tx)において40 GHz繰返し光パルスを2段接続のEAMを用いて生成し、40 Gb/sで差動位相変調(DPSK)を施し高非線形光ファイバーによりパルス圧縮(2.3 ps)した後、偏波保持型OTDM装置を用いて単一偏波160 Gb/s-DPSK信号(PN 7段)を送出した。受信側(Rx)において、自動追尾型偏波スタビライザーと偏光子からなる偏波スタビライザーを簡易型のPMD補償器として配備し、DEMUXには2段接続のEAMをハイブリッドPLL方式クロック抽出回路で40 GHzクロックにより駆動した。DEMUX後の40 Gb/s DPSK信号を受信した後、10 Gb/sへ電気時分割して符号誤り率を測定した。図4に、およそ30分間隔で日中から夕刻にかけて8時間測定したDGDの波長依存性を重ねがきしたものを示す。点線で示した信号光波長(1558 nm)において最大3 psほどのDGDが観測された。図5に、16トリビュタリーの10 Gb/s信号の平均誤り率から求めた $Q$ 値と信号波長付近のDGDの相関特性を示す。送信側で偏波を変化させ偏波スタビライザーを用いた場合(○：最悪値，●：最良値)，2 ps(タイムスロットの32%)以上の

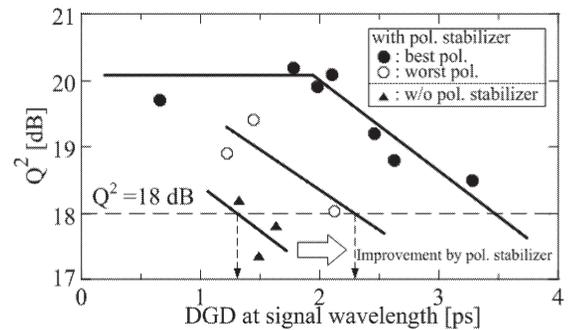


図5  $Q$ 値と信号波長付近のDGDの相関特性。偏波スタビライザーを用いた場合(○：最悪値，●：最良値)，偏波スタビライザーなしの場合(▲)。

DGDがあっても200 km伝送後に安定な伝送特性(18 dB< $Q$ )が得られ、用いない場合(▲)よりも許容されるDGD(DGD tolerance)が改善することがわかった。

160 Gb/s光伝送のための最近のサブシステム技術を概観し、敷設光ファイバーテストベッドでの伝送実証実験の一部を紹介した。最大の課題はPMDによる信号品質の変動に対する対処法の確立であり、変調方式や誤り訂正符号なども組み合わせて検討すべきである。さらに、送受信系の安定化、小型化なども新規集積光デバイスの採用により今後期待できる。

## 文 献

- 1) R. Ludwig, U. Feiste, C. Schmidt, C. Schubert, J. Berger, E. Hillinger, M. Kroh, T. Yamamoto, C. M. Weinert and H. G. Weber: "Enabling transmission at 160 Gbit/s," *Optical Fiber Communication Conference (OFC '02)*, TuA1 (Anaheim, USA, 2002) pp. 1-2.
- 2) H. Murai, M. Kagawa, H. Tsuji and K. Fujii: "Single channel 160 Gbit/s carrier-suppressed RZ transmission over 640 km with EA modulator based OTDM module," *European Conference on Optical Communications (ECOC '03)*, Mo3.6.4 (Rimini, Italy, 2003) pp. 52-53.
- 3) M. Daikoku, T. Otani and M. Suzuki: "160-Gb/s four WDM quasi-linear transmission over 225-km NZ-DSF with 75-km spacing," *Photonics Technol. Lett.*, 8 (2003) 1165-1167.
- 4) Y. Hashimoto, H. Yamada, R. Kuribayashi and H. Yokoyama: "40-GHz tunable optical pulse generation from a highly stable external-cavity mode-locked semiconductor laser module," *Optical Fiber Communication Conference (OFC '02)*, WV5 (Anaheim, USA, 2002) pp. 342-343.
- 5) K. Taira and K. Kikuchi: "Subpicosecond pulse generation using an electroabsorption modulator and a double-stage pulse compressor," *Photonics Technol. Lett.*, 9 (2003) 1288-1290.
- 6) K. S. Abedin, T. Miyazaki and F. Kubota: "Wavelength-conversion of pseudorandom pulses at 10 Gb/s by using

\*1 JGNII ホームページ: <http://www.jgn.nict.go.jp>

- soliton self-frequency shift in a photonic crystal fiber,” *Photonics Technol. Lett.*, **4** (2004) 1119-1121.
- 7) T. Ohara, H. Takara, I. Shake, K. Mori, K. Sato, S. Kawanishi, S. Mino, T. Yamada, M. Ishii, I. Ogawa, T. Kitoh, K. Magari, M. Okamoto, R. V. Roussev, J. R. Kurz, K. R. Parameswaran and M. M. Fejer: “160-Gb/s OTDM transmission using integrated all-optical MUX/DEMUX with all-channel modulation and demultiplexing,” *Photonics Technol. Lett.*, **2** (2004) 650-652.
  - 8) T. Inui, K. Mori, T. Ohara, H. Takara, T. Komukai and T. Morioka: “160 Gbit/s adaptive dispersion equalizer using a chirp monitor with a balanced dispersion configuration,” *European Conference on Optical Communications (ECOC '03)*, Tu3.6.3 (Rimini, Italy, 2003) pp. 266-267.
  - 9) S. Matsumoto, M. Takabayashi, K. Yoshiara, T. Sugihara, T. Miyazaki and F. Kubota: “Tunable dispersion slope compensator with a chirped fiber grating and a divided thin-film heater for 160-Gb/s RZ transmissions,” *Photonics Technol. Lett.*, **4** (2004) 1095-1097.
  - 10) S. Kieckbusch, S. Ferber, H. Rosenfedt, R. Ludwig, C. Boerner, A. Ehrhardt, E. Brinkmeyer and H. G. Weber: “Adaptive PMD compensation in 160 Gb/s DPSK transmission over installed fiber,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC '04)*, PDP31 (Los Angeles, USA, 2004).
  - 11) A. Hirano, S. Kuwahara, M. Yoneyama, Y. Kisaka, A. Hirano, S. Kuwahara, M. Yoneyama, Y. Kisaka, O. Leminger, F. Rumpf, R. Herber, A. Mattheus and A. Gladisch: “Field trial of 43 Gbit/s CS-RZ OTN system in PMD-limited transmission links,” *Electron. Lett.*, **15** (2004) 957-958.
  - 12) H. Yokoyama, Y. Hashimoto, H. Kurita and I. Ogura: “Two-stage all-optical subharmonic clock recovery using modelocked semiconductor lasers,” *Electron. Lett.*, **18** (2000) 1577-1578.
  - 13) S. Arahira, S. Sasaki, K. Tachibana and Y. Ogawa: “All-optical 160-Gb/s clock extraction with a mode-locked laser diode module,” *Photonics Technol. Lett.*, **6**, (2004) 1558-1560.
  - 14) H. Ishikawa: “Ultrafast all optical switches for 160 Gb/s-1 Tb/s OTDM systems,” *European Conference on Optical Communications (ECOC '03)*, We.1.5.1 (Rimini, Italy, 2003) pp. 382-385.
  - 15) S. Nakamura, Y. Ueno and K. Tajima: “Error-free all-optical demultiplexing at 336 Gb/s with a hybrid-integrated symmetric-Mach-Zehnder switch,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC '02)*, FD3 (Anaheim, USA, 2002).
  - 16) M. Nakazawa, T. Yamamoto and K. R. Tamura: “1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator,” *Electron. Lett.*, **24** (2000) 2027-2029.
  - 17) T. Miyazaki, M. Daikoku, I. Morita, T. Otani, Y. Nagao, M. Suzuki and F. Kubota: “Stable 160-Gb/s DPSK transmission using a simple PMD compensator on the field photonic network test bed of JGN II,” *OptoElectronics and Communications Conference (OECC '04)*, PD1-3 (Yokohama, Japan, 2004).

(2004年8月10日受理)