

# 次世代100Gb/s 超光通信システム 実現に向けた適応波形等化技術の開発

神田 祥宏 村井 仁

次世代のメトロ/コア光通信網では、データ通信量の急増に備え、100Gb(Giga bit) /s 超級のインタフェース速度が必要となる。高速光伝送では、10Gb/s商用システムでは問題とならなかった、光ファイバの特性揺らぎに伴う信号歪みが健在化するため、揺らぎに応じて信号波形歪みを自動で取り除く適応等化技術が重要となる。本稿では、100Gb/s超級の光信号に適用可能な超高精度適応波形等化技術の研究成果について述べる。

## 次世代メトロ/コア光伝送の研究背景と 動向、課題

2010年中ごろに完了が予定されている40Gb / 100Gb イーサネットの標準化が契機となり、100Gb/s/ch (Gb/second/channel) 超の光伝送システムの実現へ向けた動きが加速している。さらに、100Gb/sシステムは、ITU-T (Study Group.15) やIEEE (802.3 Higher Speed Study Group) において標準化が議論されるなど、実用化に向けた展開がなされている。100Gを目標とする技術動向として、従来の光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing : OTDM) / 波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) による大容量高速伝送技術に加え、さまざまな新技術の導入が検討されている。その高い周波数利用効率と、伝送品質劣化要因への高耐性、既存システムとの親和性の観点から、多値変調方式も広く検討されている。多値変調方式は、無線通信技術を横展開した、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)、QAM (Quadrature Amplitude Modulation) などが研究されている。また、超高速ADC (Analog to Digital Converter) と高スループットのカスタム論理演算回路 (Application Specific IC : ASIC) を用いたデジタルコヒーレント受信方式の研究も活発である。2008年には、偏波多重QPSKの変調方式、デジタルコヒーレント受信方式を用いた40Gb/sリアルタイム伝送のデモンストレーションがなされている<sup>1)</sup>。

100Gb/sシステムは現行の10倍の伝送速度となるが、

これまでは致命的な問題とはならなかった、克服すべき伝送品質劣化要因が顕在化する。特に、敷設された光ファイバへ加わる温度変化・振動などの外乱により、ランダムに光信号歪みを発生させ、障害発生を誘発する偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion : PMD) がクローズアップされている。PMDの影響は、製造技術の未熟さから、特に1980年代に敷設されたファイバにおいて大きい。現行システムの拡張性の観点から、敷設済みファイバのPMDの影響を低減する技術が100Gb/sシステム導入に必須となる。

OKIでは、1つのアプローチとして、光学回路によりPMDの影響を抑圧する研究に取り組んでいる。本稿では、まず、PMDが光伝送システムへ与える影響に関して述べ、OKIの超高精度PMD補償技術による適応波形等化に関する取り組みについて紹介する。

## 偏波モード分散 (PMD) とその補償技術の概要

一般に、広帯域 (大容量) の光ファイバ通信には、光信号の伝わり方 (モード) が1つである単一モードファイバ (Single-Mode Fiber : SMF) が用いられる。理想的な光ファイバの断面形状は真円であるが、実際は製造時の不均一性、敷設状態や、運用中に加わる曲げ・ねじれ・側圧等の影響により僅かに楕円化している。図1を用いて、PMDの概念について述べる。楕円化した光ファイバは、ファイバ断面の縦方向と横方向で性質が異なる、すなわち複屈折性を有するため、SMF内には、実効的に直交した2つの光信号の通り道が存在するようになる。光信号は、この2つのモードへ分離されて伝搬し、各々異なる時間で受信側へ到達する。これらの現象は、偏波モード

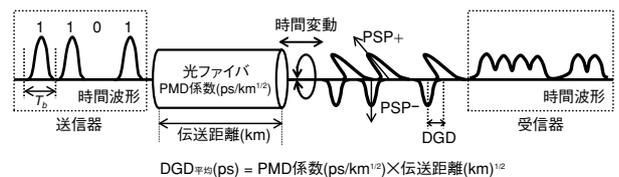


図1 偏波モード分散 (PMD) の概念

分散 (Polarization-Mode Dispersion : PMD) として知られている。この2つの光信号成分間の到達時間差は微分群遅延 (Differential-Group-Delay : DGD) と呼ばれる。偏波モードの方向を示す固有状態は、主偏光状態 (Principal-State of Polarization : PSP) と呼ばれる。また、DGDの量とPSPの方向は、システム運用中に時々刻々と変化する。異なる速度で伝搬した波形を強度信号として受信するため、光伝送波形は歪み、受信時に正しい情報の識別が困難となる。光ファイバのPMDの大きさはPMD係数 (単位 :  $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ) として表される。たとえばPMD係数が  $0.2\text{ps}/\text{km}^{1/2}$  のSMF (ITU-T推奨) では、100kmの伝送に伴い、平均で2psのDGDが発生すると推測できる。一般に、敷設年代の古いファイバほどPMD係数が大きく、現在は、 $0.02\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 以下といった低PMDファイバが開発されているものの、1980年代に敷設されたものの中には約  $5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ に及ぶPMD係数が観測されたとの報告もある。DGDが伝送信号のビット周期 (1ビットが伝わる時間、図1中の  $T_b$ 、たとえば40Gb/sのビット周期は25ps) の30%程度に到達すると伝送品質は急激に劣化する。このため、伝送速度が増すにつれPMDの影響が顕著となる。高速光回線の構築コストを鑑みると、敷設済み光ファイバを用いた現行システムの拡張性といった観点からPMDの影響を低減する技術が必須といえる。また、PMD係数により見積られるDGD値は平均値であり、実際はランダムに時々刻々と変動するため対処が難しい。DGD変化の分布は、一般に、複屈折が一樣に分布した伝送路において、図2に示すようにマクスウェル分布 (大きく裾を引く) を成すことが知られている。さらに、PSPの方向・DGDの大きさは、波長に対して異なる。それらの波長依存性を考慮しない場合は1次PMD、考慮する場合は高次PMDと呼ばれる。高速化に伴い、信号の占有波長帯域が広がると、高次PMDの影響が顕著になる。

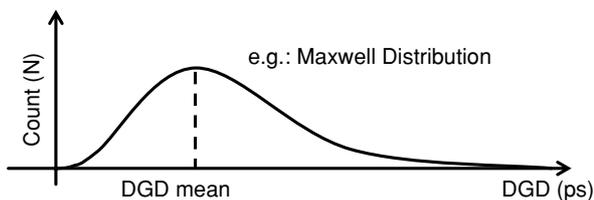


図2 時間変動するDGDの分布例

このように、安定なネットワークを構築する上で、PMDは最も大きな阻害要因の一つとなっている。大まかに考えると、光伝送システムのPMD耐性は、伝送距離・伝送路の状態 (PMD係数)・光信号のビット周期の大きさによ

り決定される。多値変調方式は、ビット周期を大きく保ったまま多くの情報を伝送可能であり、PMDを始め波長分散 (Chromatic Dispersion : CD) など伝送品質劣化要因への耐性を高めることが可能なため広く研究されている。また、動的に変動するPMDに対し、適応的に補償・波形等化技術を適用することが望ましく、

- ① 光回路による補償
- ② 高速アナログ電子回路を用いたトランスバーサルフィルタによる波形等化
- ③ デジタルコヒーレント受信方式と併用される、高速ADCと高速ASICによるデジタル信号処理による波形等化 (FIR (Finite Impulse response) フィルタ)

などの研究開発が盛んである。PMD低減化には代替技術が多く、それぞれ長短所がある。

光学式PMD補償技術は、

- 伝送速度や変調方式に依らず、光回線の中で光電変換を用いることなく利用でき、光伝送システムのマイグレーションが容易である。
- 低消費電力が期待できる。

といった利点から、OKIでは、光回路によるPMD補償の研究開発に取り組んでいる。

### 光学式1次PMD補償技術と160Gb/s実証実験

本節では、基本的な光学式1次PMD補償方法と、超高分解能可変DGD発生器、高速信号に適した補償器制御アルゴリズムを述べる。また、超高速信号への適用が可能なPMD補償技術と、敷設ファイバ回線を用いた160Gb/s実フィールド実証実験に関して述べる。

#### (1) 光学式1次PMD補償方法

図3に、基本的な光学式1次PMD補償器 (PMD Compensator : PMDC) の構成を示す。PMDCは、偏波面制御器 (Polarization Controller : PC)、DGD発生器と、補償状態を知るためのモニタから構成される。伝送路で発生したPMDと逆の特性をPMDCで発生させ、キャンセルする原理である。時間に対して変動するPSPの軸とDGD発生器の軸を一致させるため、DGD発生器の前段にPCを用いて偏光面を制御する。補償器から出力さ

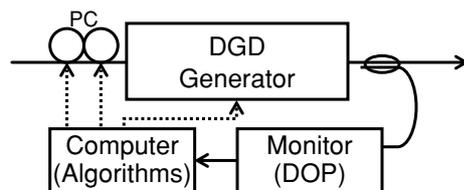
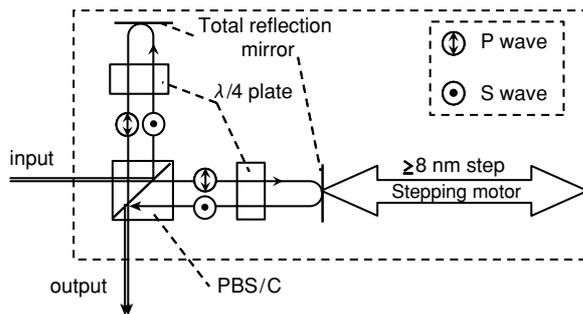


図3 光学式PMD補償器の構成

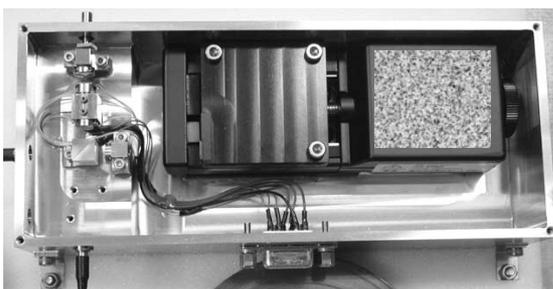
れる信号の偏光度 (Degree of Polarization : DOP) をモニタし、DOPが最大となるように、PC・DGD補償量を適応制御する。DOPは、信号スペクトル帯域内の偏光状態の均一性を意味するため、PMDが補償された状態において最も大きな値を示す。

## (2) 超高分解能DGD発生器

高速信号のPMD補償器には、高分解能の可変DGD発生器を用いることが望ましい。OKIでは、超高速信号への適用が可能な、超高分解能可変DGD発生器を開発した<sup>2)</sup>。図4 (a) に開発した可変DGD発生器の構成図と、(b) に概観写真を示す。モジュールに入射された光信号は、偏光ビームスプリッタ (Polarization Beam Splitter : PBS) により2つの成分に偏光分離され、それぞれ全反射ミラーで反射後、同PBSにより偏光合成される。各光路に入/4板を配置することで、偏光合成信号はモジュール出力ポートから得られる。一方の光路の全反射ミラーはステッピングモータに設置され、ステッピングモータの駆動により遅延量を変えられる。表1に本モジュールの性能を示す。本ステッピングモータの最小可変分解能は8nm



(a) 構成図



(b) 概観

図4 超高分解能可変DGD発生器

表1 超高分解能可変DGD発生器の基本的性能

Minimum time-resolution	Maximum delay	Insertion loss
0.053fs	45ps	<1dB

と高分解能であり、入力された光信号は、PBS-全反射ミラー間を往復するため、2つの光路間に発生させられる実効的な最小光路長差は16nmとなる。これは、0.05fsのDGD分解能に相当し、極めて高精度な補償が可能となる。最大発生DGD量は45psであり、その範囲内で任意に遅延量を選択できる。特長は、超高分解能に加え、マイケルソン干渉計構造を採ることで、小型化が可能な点と、空間結合系による高い安定性や、DGD発生器自身が波長依存性をもたないといった利点が挙げられる。本モジュールによるDGD発生例として、160Gb/s OOK CS-RZ (On-Off-Keying Carrier suppressed-Return to Zero) 信号を発生器へ入力し、3.125psのDGDを与えた信号の光サンプリング波形を図5に示す。入力信号のビット周期は6.250psである。図5 (a) はDGD発生器の速軸を通った信号、(b) は入力信号に3.125psの遅延を与えた遅軸を通った信号、(c) はDGD発生器出力信号である。このように、任意のDGDを発生することができ、極めて高精度にPMD補償を行うことができる。

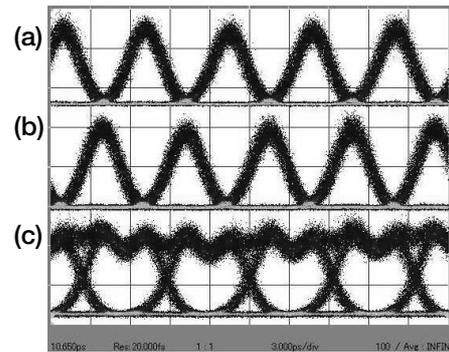


図5 DGD発生例 (横軸: 3ps/div、縦軸: 任意単位)、信号源: 160Gb/s OTDM CS-RZ信号 ( $T_b$ : 6.250 ps)  
(a): 速軸の信号、(b): 遅軸の信号 (3.125 psの遅延)、  
(c): 3.125 psのDGDが加えられた信号 ((a) + (b))

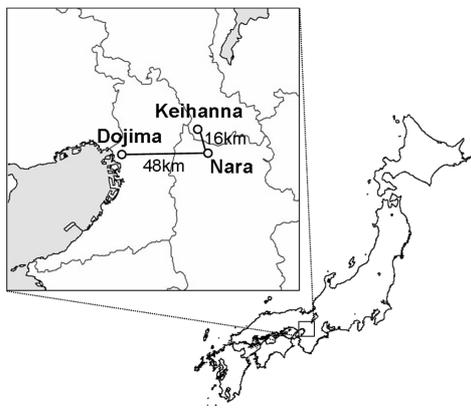
## (3) PMD補償器制御アルゴリズム

実用的なPMDCの実現には、適応制御アルゴリズムが重要である。PMDCは、補償程度をモニタする値が最適値に近づくように、実装したアルゴリズムに基づいて制御される。しかし、PMDCパラメータの最適化問題において、最適なPMDC制御状態以外でモニタ値が峰をなす局所解が存在し、最適な制御状態への収束を妨げる。制御状態が局所解へトラップされると、伝送路のPMDは補償されないばかりか、PMDCにより、被補償信号にさらにPMDを加えることになるため、光波形はより歪むことになる。このため、確実かつ安定に最適補償状態を探索するアルゴリズムが実用上不可欠となる。また、信号の

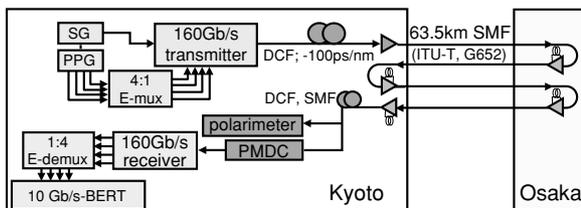
高速化に伴い、ビット周期が小さくなるほど、局所解が発生する頻度は格段に高くなる<sup>2)</sup>。そのような局所解への収束を避けるPMD補償器制御アルゴリズムとして、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : PSO) アルゴリズムが報告されている<sup>3)</sup>。PSOアルゴリズムは、群知能の一種であり、鳥や魚などの社会的な振る舞いを基に考え出された最適手法である。複数の少量の餌場が点在し、1点だけ餌が豊富な点がある領域に鳥の群れを放すと、個々が連絡を取りながら、やがて豊富な餌場を見つける動作を工学的に応用したものである。このPMDC用PSOアルゴリズムを高速信号用に変形することで、より効率的かつ確実な収束を実現した。また、一度最適点を探索した後は、モニタ値は単峰性を示すため、より効率的な処理を行うべく山登り法による適応動作を実装した。

(4) 実フィールドにおける160Gb/s伝送実証実験

次に、実フィールドの光テストベッドを用いた伝送実証実験について述べる。図6に、伝送実験のシステムを示す。伝送線路は、SMF・63.5kmと分散補償ファイバ (Dispersion Compensating Fiber : DCF) を含む光増幅中継器により構成されており、本実験では折り返し伝送路4スパンの254kmを用いた。送信信号には160Gb/s OTDM CS-RZ信号を用いた。160Gb/s信号は、PPG



(a) : JGN2光テストベッドのロケーション (京都・けいはんなー大阪・堂島)



(b) : PMD補償実証実験系

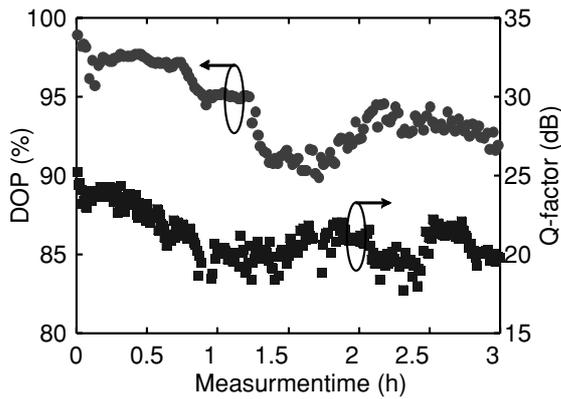
図6 実証実験のセットアップ

(Pulse Pattern Generator) から出力される10Gb/sの電気信号 (擬似ランダム信号、 $2^{15}-1$ ) を電氣的に40Gb/sへ時間多重し、さらに4系統の40Gb/s信号をEAM (Electro-Absorption Modulator) により個別変調し、OTDMすることで得られる<sup>4)</sup>。伝送後の信号品質は、PMDを補償した後、符号誤り率 (Bit-error-rate : BER) を測定し、Q値を算出することにより評価した。BERは160Gb/sから40Gb/sに光時分割分離し、さらに10Gbit/sへ電氣的に時分割分離した信号に対し測定した。BERは最も特性の悪い分岐チャネルについて測定した。

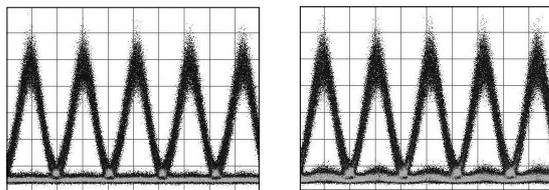
実験開始時は、PSOアルゴリズムと山登り法の併用により最適制御点を探索した。山登り法では、DOPが最大となるようにPC、DGD補償量が交互に制御される。一度最適制御点を探索した後は、PMDC出力波形歪みを抑圧する目的で、パラメータの更新幅が小さい山登り法により、適応的に最適点を維持した。実験期間において伝送路のDGDは0~6psの間で変動した。図7 (次ページ) (a) に、伝送に伴うDOP・Q値変動を示す。3時間の連続測定において、適応PMD補償によりQ値の平均は21.2dB、平均のDOPは90%以上と良好な値を示し、極めて安定な伝送特性が得られた<sup>5)</sup>。一方で、高次PMDによる波形劣化も観測された。高次PMDは、PMDの発生状態が波長に対して異なる現象として知られている。一般に、光信号は伝送レートに比例して占有する波長帯域が大きくなるため、伝送レートが上がるほど、高次PMDの影響を受け易くなる。図7 (b) に254km伝送時の光サンプリング波形を示す。ここでは、高次PMDの影響が軽微な場合、大きい場合を示した。また、それぞれの場合のBER測定結果を図7 (c) に示す。一般に、信号の周波数帯域が1/DGDより大きくなると、高次PMDの影響が無視できなくなる。このようにビット周期が小さくなるとスペクトル帯域が拡大するためその影響をより受け易く、伝送システムが不安定となり、障害発生が生じる可能性があるため、伝送距離、伝送路の状態、ビット速度に依っては抑圧が必要となる。

高次PMD抑圧技術

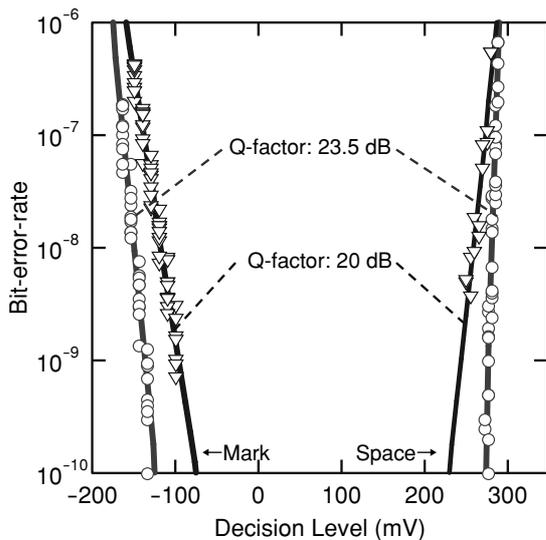
(4) 節で述べたように、高次PMDの影響が大きくなると、1次PMD補償器では十分な抑圧効果を得られない場合がある。本節では、高次PMD抑圧技術への取り組みについて述べる。高次PMD抑圧機能は、1次PMD補償器の後段に、PCと偏光ビームスプリッタ (Polarization Beam Splitter : PBS) を配置することで実現できる。1次PMDを補償した後に、高次PMDの影響で生じる不均一な偏光成分をPBSにより除去することで、PMDの影



(a) 伝送に伴うQ値、DOP変化



(b) 254km伝送後の光サンプリング波形  
(左：高次PMDの影響が軽微、右：顕著、3 ps/div.)



(c) BER測定結果 (○：高次PMDの影響が軽微、▽：高次PMDの影響が顕著) 高次PMDの影響により3dBほどQ値が悪化

図7 実フィールド伝送実証実験の結果

響を低減化する方法である。一般に、この方法の1次PMD補償部には固定のDGD発生器が用いられる。これは、補償に必要なps単位のDGD補償量を変化させることは、直交偏波モード間の位相差を大きく変化させることになり、DGD発生器から出力される偏光状態が瞬時に大きく変化するため、後段に偏光フィルタとして用いるPBSの配置が困難なためである。一方、(2)節で述べた超高分解能

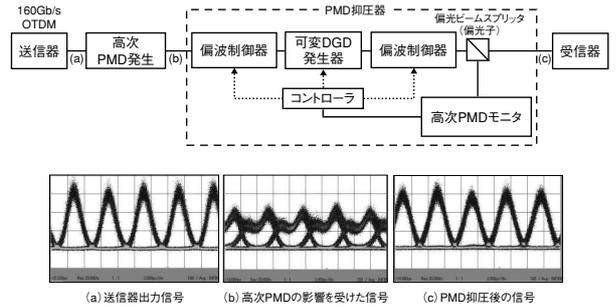


図8 高次PMD抑圧器の実験系と時間波形  
(横軸：3ps/div.、縦軸：任意単位)

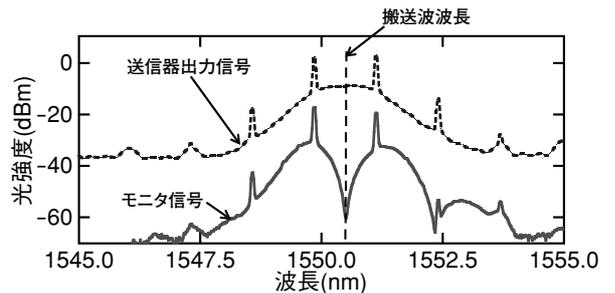


図9 キャリア波長強度モニタ

DGD発生器は、通信に用いられる光搬送波波長の約1/90でDGDを変化させることが可能なため、DGD補償に伴う偏光状態の変動量を制御可能である。このため、PBSによる高次成分抑圧機能に加え、1次PMD補償部での可変DGDによる高精度なDGD補償機能の適用が可能となる。高次PMD抑圧装置は、モニタ情報を基にフィードバック制御されるが、その抑圧効果はモニタ信号に大きく依存する。そこで、より高いPMD抑圧効果を得るために、搬送波波長強度をモニタ信号とする技術を適用した。PBSの透過出力からは、PMDが抑圧された主信号が得られ、反射出力から得られる信号は、抑圧器を制御するモニタ出力として利用した。高次PMD抑圧器は、モニタ出力信号の搬送波波長強度が最小となるように制御される<sup>6)</sup>。これらの技術により、光搬送波波長におけるDGDを打ち消し、効果的に高次PMDの影響を低減することが可能となる。本方法は、光学式モニタであり、超高速信号においても有効に動作する。図8に、高次PMD抑圧効果を検証するための実験系と、その抑圧実験結果を示す。図8下段は、(a) 送信器出力信号、(b) 高次を含むPMDの影響を受けた信号、(c) 抑圧後の信号の時間波形を示す。本実験では160Gb/sの送信信号を用いた。(c)は高次PMD抑圧器のモニタ信号出力の搬送波波長強度が、最小となるように制御された場合の主信号の波形である。モニタには、光スペクトルアナライザを用い、図9のように搬送



写真1 高次PMD抑圧器の試作器概観

波長強度を測定した。光信号品質を表す一つの指標であるQ値は、推定不可能な状態(図8 (b))から、送信時の品質(27dB)と同程度である、26dB(図8 (c))まで回復し、PMDの影響を低減できていると言える。最後に、高次PMD抑圧器試作機の概観を写真1に示す。

## まとめ

OKIの超高速信号にも適用可能な光学式PMDCに関して述べた。また、160Gb/sフィールド実証実験において、実用に耐えうる非常に安定な動作を確認した。また、高次のPMDに対する取り組みに関して紹介した。

PMDの影響の低減化は、既存の光ファイバを用いた100Gb/s超の光伝送において避けて通れない問題である。光学式PMD補償技術は、伝送速度や変調フォーマットに依存せず、高速電気回路を用いた電気等化方式と比較して低消費電力といったユニークな特長がある。今後、より堅牢な100Gb/s/ch超のシステム実現に向け、研究開発を進める。

## TiPO 【基本用語解説】

### ITU-T

国際電気通信連合 電気通信標準化部門

### IEEE

アメリカ合衆国に本部をもつ電気電子学会

### CS-RZ信号

隣り合うビット間位相差が $\pi$ 異なることを特徴とする変調方式

### 符号誤り率(Bit-error-rate)とQ値

許容できる誤り率として、通常、 $10^{-9}$ 程度(10億回に1回の誤り)が目安とされている。 $10^{-9}$ のBERはQ値に換算すると16dB程度。

## 謝辞

本報告で述べた研究成果の一部は、独立行政法人 情報通信研究機構 (National Institute of Information and communications technology : NICT) 殿からの委託研究である、「λユーティリティ技術の研究開発」によって行われた。関係者各位に感謝する。◆◆

## 参考文献

- 1) H. Sun, *et al.*: Real-time measurements of a 40Gb/s coherent system, OPTICS EXPRESS, vol.16, no.2, pp. 873–879, 2009
- 2) 神田, 他: 超高分解能DGD発生器およびPSOアルゴリズムを用いた高精度PMD補償技術の検討, Technical report of IEICE, OCS 107 (444), pp.63–68, 2007年
- 3) Y. Kanda, *et al.*: Highly stable 160-Gb/s field transmission employing adaptive PMD compensator with ultra high time-resolution variable DGD generator, ECOC2008, We.3. E.6, 2008
- 4) X. Zhang, *et al.*: Particle Swarm Optimization Used as a Control Algorithm for Adaptive PMD Compensation, IEEE, PTL, vol.17, no.1, Jan, 2005
- 5) H. Murai, *et al.*: EA-Modulator-Based Optical Time Division Multiplexing/Demultiplexing Techniques for 160Gb/s Optical Signal Transmission, IEEE JST, vol.13, pp.70–78, 2007
- 6) 神田, 他: キャリア波長強度モニタを用いた高次PMD抑圧器, 2009IEICE総合大会B-10-66, 2009年

## 筆者紹介

神田祥宏: Yoshihiro Kanda. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ 光トランスポート技術研究チーム  
 村井仁: Hitoshi Murai. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ 光トランスポート技術研究チーム チームマネージャ