

3-3 EA 変調器ベース 160 Gb/s 超高速光時分割多重／分離技術の開発

3-3 EA Modulator Based OTDM Technique for 160Gb/s Optical Signal Transmission

村井 仁

MURAI Hitoshi

要旨

160 Gb/s 超高速光伝送技術は、次世代大容量フォトニックネットワークを構築する上で重要な基盤技術になると期待される。我々は、NICT による委託研究「トータル光通信技術の研究開発」プロジェクトにおいて、実用性・操作性に優れた EA 変調器ベース 160 Gb/s 光時分割多重／分離技術の開発に取り組んできた。本稿では、試作した 160 Gb/s-OTDM 送受信装置の概要を紹介するとともに、JGNII 光テストベッドを用いた 160 Gb/s フィールド実証実験の結果を通じて、本装置の有効性と 160 Gb/s 伝送システムの実用化に向けた課題を検証する。

Ultra high-speed signal transmission at a bit rate of 160Gb/s is one of key technologies to construct next generation ultra high-capacity optical network. In the "Research and Development on Ultrahigh-speed Backbone Photonic Network Technologies" project, promoted by NICT, we have developed 160Gb/s optical multiplexing/demultiplexing techniques with a capability for practical use. In this report, we describe the overview of the 160Gb/s OTDM technologies based on EA modulators, and we also discuss the applicability of the OTDM techniques to real system, reviewing 160Gb/s field transmission experiment on JGNII optical testbed.

[キーワード]

OTDM, 超高速光伝送, EA 変調器, JGNII 光テストベッド, フィールド伝送実験
OTDM, Ultra high-speed optical transmission, EA modulator, JGNII optical testbed, Field transmission experiment

1 まえがき

ADSL や FTTH の普及によるブロードバンド化を受け、基幹光伝送網では通信容量の急速な増大が予想される。これに対して、一本のファイバにより多くの波長チャンネルを高密度に収容することで通信容量を拡大する、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing; 高密度波長分割多重) 伝送方式の研究が広く行われている。現在、40 Gb/s ベース DWDM 光伝送技術は実用フェーズにあり、現在商用化されている 10 Gb/s 光伝送システムに代わる次世代大容量光伝送システムとして注目を集めている。一方、少ない波長多重数で大容量 DWDM 伝送が実現でき、波長管理

も容易であるという観点から、160 Gb/s 光伝送システムの研究・開発も日本や欧州を中心に広がっている。特に、近年、従来の IM/DD (Intensity-modulation/Direct-detection、強度変調) 方式に比べ、受信感度に優れた DPSK (Differential-Phase-Shift-Keying、差動位相変調) 変調方式などが導入されるようになり、超高速光信号の伝送性能は飛躍的に向上している。これに伴い、室内での伝送実験はもとより敷設光ファイバケーブルを用いた 160 Gb/s フィールド伝送実験も数多く実施されるようになった[1]~[4]。変調方式によらず、伝送速度 160 Gb/s の超高速信号を送受信する手法としては、光時分割多重 (OTDM) 方式が広く採用されている。OTDM 方

式は、同一波長を有する複数の光データ系列を時間領域で多重・分離する技術であり、原理的に電子デバイスの処理速度（～100 Gb/s）に制限されることなく、多重数に応じた単一波長・超高速信号を生成することが可能となる。OTDM 信号発生では、多重する光データが互いに干渉しないようにするための超短光パルス発生技術、また、個別にデータ変調された光信号をビットインターリーブする時分割多重技術が重要な要素技術となる。また、受信に際しては、OTDM 信号に同期したシステムクロックを再生するクロック抽出技術、多重したチャンネルをクロストークなく取り出す光分離技術が必要となる。我々は、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究「トータル光通信技術の研究開発」プロジェクトにおいて、高性能、かつ実用的な OTDM 送受信装置の実現を目的に、操作性・安定性に優れた EA（電界吸収型）変調器を用いた 40 GHz 超短光パルス発生、4×40 Gb/s 光多重/分離技術の開発に取り組んでおり、高品質・高安定な 160 Gb/s-OTDM 送受信装置の試作に成功している [5]。

本稿では、EA 変調器をベースにした 160 Gb/s-光時分割多重・分離技術の概要を紹介する。また、試作した 160 Gb/s-OTDM 送受信装置の実用性を実証するために、JGN II 光テストベッドを用いたフィールド伝送実験を行っており、その結果を通して、本装置の有効性と 160 Gb/s 伝送システムの実用化に向けた課題を検証する。

2 160 Gb/s 光時分割多重技術 [5]

図 1 に、160 Gb/s-OTDM 送受信器の構成を示す。OTDM 送信器は、超短パルス光源と、それにデータ信号を重畳して OTDM 信号に変換する時分割多重器により構成される。超短パルス光源には、均一な光パルスを、一定の繰り返し周波数で安定に発生することが要求される（低ジッタ性）。また、符号間干渉が起きないように時間分割多重を行うには、超短パルス発生（<3 ps）と高いパルス消光比（>35 dB）が要求される。これらの条件を満たす代表的なパルス光源として、モード同期半導体レーザーが知られているが [6] [7]、繰り返し周波数はレーザー共振器の長さで決まるので、システムクロック周波数に応じた設計が必要となる。これに対して、我々は、オペレーションの柔軟性という観点から、EA（電界吸収型）変調器を用いた外部変調型短パルス光源を検討してきた。外部変調型短パルス発生方式は、原理的に任意のクロック周波数に対応することができ、低ジッタの変調信号を用いることにより、極めて安定な光短パルス発生が可能となる。ここでは、160 Gb/s-OTDM 信号に適用可能な光短パルスを発生するために、2 台の EA 変調器をカスケード接続した構成となっている。2 台の EA 変調器は、タイミングを調節した 40 GHz クロック信号で駆動され、入力 CW 光を半値全幅約 3 ps のガウス形パルスに変換する。生成した 40 GHz 光短パルス

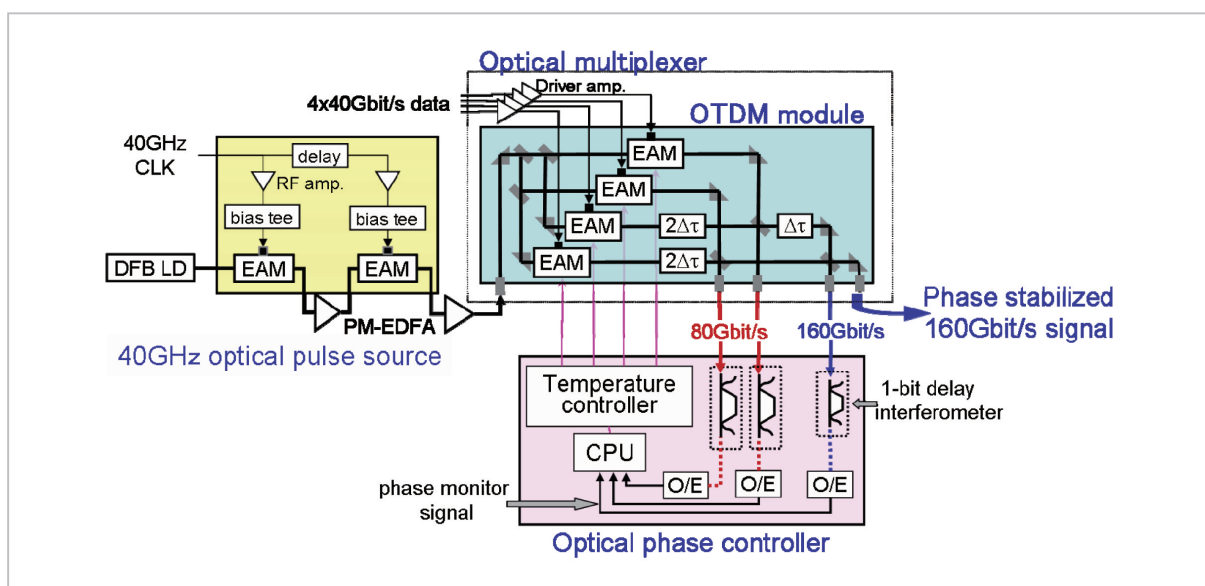


図1 160 Gb/s OTDM 送信装置の構成

列は光時分割多重回路に送られ、160 Gb/s-OTDM 信号に変換される。OTDM 回路では、多重チャンネルごとに個別のデータ変調を行うために、複数の光変調器が必要となる。40 Gb/s を基本レートとする 160 Gb/s-OTDM 回路では、4 台の光変調器が必要であり、これらを効率よくコンパクトに実装することが重要である。我々は、光変調器の実装が比較的容易であると考えられる空間結合光学系を用いた OTDM 回路を開発した。図 2 は、その概観写真である。光変調器には、小型で高速変調が可能な EA 変調器を採用した。EA 変調器は個別の気密パッケージに封止し、変調動作の安定性と信頼性を確保した。4 台の EA 変調器は、ハーフミラーとプリズムを用いて形成した 4 系統の空間経路上に配置されており、それぞれ 40 GHz 光短パルス列を 40 Gb/s 光信号に変換する。4 系列の 40 Gb/s 光信号は 80 Gb/s から 160 Gb/s 信号へ順次ビットインターリーブされ、80 Gb/s 信号と 160 Gb/s 信号がそれぞれ 2 系列出力される。OTDM モジュールの遅延時間精度、挿入損失は、それぞれ $6.28 \text{ ps} \pm 0.01 \text{ ps}$ 、18 dB である。本 OTDM モジュールのユニークな特徴として、ビット間光位相(搬送波位相)差の可変性が挙げられる。ビット間の光位相差は、ファイバ伝送の劣化要因の一つである非線形効果の程度に影響を与える重要なパラメータである。一般に、4 系統以上の光信号を多重する OTDM 方式では、異なる経路を通る多重信号間の光位相を安定化することが難しいという側面があった。本モジュールでは、空間結合光学系を採用することで、ビット間の光位相差変動を $5^\circ/\text{C}$ (環境温度) に抑えた。また、熱光学効果を有する EA 変調器の駆動温度を変えることにより、ビット間の光位相差を任意に設定することを可能にした。これにより、160 Gb/s 信号においても、非線形光学効果の軽減に有効な CS-RZ (搬送抑圧 RZ) [8] などの優れた変調方式を適用することが可能となった。図 3 は、本送信器を用いて生成した 160 Gb/s CS-RZ 信号の光スペクトル(a)、光サンプリング波形(b)である。多重する 4 系列の 40 Gb/s 信号は、データ長 $2^{15}-1$ の擬似ランダム信号である。CS-RZ 信号は、ビット間の光位相差が 1 ビットごとに 180° 回転するので、その光スペクトルは中央の搬送波成分が抑圧された特徴的な形状となる。また、光サン

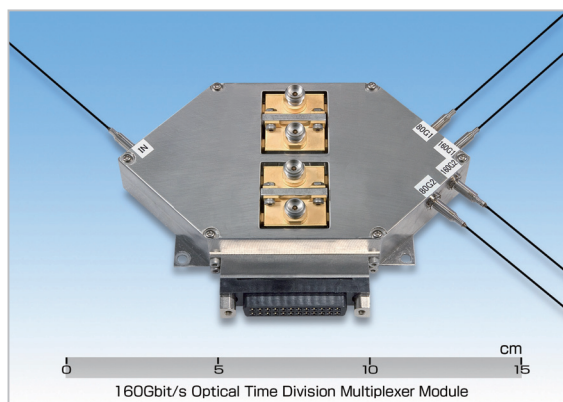


図2 160Gb/s-OTDM モジュール

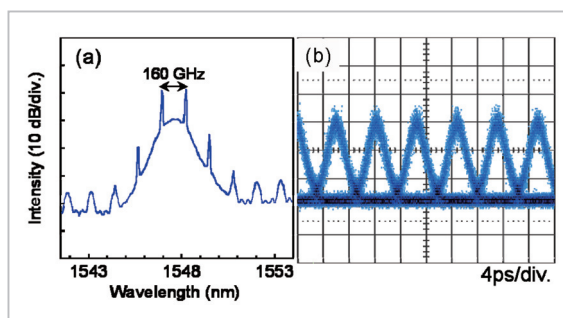


図3 160Gb/s CS-RZ 信号の光信号スペクトル(a)と光サンプリング波形(b)

プリング波形から、均一で良好なアイ開口を有する 160 Gb/s 信号が生成されていることが分かる。

本送信器は、環境温度が大きく変化する状況下でも安定に位相制御信号を生成するための、自律光位相制御機能を有している [9]。OTDM 信号のビット間光位相差の検出には、1 ビット遅延干渉計を用いる。これは、ビット間光位相差に応じて 1 ビット遅延干渉計の出力レベルが変化する性質を利用したもので、80 Gb/s 及び 160 Gb/s の OTDM モジュール出力信号のビット間位相差をそれぞれ数値化し、所望の位相差となるように OTDM モジュール内 EA 変調器の駆動温度を制御する。図 4 は、12 時間連続で測定した、160 Gb/s CS-RZ 信号の光信号スペクトルである。この間環境温度(実験室温度)は、 $22^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の間で変化した。自律位相制御を行っているため、スペクトル形状はほとんど変化していない。このときの光位相差変動幅は $180^\circ \pm 5^\circ$ であり、極めて安定な 160 Gb/s CS-RZ 信号が実現されている。

図 5 (a) に、1 : 4 時分割分離器の構成を示す。160 Gb/s 信号は、40 GHz 駆動の EA 変調器を用

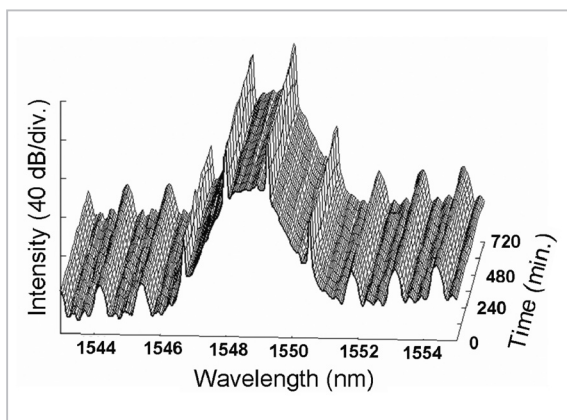


図4 CS-RZ 信号スペクトルの 12 時間連続測定結果

いた分離ゲートにより、40 Gb/s 光信号に時分割分離された後、40 Gb/s 受信器に送られ検波される。分離ゲートの時間幅は約 4 ps、40 Gb/s 分離信号における隣接チャンネルの抑圧比は 15 dB 以上である。入力 160 Gb/s 信号に同期した 40 GHz クロックは、図 5 (b) に示す光-電気ハイブリッド PLL 回路 (opt-electronic hybrid phase-locked loop circuit) を用いて再生する [10]。入力 160 Gb/s 信号はフロントエンドに実装した EA 変調器により、周波数 $(40 - \Delta f)$ GHz でサンプリングされ、出力信号に含まれる周波数 $4\Delta f (=1 \text{ GHz})$ のビート信号を参照信号として、局発信号 (LO、 $\Delta f = 250 \text{ MHz}$) との位相差を検出する。位相比較した結果は制御信号として 40 GHz-電圧制御発振器 (VCO) に送られ、参照信号と局発信号が同位相となるように VCO 出力周波数を制御することにより、入力 160 Gb/s 信号に同期した 40 GHz クロックを再生する。40 GHz 再生クロックの RMS 時間ジッタは約 60 fs、同期引き込み範囲及び同期保持範囲は、それぞれ 12 MHz 及び 1.2 MHz である。クロック再生、分離ゲートに用いられている EA 変調器は任意の偏光状態にある入力光信号に対応するように設計されており、受信装置としては、偏光無依存となっている。また、クロック再生器では、その動作原理上、分散や偏波モード分散 (PMD) により信号波形がゆがむと、クロック再生機能が劣化することが懸念されるが、室内実験や後で紹介するフィールド伝送実験において、分散 $-5 \text{ ps/nm} \sim 5 \text{ ps/nm}$ 、PMD による DGD $0 \text{ ps} \sim 3 \text{ ps}$ の範囲で、安定に動作することが実証されており、実用上全く問題のないものと

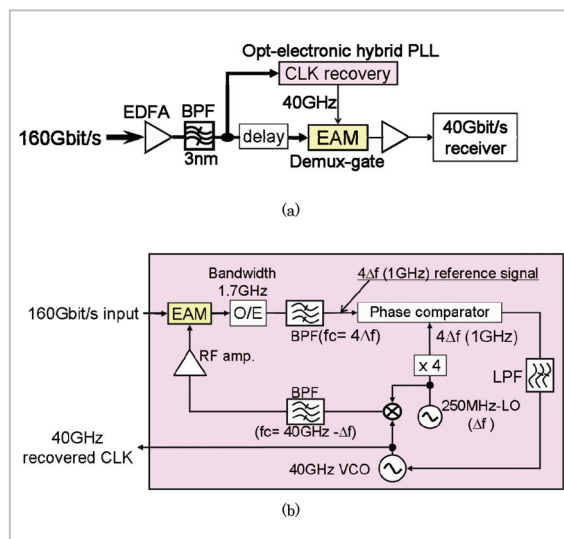


図5 (a) 1 : 4 光時分割分離器の構成、(b) 40 GHz クロック再生器の構成

考えられる。

本装置の送受信対向特性は、4 系列の 40 Gb/s 分離信号それぞれに関する符号誤り率 (BER) 測定結果から Q 値 (Q-factor) を見積もることで評価し、全分離チャンネルに対して 27 dB 以上の Q 値が得られることを確認した。これは、符号誤り率 10^{-100} 以下に相当するレベルであり、極めて良好な対向特性が実現されていると言える。また、実用化する上で不可欠な要素となる安定性に関しても、良好な結果が得られている。図 6 は、40 Gb/s 分離信号に関して、4 時間以上連続して Q 値を測定し、送受信特性の安定性を評価した結

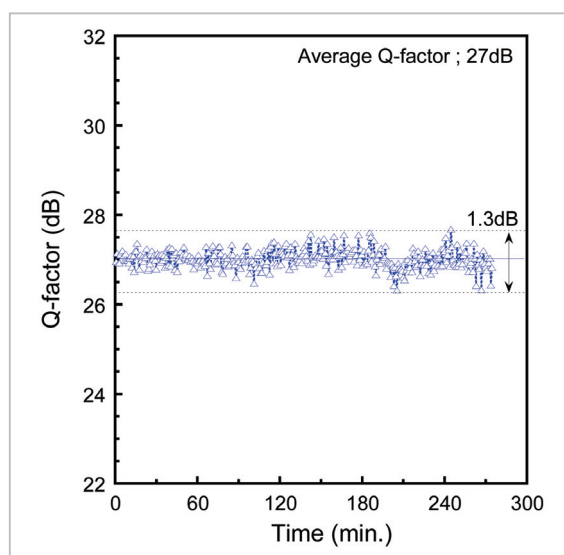


図6 160 Gb/s 送受信対向特性の安定性評価結果

果である。測定誤差等により 1.3 dB 程度の Q 値変動があるが、平均 27 dB の良好な Q 値が安定に得られていることが分かる。また、1540 nm～1560 nm の波長帯で同様の評価を行った結果、同等の対向特性が得られており、160 Gb/s を基本レートとする WDM 伝送にも柔軟に対応できる設計となっている。

3 JGN II 光テストベッドにおける 160 Gb/s フィールド伝送実験

160 Gb/s 伝送では、その広い信号帯域 (3 dB 帯域 1 nm 以上) により、光ファイバ伝送路のわずかな残留分散にも敏感に反応して伝送特性が劣化する。また、非線形効果による波形劣化が顕著になるため、光ファイバへの入力レベルが制限され、長距離にわたり十分な SNR を維持することがより困難になる。これまでに、CS-RZ 変調方式を 160 Gb/s 信号に適用することにより、残留分散及び光ファイバの非線形光学効果に起因する伝送特性劣化を低減できることを実験的に確認しており、実験室内における周回伝送実験では、FEC (forward-error-correction; 誤り訂正) を用いることなく 640 km (8×80 km) にわたるエラーフリー (BER<10⁻⁹) 伝送を実現できることを実証した[5]。一方、160 Gb/s に及ぶ超高速伝送では、光ファイバ伝送路の偏波モード分散 (Polarization mode dispersion、PMD) による伝送特性劣化が深刻であり、敷設光ファイバケーブルを用いたフィールド伝送実験などにより、PMD 補償技術の導入が必須であることが指摘されている[1]～[4]。敷設光フ

ィバケーブルは、比較的安定した環境にある実験室内とは異なり、天候などの外的要因により PMD や分散が変化する[1]。実用化に当たっては、光ファイバ特性が時々刻々と変化する状況下にあっても、所望の伝送特性を維持できなければならない。我々は、2005 年度で終了する「トータル光通信技術の研究開発」プロジェクトの最終成果として、JGN II 光テストベッドを用いたフィールド伝送実験を実施し、開発した 160 Gb/s 伝送技術の実用性を検証した。図 7 に、光テストベッドのネットワーク構成及び伝送実験系を示す。光テストベッドは、けいはんな情報通信融合研究センター (京都府精華町) と堂島基地局 (大阪府堂島) 間に敷設された、標準シングルモードファイバ (SMF) による 10 芯光ファイバケーブルで構成されている。伝送路長は片道 63.5 km で、5 回折り返しにより最長 635 km の伝送が可能である。光増幅器 (EDFA) は、けいはんな及び堂島に 5 セットずつ設置し、63.5 km ごとに伝送損失を補償する 10 スパンのリンク構成とした。1 スパン当たりの伝送損失は、約 15 dB である。光増幅器は段間に分散補償ファイバ (DCF) を配した 2 ステージ構成となっており、出力信号レベルなどの設定はすべてけいはんな側で集中管理することが可能である。ここでは、SMF 及び DCF へ信号入力レベルを、それぞれ 4.5 dBm 及び 1 dBm に設定した。1 スパンごとの残留分散は約 +10 ps/nm で、分散スロープについては、ほぼ 100 % 補償されている。伝送路全系の分散は、送信器直後と受信器直前に設置した DCF により調整し、全系ではほぼ 0 ps/nm になっている。また、伝送前に DCF を

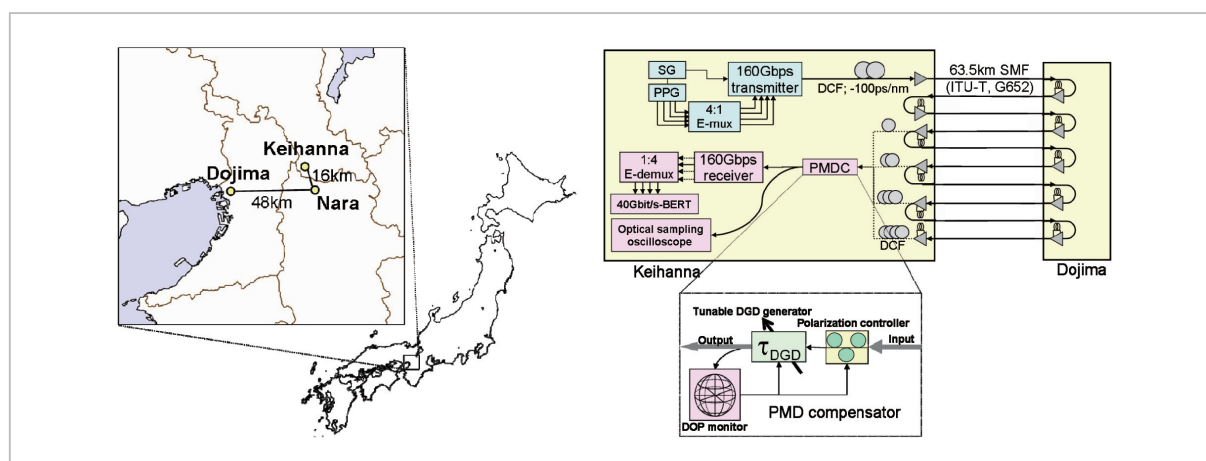


図7 JGN II 光テストベッドのネットワーク構成及び実験系

配置し、若干の前置分散補償を行うことは、非線形光学効果による信号品質劣化の軽減にも寄与している。受信器直前には、PMD 補償器を設置した。PMD 補償器は、偏波面制御器、可変 DGD 発生器及び偏光度モニタを組み合わせた一般的な 1 次 PMD 補償構成となっており、出力信号の偏光度が最も高くなるように入力信号の偏波面と DGD 発生量を調節して、PMD を補償する。なお、制御はすべて手動で行った。

図 8 に、254 km から 635 km まで 127 km ごとに行った Q 値測定の結果を示す。Q 値は、160 Gb/s から 40 Gb/s に分離した 4 系列すべてのチャンネルに関して評価し、東京-大阪間に相当する伝送距離 508 km において平均 16.2 dB (BER < 10^{-10})、また、635 km でも平均 15.7 dB (BER ~ 10^{-9}) となる良好な伝送特性が得られた。図 9 は、PMD 補償を行った後に光サンプリングオシロスコープで観測した 508 km 及び 635 km 伝送後の光サンプリング波形であり、いずれも良好なアイ開口が得られることが分かる。一方、同一の伝送距離であっても時間ごとに伝送特性が変化し、Q 値にばらつきが見られた。これは、主に、PMD の伝送特性に与える影響が、外部環境に応じて変化するためである。PMD に由来する DGD 発生量は、伝送距離 635 km の地点で、3 ps から最大 7ps まで変化することが確認されている。図 10 は、伝送距離 381 km 及び 508 km の地点において、Q 値を連続測定した結果で、矢印は、Q 値の劣化に対応して PMD 補償器を再調整した時刻を

示している。いずれの場合においても、良好な伝送特性を維持するためには、10~20 分程度で PMD 補償器を再調整する必要があったが、自律的な PMD 補償技術を導入することにより、実用に耐え得る長期安定性を確保できることが示唆された。PMD 補償の精度に関しては、DGD が 1 ps 以下であれば信号品質に及ぼす影響は軽微であることが、実験及びシミュレーションにより示唆されており、40 Gb/s 伝送技術において技術的に成熟した適応 PMD 補償技術によって充分対応できるものと考えられる。一方、本実験では、明確な影響は確認できなかったが、160 Gb/s 長距離伝送では高次 PMD の影響も深刻であることが指摘されており [3]、実用化を考える上では、その影響まで考慮した伝送システム設計が重要になると考えられる。

一方、今後、実用化を目指す上では、擬似ランダム信号による伝送特性評価に加え、実データ情報を 160 Gb/s 光信号に収容するための処理技術

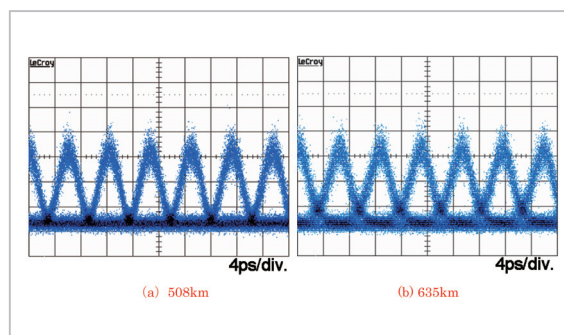


図9 160 Gb/s 伝送信号の光サンプリング波形

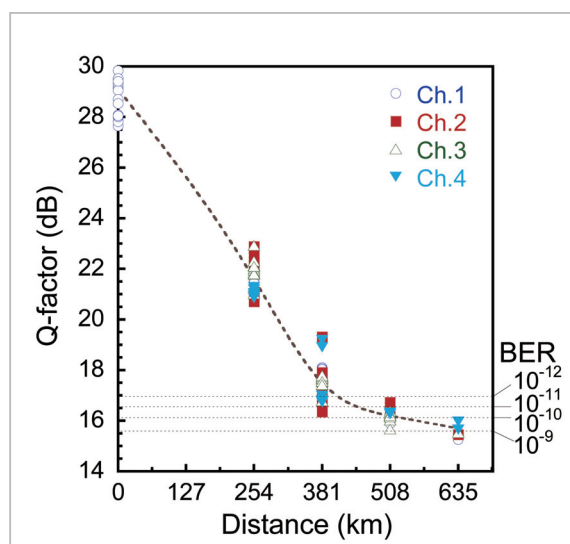


図8 各伝送距離における Q 値測定結果

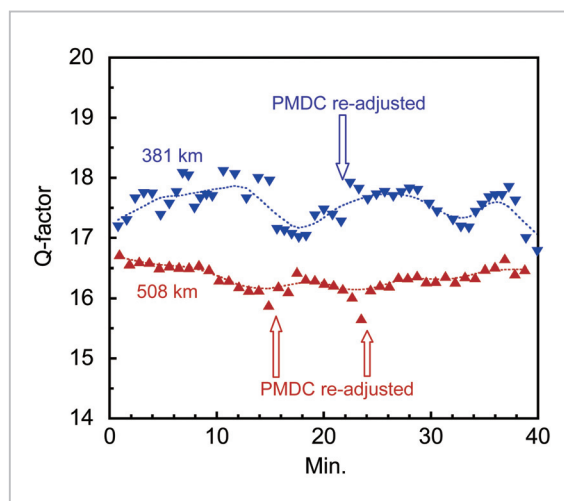


図10 伝送特性の安定性

も含めた総合的なシステム評価が重要になってくると考えられる。このような観点から、今回のフィールド伝送実験では、電気通信大学とのプロジェクト内連携により、ハイビジョン映像信号を収容した160 Gb/s光信号の伝送実験も実施しており、254 km伝送後において、送信映像と全くそん色ない品質で、安定に復調できることを確認している[11]。実データ情報を収容した160 Gb/s光信号のフィールド伝送実験は、世界初の試みであり、実用化に向けた一歩であると位置付けられる。

4 むすび

次世代大容量フォトニックネットワークを構築する上で、重要な基盤技術になると期待される160 Gb/s超高速光伝送技術に関して、実用性・操作性を重視したEA変調器ベース160 Gb/s光時分割多重／分離技術の開発に取り組んできた。その中で、電子デバイスの処理速度限界を超える超高速OTDM信号を生成するための中核技術とし

て、多重信号ごとに個別にデータ変調が可能な空間結合型OTDMモジュールを開発し、実用性を損なうことなく安定で高品質な160 Gb/s-OTDM信号を生成する技術を確立した。また、空間結合型OTDMモジュールの特徴である光搬送波位相の安定性を利用して、160 Gb/s信号にCS-RZなどの超高速伝送に適した優れた変調方式を導入することを可能にした。けいはんな情報通信融合研究センターと堂島基地局を結ぶJGNⅡ光テストベッドを用いたフィールド伝送実験では、635 kmにわたる良好な160 Gb/s超高速・長距離伝送を実証するとともに、世界で初めて、ハイビジョン映像データを収容した160 Gb/s信号の254 km伝送実験に成功した。

現状、伝送性能の長期安定化など若干の課題が残っているが、進展目覚ましい、変調方式、適応分散／PMD補償、3R信号再生中継などの光信号処理技術と相まって、近い将来、超高速伝送システムの実用化に向けた取組が実を結ぶことを期待したい。

参考文献

- 1 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 photonic network test bed of JGN2", OECC/COIN2004, 14C3-2, 2004.
- 2 M.Schmidt, M.Witte, F.Buchali, E.Lach, E.Le Rouzic, S.Salaun, S.Vorbeck, and R.Leppla, "8x170 Gbit/s DWDM field transmission experiment over 430 km SSMF using adaptive PMD compensation", ECOC2004, PD TH4.1.2, 2004.
- 3 G.Lehmann, W.Schairer, H.Rohde, E.Sikora, Y.R.Zhou, A.Lord, D.Payne, J.P.Turkiewicz, E.Tangdionga, G.D.Khoe, and H.de Waardt, "160 Gbit/s OTDM Transmission Field Trial over 550 km of Legacy SSMF", ECOC2004, We1.5.2, 2004.
- 4 S.Kieckbusch, S.Ferber, H.Rosenfeldt, R.Ludwig, C.Boerner, A.Ehrhardt, E.Brinkmeyer, and H.-G.Weber, "Automatic PMD Compensator in a 160-Gb/s OTDM Transmission Over Deployed Fiber Using RZ-DPSK Modulation Format", J. Lightwave Technol., Vol.23, No.1, pp.165-171, 2005.
- 5 H.Murai, M.Kagawa, H.Tsuji, and K.Fujii, "EA Modulator-Based Optical Multiplexing / Demultiplexing Techniques for 160 Gbit/s OTDM Signal Transmission", IEICE Trans. Electron. E88-C, pp.309-318, 2005.
- 6 S.Arahira and Y.Ogawa, "40GHz actively mode-locked distributed Bragg reflector laser diode module with an impedance-matching circuit for efficient RF signal injection", Jpn. J. Appl. Physics, Vol.43, No.4B, p.1960, 2004.

- 7 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", OFC'02, WV5, 2002.
- 8 Y.Miyamoto, A.Hirano, K.Yonenaga, A.Sano, H.Toba, K.Murata, and O.Mitomi, "320 Gbit/s (8×40 Gbit/s) WDM transmission over 367-km zero-dispersion-flattened line with 120-km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero pulse format", OAA1999, PDP4, 1999.
- 9 M.Kagawa, H.Murai, H.Tsuji, and K.Fujii, "Performance Comparison of Bitwise Phase-controlled 160 Gbit/s Signal Transmission Using an OTDM Multiplexer with phase-correlation monitor", ECOC2004, We4.P.109, 2004.
- 10 H.T.Yamada, H.Murai, A.R.Pratt, and Y.Ozeki, "Scalable 80 Gbit/s OTDM using a modular architecture based on EA modulators", ECOC2000, paper 1.3.5, 2000.
- 11 三木哲也, 來住直人, 松浦基晴, 梶川實, "光バーストによるトラフィック適応バスネットワークの実証実験", 電子情報通信学会, 2006年総合大会, B-10-30.

村井 仁

沖電気工業株式会社研究開発本部 NW
デバイスラボラトリ 博士(工学)
超高速光伝送、光信号処理技術