

## 3 光ネットワーク技術

### 3 Photonic Network Technology

#### 3-1 JGN II での超高速 160Gb/s 光伝送実証実験

##### 3-1 Ultrafast 160 Gb/s-based Transmission Experiment on JGNII

宮崎哲弥

MIYAZAKI Tetsuya

#### 要旨

伸び続けるインターネットトラフィックに対処する際、ネットワークノード設備の膨張や中継増幅器での消費電力抑制、さらに効率的なネットワーク運用管理を考慮することが重要である。そこで我々は 21 世紀のペタビットクラスのフォトニックネットワークを構築するための基盤技術として、超高速光パルス信号処理、効率的な変復調/多重分離方式、超高速光伝送の研究を行ってきた。本稿ではこれらの要素技術の最近の進展状況、さらに産官連携による JGN II 敷設光ファイバテストベッドを用いた実証実験について報告する。

We have been investigating basic technology to establish a Peta-bit/s class photonic network, such as ultrafast photonic processing, novel modulation/demodulation format and ultrafast transmission technology. We would like to report our recent research works including collaborative work with private company using JGN II optical test bed to curve the expansion of the foot print and electrical consumption power in network nodes and to release network management by lowering required the wavelength number against endlessly growing demand of internet traffic.

#### [キーワード]

超高速光通信, 高効率変復調方式, ペタビット級フォトニックネットワーク

Ultrafast optical communication, Highly efficient modulation/demodulation formats, Peta-bit/s-class photonic networks

#### 1 まえがき

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。21 世紀のフォトニックネットワークの構築に当たっては、従来の波長多重 (WDM) 伝送技術に加え、1 波長当たりの情報伝送容量を効率的に増大させる技術が重要となると考えられる。1 波長当たりのビットレートが現状の電子回路処理速度限界 (~100Gb/s)

を超える 160Gb/s の超高速光通信方式<sup>[1][2]</sup>は、現在商用化されている 10Gb/s あるいは導入目前の 40Gb/s 波長多重システムに比べ、少ない波長数により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。160Gb/s 光伝送システムに関しては近年の光デバイス技術の進展により室内伝送はもとより、敷設された光ファイバフィールド伝送実験が主にヨーロッパの国家プロジェクト傘下の研

究機関から相次いで報告されている [3][4]。

既設光ファイバは実験室で用いる 160Gb/s 伝送に適した理想的な特性の光ファイバとは異なり、屋外の温度変動、振動などの過酷な環境にさらされている。特にパルスの繰り返し時間間隔が狭い 160Gb/s 光パルス信号にとっては、偏波モード分散 (PMD : Polarization Mode Dispersion) が主要な伝送信号品質の劣化要因となる [1] - [4]。我々は 2004 年 7 月に株式会社 KDDI 研究所との産官連携により、JGN II 敷設光ファイバテストベッド [5] を用いて簡便な構成で PMD に対処できる自動補償方式によって安定した 160Gb/s のフィールド伝送に国内では初めて成功した [6]。また、多値化技術を適用して 1 波長あたりの情報容量を 160Gb/s とした場合の PMD による信号品質劣化の抑圧効果の評価を行い、良好な検証データを得た [7]。さらに、2005 年 3 月には単一波長での自動補償方式の成果を元に 160Gb/s の伝送速度で 8 波の波長多重により、総容量毎秒 1.28 テラビットの波長多重光信号の 200km の安定した都市間光伝送に世界で初めて成功した [8]。

## 2 光線路特性 [6]

図 1 に光テストベッドのネットワーク構成を示す。大手町及びつくばの JGN II リサーチセンタ局と中継局 (柏) に分散補償ファイバ (DCF) を含む

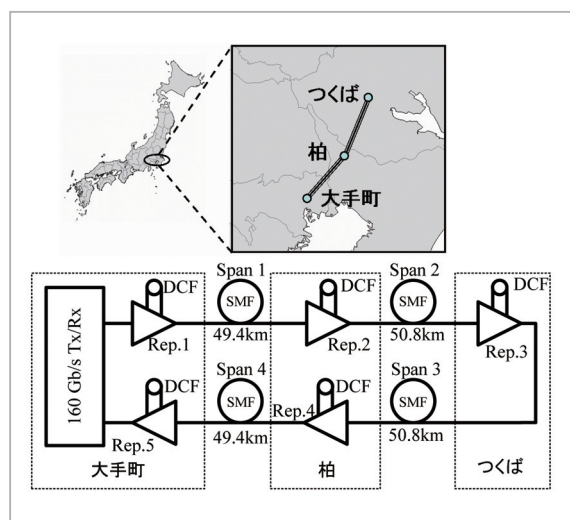


図1 JGN II 光テストベッドネットワーク  
Tx : 送信系、Rx : 受信系、DCF : 分散補償ファイバ、SMF : Single Mode Fiber、Rep : 光中継増幅器

光増幅中継器が設置され、各局間は約 50km 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 200km の伝送路構成とした。スパン 2 と 3 の一部に架空 (ぶらさがり) ファイバ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。各局には波長帯域 1535nm から 1565nm にわたって、利得偏差が  $\pm 0.5\text{dB}$  以下の光アンプが配置され、各光アンプの段間には分散補償ファイバ (DCF) が設置されている。柏局の光アンプには、ダイナミックゲインイコライザ (DGE : Dynamic gain equalizer) がそれぞれ設置されており、リンク利得平坦度を調整できるようになっている。また、これらシステム内の光アンプや DGE は、各局から相互に遠隔制御が可能となっている。200km の伝送路リンクでは、1535nm から 1565nm まで C バンドの帯域 30nm にわたって、累積分散は  $\pm 5\text{ps/nm}$  以下となっている。

図 2 に示すように PMD により偏波方向の光パルス伝播速度差すなわち DGD (Differential group delay) が生じると光パルスが分裂してしまい信号品質が劣化する。図 3 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書きしたものを示す。点線で示した信

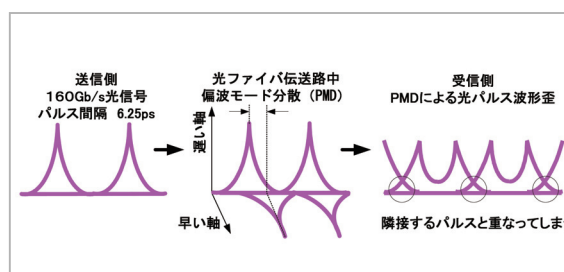


図2 偏波モード分散 (PMD)

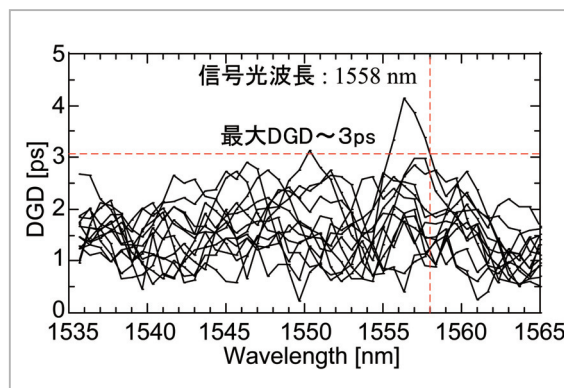


図3 DGD 波長依存特性経時変動

号光波長 (1558nm) において最大 3ps ほどの DGD が観測された。パルス間隔が 6.25ps の 160Gb/s 光信号にとっては極めて過酷な伝送環境であることが分かった。

### 3 フィールド伝送実験

#### 3.1 160Gb/s 単一波長DPSK伝送 [6]

安定した 160Gb/s 伝送を達成するために受信感度の高い DPSK 変調を採用し、受信側では簡易な PMD 補償器として偏波スタビライザを導入し PMD 変動抑圧効果を評価した。

図 4 に 160Gb/s DPSK 送受信系を示す。

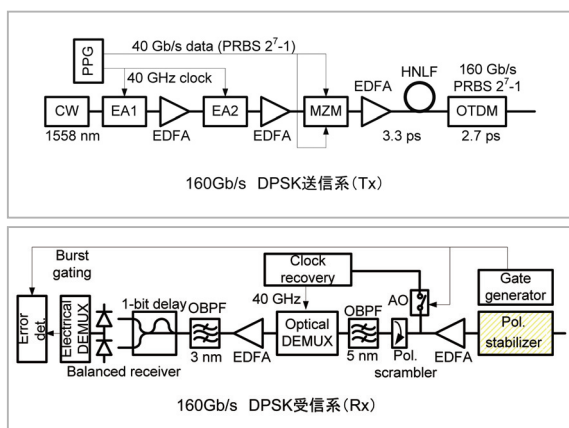


図4 160Gb/s DPSK 送受信系

送信側 (Tx) において 40GHz 繰り返し光パルスを 2 段接続の電界吸収型変調器 (EAM) を用いて生成し、40Gb/s にて差動位相変調 (DPSK) を施し高非線形光ファイバによりパルス圧縮 (2.7ps) した後偏波保持型時分割多重 (OTDM) 装置を用いて単一偏波 160Gb/s-DPSK 信号 (PN7 段) を送出了。受信側 (Rx) において自動追尾型偏波スタビライザと偏光子から構成される PMD 自動補償器を配備し、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 40GHz クロックにより駆動した。DEMUX 後の 40Gb/s DPSK 信号を受信した後 10Gb/s へ電気時分割して符号誤り率を測定した。

図 5 に 160Gb/s 受信パルスを 16 分割した 10Gb/s 信号の平均誤り率から求めた Q 値 (高い程誤り少ない) と信号波長付近の DGD の相関特性を示す。偏波スタビライザを用いて送信側で偏波を調整した場合 (○: 最悪値、●: 最良値)、

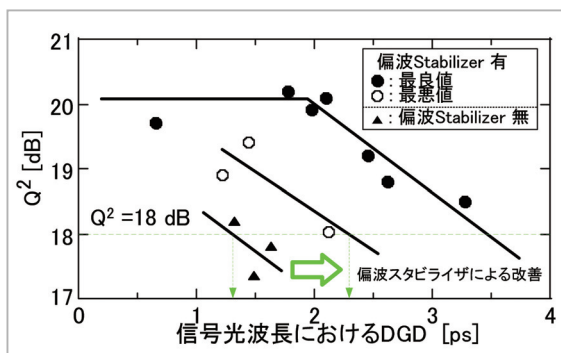


図5 信号品質 (Q 値) の DGD 依存性

2ps (タイムスロットの 32%) 以上の DGD があっても 200km 伝送後に安定した伝送特性 (18dB < Q) が得られ、用いない場合 (▲) よりも大きな PMD (DGD) に対しても信号品質が維持できることが分かった。

#### 3.2 160Gb/s APSK 伝送 [7]

図 6 に示すように消光比を劣化調整した強度変調 (ASK) と位相変調 (DPSK) を重畳変調して得られる APSK (ASK-DPSK) 変調方式により、QPSK と同様に 2bit/symbol の多値変調を施すことができる。ASK と DPSK の各成分のビットレートが 80Gb/s の場合は 160Gb/s の APSK 変調信号が得られ、この場合パルス間隔は通常の 160Gb/s 光パルスの 2 倍の 80Gb/s 相当の 12.5ps となるため、PMD 変動耐力増大が期待できる。そこで過酷な PMD 特性を有する JGN II 光テストベッド (大手町-つくば間) において、適応的 PMD 補償器を用いずに 160Gb/s APSK 変調方式を採用した場合の PMD 変動による受信感度劣化の抑圧効果を評価した。

送信側においては MLLD (波長 1558nm、2.2ps パルス幅) からの 10GHz 繰り返しパルスに消光比を約 6dB ほどに劣化させた 10Gb/s 強度変調

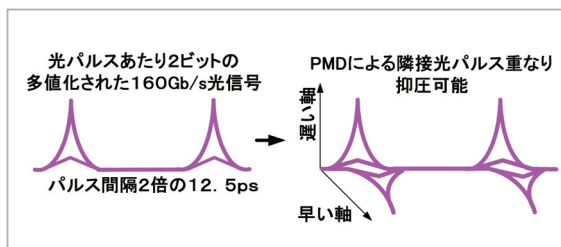


図6 多値変調による PMD によるパルス重なり回避



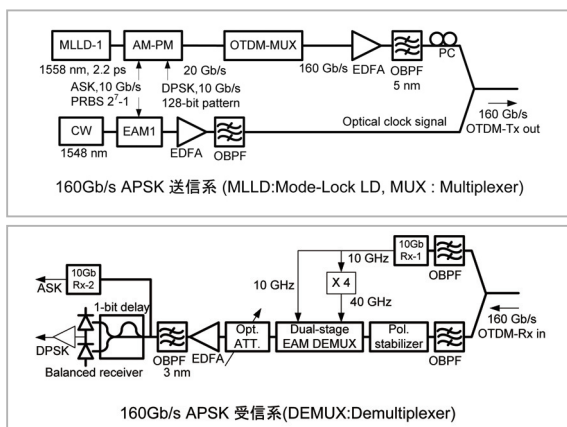


図7 160Gb/s APSK 送受信系

(ASK)を施した後、10Gb/s 差動位相変調(DPSK)を重畳して20Gb/sのAPSK光信号を生成し、OTDM-MUXにより8トリビュタリチャネルから構成される160Gb/s APSK光パルス信号を送出した。受信側は2段接続のEAMを用いて10Gb/sのASK成分、PSK成分の各々を受信して符号誤り率を評価した。図8に伝送前後の160Gb/s APSKのASK(○、●)、DPSK成分(□、■)の符号誤り率(BER)特性を160Gb/s RZ-ASKの場合(△、▲)と共に示す(伝送前/後で白/黒)。符号誤り率 $10^{-7}$ において伝送前後の受信感度ペナルティは通常のRZ-ASK 160Gb/s光信号は8dB以上であるのに対し、1パルス当たり2bit/symbolの多値化を施した160Gb/s APSK光

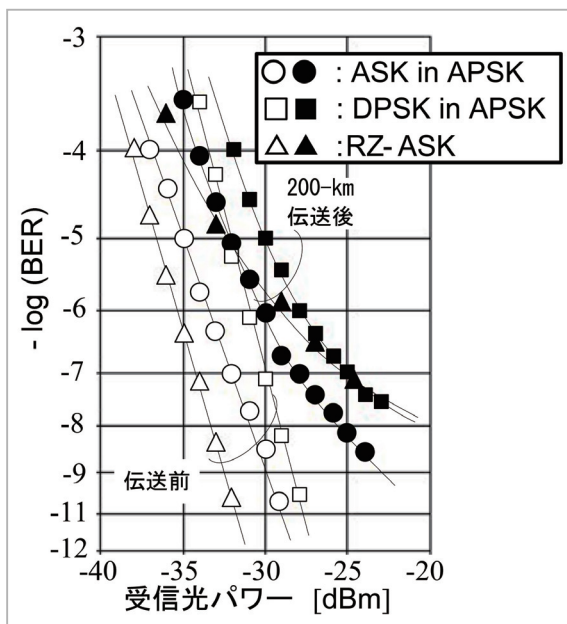


図8 160 Gb/s APSK 符号誤り率特性

信号は両成分とも4~5dB以下と送受対向時からのPMDによるペナルティが抑圧されることが確認できた。

### 3.3 160Gb/s×8波長多重-1.28テラビットDPSK伝送 [8]

図9に160Gb/s×8波長多重伝送時の送信系を示す。8波長、300Gz間隔のCW光源の出力をAWG(Arrayed-Waveguide-Grating)により波長多重した後、初段、次段を各々40GHz、20GHz正弦波でプッシュプル駆動した2段従属接続の両電極LiNbO<sub>3</sub>変調器を用いて40GHz、3.9psの光パルスを生成し、図4の送信系と同様にDPSK変調を波長一括して施し、160Gb/s×8波長多重のDPSK-RZ光信号を送出した。受信系において、2nm通過帯域幅の可変光フィルタにより受信評価を行う信号波長チャンネルを選択した後は図4と同一の構成のDPSK受信系を用いた。伝送路中の中継器出力において各スパンで各チャンネル出力を6.5dBmとした。図10にチャンネルごとの符号誤り率(BER)から計算して求めたQ値のDGD依存性を示す。ここで送信側出力において入力偏波状態を符号誤り率が最悪となるように手動調整して測定を行った。8波長多重時においても3.1の単一波長伝送時に用いたPMD自動補償器を導入することにより2ps付近の大きなDGDに対しても最悪チャンネルのQ値が14.4dB以上であり、標準的なインバンドの誤り訂正符号(FEC)を用いることにより $10^{-13}$ 以下の安定した伝送が可能となることが実証できた。

## 4 むすび

効率的なフォトニックネットワークを実現する基礎技術として、株式会社KDDI研究所との産官連携によりJGN II光テストベッドにおいて、1波

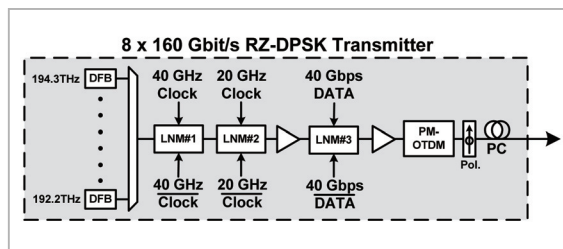


図9 160Gb/s×8波長多重伝送時の送信系

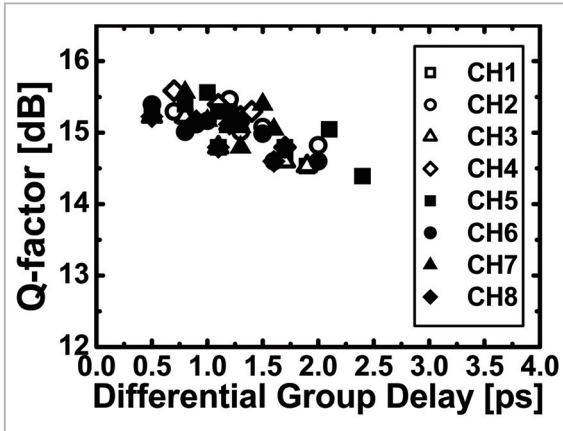


図10 各チャネルの200km伝送後のQ値のDGD依存性

長当たりのビットレートが160Gb/sの超高速単一波長光伝送、1パルス当たり2ビットの多値化160Gb/s光伝送、さらに160Gb/sの伝送速度で8波の波長多重により総容量毎秒1.28テラビットの波長多重光伝送などの実証実験をJGN II光ファイ

バテストベッドを用いて行い、200kmの安定した都市間光伝送に世界で初めて成功した。これらの成果はJGN II光テストベッドが運用開始当初から期待されていたテラビット級の光ネットワーク構築技術の研究開発に活用できることを示すものであり、今後も官民連携により最先端の研究開発に活用されることが期待される。

## 謝辞

フィールド実証実験にご協力、ご尽力いただいたKDDI研究所大黒将弘研究員、森田逸郎主任研究員、田中英明グループリーダー、鈴木正敏執行役員、また、ご協力いただいたNICT超高速フォトリックネットワークグループ 神尾享秀主任研究員、淡路祥成主任研究員(現 内閣府)、ご指導いただいた久保田文人研究主管、松島裕一部門長に深謝する。

## 参考文献

- 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, 1-2, Anaheim, USA, 2002.
- 2 H.Murai, M.Kagawa, H.Tsuji, and Kozo 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.
- 3 S.Kieckbusch, S.Ferber, H.Rosenfedt, R.Ludwig, C.Boerner, A.Ehrhardt, E.Brinkmeyer, and H.G.Weber, "Adaptive PMD compensation in 160Gb/s DPSK transmission over installed fiber", Optical Fiber Communication Conference (OFC '04), Post-Deadline paper, PDP31, Los Angeles, USA, 2004.
- 4 M.Schneiders, S.Vorbeck, R.Leppla, E.Lach, M.Schmidt, S.B.Papernyi, and K.Sanapai, "Field transmission of 8 x 170 Gbit/s over high loss SSMF link using third order distributed Raman amplification", Optical Fiber Communication Conference 2005, PDP39, 2005.
- 5 <http://www.jgn.nict.go.jp/e/index.html>
- 6 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), Post-Deadline paper, PD1-3, Yokohama, Japan, 2004.
- 7 T.Miyazaki, Y.Awaji, Y.kamio, and F.Kubota, "Field Demonstration of 160-Gb/s OTDM Signals Using Eight 20-Gb/s 2-bit/symbol Channels over 200Km", Optical Fiber Communication Conference (OFC 2005), OFF1, Anaheim, USA, 2005.

- 8 M.Daikoku, T.Miyazaki, I.Morita, H.Tanaka, F.Kubota, and M.Suzuki, "160 Gbit/s-based field transmission experiments with single-polarization RZ-DPSK signals and simple PMD compensator" European Conference on Optical Communications (ECOC '05), We2.2.1, Glasgow, UK, 2005.



みやざき 哲弥

情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループリーダー 博士(工学)  
超高速フォトニックネットワーク