

PMD補償器およびPMDエミュレータ

PMD Compensator and PMD Emulator

味村 裕*

Yu Mimura

池田和浩*

Kazuhiro Ikeda

畑野達也*

Tatsuya Hatano

高木武史*

Takeshi Takagi

輪湖杉生*

Sugio Wako

松浦 寛*

Hiroshi Matsuura

概要 ますます増大する光通信需要に対応する大容量化技術として、高密度波長分割多重 (D-WDM: Dense-Wavelength Division Multiplexing) 技術と並んで、各チャネルの伝送速度の高速化が進められている。次世代伝送速度である 40 Gbps 伝送においては、偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion: PMD) が主要な伝送特性劣化の要因の一つとして考えられており、1次成分のみならず、高次の成分も劣化の原因となり得る。高次PMDによる影響を把握し、高次PMD補償デバイスを最適化するためには安定した高次PMDエミュレータが有用である。今回、可変ファラデー回転子を用いて2次PMDの2成分を発生可能なエミュレータを検討し、理論計算値と良く一致する結果を得た。また、1次PMD補償器と2次PMD抑圧器のフィードバック用モニタを共通の1つのパワーモニタのみで行う、より簡単な2次PMD補償器の構成を検討し、2次PMD補償の効果を確認した。

1. はじめに

長距離光デジタル伝送における大容量化のニーズに応えるために、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) のよる一層の高密度化と並んで、各チャネルの伝送速度の高速化が進められている。次世代の伝送速度である 40Gbit/s においては、これまでの 10 Gbit/s 以下のシステムでは問題とならなかった伝送路ファイバ中に発生する偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion: PMD) の影響によって、伝送可能距離が大幅に制限される可能性がある¹⁾。また現在主流となりつつある 10 Gbit/s の伝送距離においても、敷設済みの比較的古いファイバを伝送路として用いる場合には、そのファイバの持つPMD量によっては、そのままではシステム構築上問題となることも懸念されている²⁾。

そこで近年PMDの影響を補償するPMD補償器 (PMD Compensator: PMDC) の検討が盛んになされている¹⁾³⁾⁴⁾。PMDはシングルモード光ファイバのコアの楕円化や、側圧・温度変化による内部応力などにより誘起される分布的な複屈折の影響により、本来縮退しているべき2つの直交偏光モードが分離して、群遅延時間差 (Differential Group Delay: DGD) が与えられる現象である。PMD補償には、補償部で伝送路のDGDを打ち消すように制御する方法や、偏波状態を主偏波状態 (Principal State of Polarization: PSP) と呼ばれる偏波固有状

態に制御する方法など²⁾があるが、DGDはPMDの1次の成分であり、これらPMD補償も1次の成分を対象とするものであった。

PMDには高次の成分も存在し、2次PMD (Second Order PMD: SOPMD) のパルス伝播やシステムペナルティに対する影響も無視できない²⁾⁵⁾。2次のPMD成分を含んだ伝送路による影響を正確に見積もり、PMD補償デバイスを最適化するために、2次まで所望のPMDを安定して発生できるPMDエミュレータが有用となる。これまで、偏光回転子と複数の偏光保持ファイバ (PMF) または複屈折結晶を用いて2次PMDをエミュレートすることが提案されてきた⁶⁾⁷⁾。しかし、2次のPMDは各DGDセクションのもつ周波数依存性により、2次PMDを安定して制御することは難しかった。

今回、可変ファラデー回転子 (Variable Faraday Rotator: VFR) を用いて2次PMDの2成分が発生可能なエミュレータを検討し、良好な特性を得たので報告する。

また、2次PMDを完全に補償するためには多段のDGDセクションをもつPMDエミュレータのような複雑な構成と制御が必要となり、コストや制御速度の面で問題となる。これに対し、高次PMD抑圧器 (Higher Order PMD Canceller: HOPC)⁸⁾は、完全な2次PMDの補正は不可能であるが、構成が簡素であるという特徴をもつ。HOPCは、2次PMDのデポラリゼーション成分の抑圧として機能する偏光子と、偏波状態を偏光子の透過軸に一致させるための偏波制御器のみで構成される。よって、HOPCと従来の1次PMDの組み合わせが、2次PMD抑圧機能を含む、より簡単なPMDCということになる。

本稿では、1次PMDとHOPCのフィードバック用モニタを

* 研究開発本部 ファイタルフォトリソグラフィ研究所

共通の1つのパワーモニタのみで行う、より簡単な構成を検討し、伝送速度10 Gbit/sの評価システムにおける2次PMD補償の結果を示す。

2. 2次偏波モード分散

1次と2次のPMDベクトルは次式で表される。

$$\tau = \tau \cdot q \tag{1}$$

$$\tau_\omega = \tau_\omega \cdot q + \tau \cdot q_\omega \tag{2}$$

下付は微分を表す。ここで ω は光搬送波の角周波数、 τ はDGD、 q は主偏光状態の単位ストークスベクトルである。2次PMDベクトルの絶対値がSOPMDであり、右辺の1つ目の項は1次PMDベクトルに平行であるPCD (Polarization-dependent Chromatic Dispersion) 成分、2つ目の項はPMDベクトルに垂直であるPSD (Polarization State Dispersion) 成分を表している。SOPMD、PCD、PSDの単位はそれぞれ ps^2 、 ps/nm 、 ps であるが本稿では簡単のためにすべて ps^2 に統一している。

偏光回転子と複数の偏光保持ファイバ (PMF) または複屈折結晶からなるDGDセクションをもつPMDエミュレータのPMDは、下記のように再起的に計算できる⁷⁾。 n 個のDGDセクションを接続した場合、1次、2次のPMDは、

$$\tau = \sum_{n=1}^m R(m, n+1) \tau_n \tag{3}$$

$$\tau_\omega = \sum_{n=1}^m R(m, n+1) (\tau_{n\omega} + \tau_n \times \alpha(n)) \tag{4}$$

で表される。 τ_n は n 番目のDGDセクションの1次PMDベクトル、 $\tau(n)$ は1~ n セクションの1次PMDベクトル、 R は n 番目のDGDセクションの回転接続によるマトリクス R_n を用いて

$$\begin{aligned} R(m, n) &= R_m R_{m-1} \dots R_n \quad (m > n) \\ R(m, m) &= R_m \\ R(m, m+1) &= \text{identity matrix} \end{aligned} \tag{5}$$

で表されるものである。

特に2セクションのDGDで発生されるPMDは、2つのセクションのDGDを τ_1 、 τ_2 、回転接続角度を θ として、下記のように表される。

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2 \cos 2\theta} \tag{6}$$

$$\tau_\omega = \tau_1\tau_2 \sin 2\theta \tag{7}$$

これらは周波数に依存しない。また、2次PMDベクトルは必ず1次ベクトルに直交するため、SOPMDの成分はPSDのみである。逆に、2セクションより多いDGDで発生されたPMDは周波数に関して周期的なDGDと2成分を含むSOPMDをもち、その周波数周期 (Free Spectrum Range: FSR) は各DGDセクションの長さにより決定される。

3. 2次PMDエミュレータ

3.1 構成

今回作製したPMDエミュレータは図1のとおりであり、偏光回転子として機能する3つの可変ファラデー回転子で接続さ

れた4つのDGDセクションから構成される⁹⁾。1次、2次PMDの各成分が発生可能である。単一のFSRを持つ特性を発生させるために、すべてのDGDセクションのDGD量は同じとし、DGD値は7.5 psとした。FSRは各セクションのDGD値の逆数で表されるので、133.3 GHzであるが、すべてのDGDセクションの位相が同じになるように調整した。なお、すべてのDGDセクションにおいて位相を同量シフトさせることにより、PMD値や周波数依存性の形を変えずに周波数シフトさせることが可能である。位相のシフトは、位相シフタやDGDセクションの温度調節で実現できる。また、作製したPMDエミュレータのDGDは4セクションであるが、1つ以上の回転子による回転接続角を0度に設定することによりセクション数を減らすことができる。例えば、2つの回転子の回転接続角を0度に設定することにより、周波数依存性のない2セクションがシミュレートできる。

DGD、PCD、PSD、SOPMDは性質上、独立して値を選択することはできないが、2つ以上の目標プロファイルに対して同時に非線形フィッティングを行うことにより、回転接続角度を求めることができる。作製したエミュレータでは回転接続角を可変ファラデー回転子で調節できるようにし、算出した接続角を ± 3 度以内の精度で実現できるようになっている。

作製した2次PMDエミュレータの可変範囲は、DGDが0~30 ps、SOPMDが0~260 ps^2 、挿入損失は1.7 dBである。

3.2 PMD測定評価系

PMD測定には、入射偏波状態を制御するための偏光子と可変ファラデー回転子、出射偏波状態を解析する偏光解析器を用い、偏光解析法を利用した。構成は図2のとおりである。ストークス空間で直交する2つの入射偏波状態に対する出力偏波からミューラーマトリクス法 (MMM)¹⁰⁾によりPMDベクトルを求め、1次、2次PMDの各成分を測定した。

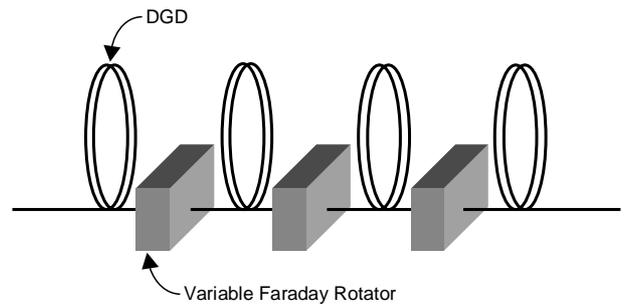


図1 PMDエミュレータの構成
Schematic for the first- and second-order PMD emulator with VFR

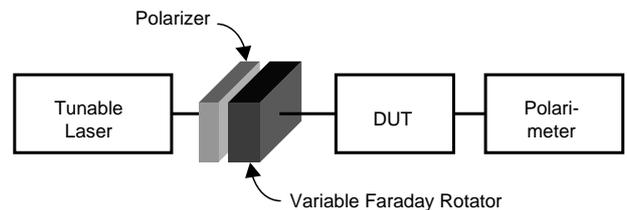


図2 PMD測定系の構成
Schematic for the first- and second-order PMD measurement system with VFR

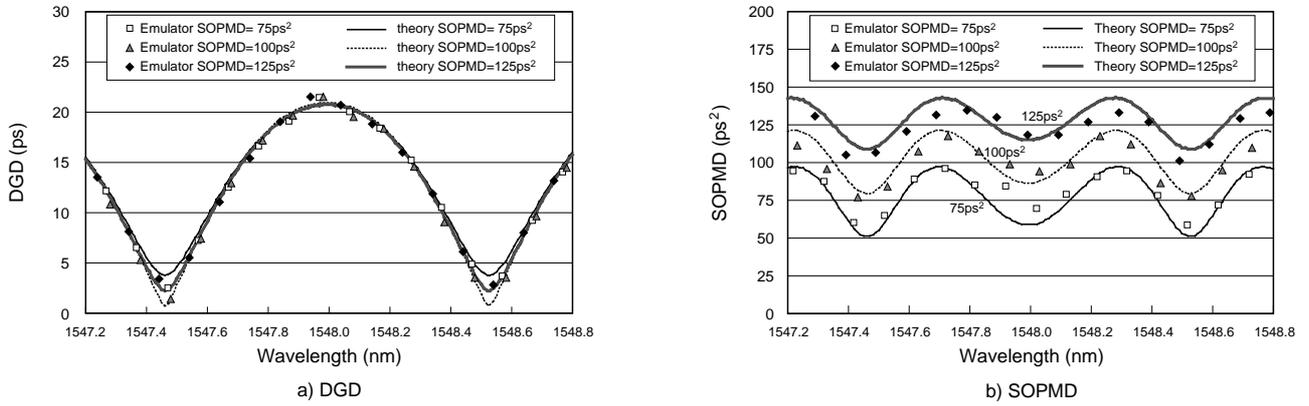


図3 SOPMDが75, 100 and 125 ps²のときの a)DGD, b)SOPMDの測定値と理論値
Measured and theoretical a) DGD and b) SOPMD curves for SOPMD values of 75, 100 and 125 ps²

PMDベクトルを求めるには測定波長が2点必要であり、2次PMDはその微分であるため、測定波長がもう1点必要である。よって、ある波長における2次PMDを正確に求めるためには、波長3点における偏波状態2状態について、偏波状態が時間的に変動しないうちに測定する必要がある。今回、反応速度の早い可変ファラデー回転子を入射偏波制御に用いることにより、測定時間が短くなり、測定誤差につながる偏波変動の影響を受け難くすることが可能となった。これにより、PMDベクトルを正確に測定し、2成分の2次PMD量を正確にすることができる。可変ファラデー回転子の $\frac{1}{2}$ 回転に要する時間は60 ms未満である。

3.3 評価結果

周波数依存性をもつDGDの周波数特性を固定して、2次PMD量の異なる状態をエミュレータで再現して評価した。

中心波長1548 nmにおけるDGDの値が20 ps, SOPMDの値が全周波数域において75, 100, 125 ps²となるように目標値を設定した。可変ファラデー回転子による偏波回転角設定値は下記のとおりである。

- SOPMD 75 ps² : 31.0, 67.5, 31.0 (deg.)
- SOPMD 100 ps² : 26.4, 65.2, 26.4 (deg.)
- SOPMD 125 ps² : 21.8, 63.5, 21.8 (deg.)

エミュレータのPMD特性と理論計算値を図3に示す。a)がDGD値, b)がSOPMD値である。エミュレータにより生成されたPMD特性は理論計算値と良く一致していることがわかる。なお、測定は5回行ったが、結果の再現性は良好であった。SOPMD値が100 ps²であるものについて、SOPMDをPCDの絶対値とPSDに分解したものを図4に示す。PCDとPSDを精度良く発生、測定できていることが分かる。中心波長においてPCDは0であるため、中心波長におけるSOPMDの成分はPSDのみである。中心波長から離れるに従ってPCDの割合が増し、ピークを迎えた後、半周期のところ再度PSD成分のみになる特性をもつ。なお、DGDセクションの位相を調整することにより、このPMD特性の形状を保ったまま特性を周波数シフトできることを確認している。伝送試験システムにおける信号光の周波数を固定し、PMDエミュレータの特性を周波数シフトさせれば、信号光の中心波長における2次PMD量をほぼ一定としたまま、その成分比を変化させることができ、2次

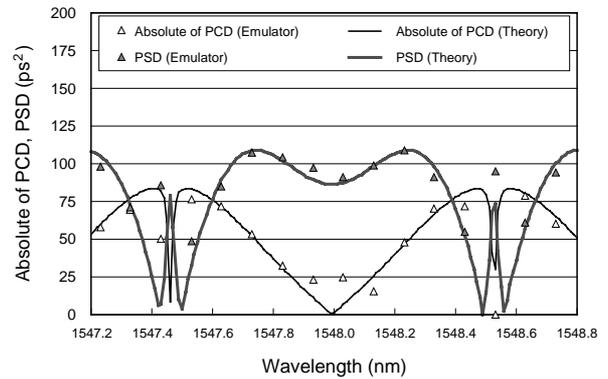


図4 SOPMD100 ps²から分離させたPCDの絶対値とPSD
Absolute value of PCD and PSD separated from an SOPMD value of 100 ps²

PMDの成分比の伝送システムに対する影響を観察することが可能である。

周波数依存性のない状態、つまり周波数に対して平坦なPMD特性は2つのDGDセクションでエミュレートできる。前述したように、2つの回転子の回転接続角を0度に設定することにより2セクションが実現できるが、例えば、入射側から1, 3つ目の偏光回転子を0度に設定することにより15 psと15 psのDGDをもつ2セクションが、また、入射側から1, 2つ目の偏光回転子を0度に設定することにより、22.5 psと7.5 psのDGDをもつ2セクションが実現できる。入射側から1つ目の偏光回転子を90度に設定すれば、入射側から1, 2つ目のDGDセクションが打ち消しあうため、残りのDGDセクションで7.5 psと7.5 psのDGDをもつ2セクションも実現できる。

2セクションをエミュレートした場合にも、4セクションの場合と同じように2次PMD量を75, 100, 125 ps²などに設定可能であるため、同じSOPMD値をもつ状態を2セクションと4セクションなど、複数の状態が実現できる。

PMDエミュレータを用いることにより、光通信システムにおける伝送試験において、2次PMD量を変化させ、あるいは2次PMDの等しい複数の状態を比較することにより、2次PMD成分を含んだ伝送路による影響について、多角的に調査することが可能となるであろう。

4. 2次PMD補償器

4.1 構成

従来の2次PMD補償器は図5 a)に示すように、完全に独立した1次PMD補償⁴⁾部と付加的な2次PMD抑圧部とで構成されていたのに対し、今回検討した構成は図5 b)のとおりである⁸⁾¹¹⁾。b)において、1つ目の偏波制御器と偏波保持ファイバ(Polarization Maintain Fiber: PMF)は1次PMD補償部を構成し、2つ目の偏波制御器と偏波ビームスプリッタ(Polarization Beam Splitter: PBS)がHOPC部を構成しており、従来との構成の違いは、モニタと制御の方式である。信号光の偏波状態に対して直交する偏波成分をPBSで分岐させ、1次PMD補償部とHOPC部に共通のモニタとして使用している。

a)に示される従来の方式では、1次PMDCの偏波制御器の制御用には偏光度(Degree of Polarization: DOP)がモニタされ、HOPCの偏波制御器の制御用には偏光子の出力パワーがそれぞれモニタされており、各々の偏波制御器はそれぞれDOPおよび出力パワーを最大化するように独立に制御されている。しかし、DOPは信号スペクトル内での偏波均一性を示しているため、HOPCの偏波制御器が常にパワーを最大化している限り、PMDCにおいてDOPを最大化することと偏光子透過後のパワーを最大化することは同じことである。つまり、HOPCの偏波制御器によりパワーが最大化されており、同時に1次PMDCの偏波制御器によりパワーが最大化されているなら、信号のDOPが最大化されていることになる。よって、DOPモニタと出力パワーモニタを、1つのパワーモニタに統合することが可能である。さらに、部品数を減らすために、PBSのもう一方のポート出力をモニタし、パワーを最小化するように2つの偏波制御器の制御を行うが、これはPBSの信号ポートからのパワーを最大化するのと同じことである。よって、b)の簡易な構成においても、a)と同様な2次PMD補償機能をもつことがわかる。

4.2 2次PMD抑圧

2次PMDによるアイベナルティ増加の要因は主にPSD成分であるという報告²⁾⁵⁾があるため、2次PMDのPSD成分のみを考慮して解析的にPMDの影響を考える。PSPがx軸方向の直線偏波状態であり、PSDのデポラライズ方向が直線偏波状態を保ったまま回転する方向である場合、2次PMDによる劣

化を受けた出力パルスは、理論的に、次式で表される²⁾。

$$E_{out}(\eta) = \frac{K}{2} \{ 2\phi_{\pm}(\eta - \tau) \hat{u}^* + \hat{u} \} + [\Delta\phi_{\pm}(\eta - \tau - \kappa) - \Delta\phi_{\pm}(\eta + \tau - \kappa)] \hat{u} + [\Delta\phi_{\pm}(\eta - \tau + \kappa) - \Delta\phi_{\pm}(\eta + \tau + \kappa)] \hat{u}^* \quad (8)$$

ここで、 η はビット時間で規格化した時間である。同じように、 τ は規格化したDGD、 κ は規格化したPSDであり、 K は定数である。ここで、入射SOPの方向はストークス空間上で S_1 方向、PSDのデポラライズ方向は S_1 - S_2 平面内であるとしている。 \hat{u} 、 \hat{u}^* はそれぞれ左、右楕円偏光を表している。 κ に依存しない ϕ_{\pm} の項はDGDによるパルスの分裂(ここではPSP伝送であるため ϕ_{+} のみ存在)、 κ に依存する $\Delta\phi_{\pm}$ の項はPSDによる付加的なパルスの分裂である。

1次PMDC部では、系全体のPSPが入射SOPに同一であるように偏波状態が制御される。また、HOPC部において、PSP方向に透過軸をあわせるように偏光子が制御されるため、x方向の偏光成分のみが透過する。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{u}^* = (\hat{u}^* + \hat{u})/2 \quad (9)$$

1次PMDCとHOPCが適切に制御されている場合の透過パルスは次のようになる。

$$E(\eta) = \frac{K}{2} \{ 2\phi_{\pm}(\eta - \tau) + \frac{1}{2} [\Delta\phi_{\pm}(\eta - \tau - \kappa) + \Delta\phi_{\pm}(\eta - \tau + \kappa) - \Delta\phi_{\pm}(\eta + \tau - \kappa) - \Delta\phi_{\pm}(\eta + \tau + \kappa)] \} (\hat{u}^* + \hat{u}) \quad (10)$$

κ に依存する $\Delta\phi_{\pm}$ の項が半分になっており、PSDによるパルス分裂成分が抑圧されることがわかる。1次PMDCとHOPCとの組み合わせによる2次PMD抑圧の効果が解析的に示された。

4.3 試験結果

伝送試験に使用した10 Gbit/s-NRZ(Non-Return Zero)試験システムを図6に示す。2つの偏波制御器には磁気光学型のファラデー素子¹²⁾を使用してフィードバック制御を構成した。被補償部のPMDは、30 psのDGDのみをもつ状態と、30 psのDGDと441 ps²のPSD成分のみから成るSOPMDをもつ状態の

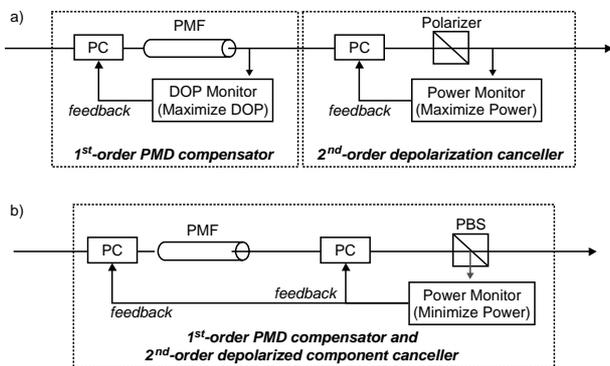


図5 2次PMDCのa)従来の構成とb)単純化した構成 Conventional and novel configurations

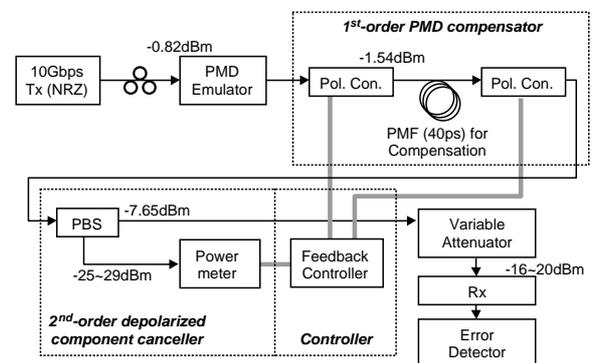


図6 試験の構成 Configuration of test system

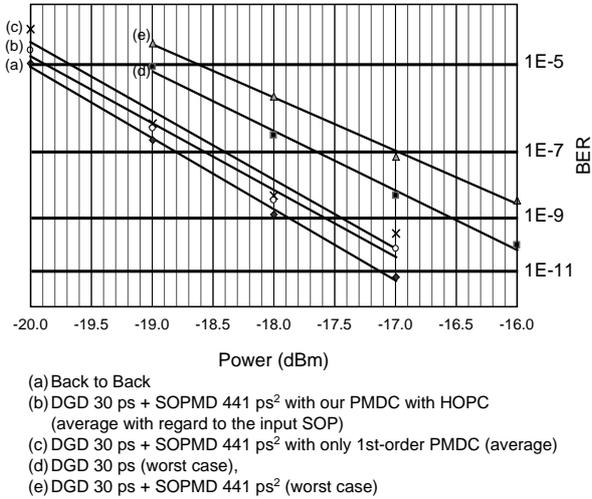


図7 試験結果
BER test results

2状態をPMDエミュレータで発生させた。ここで用いたPMDエミュレータは2セクションであるため、SOPMDはPSD成分のみを含み、DGD、SOPMDはどちらも周波数依存性をもたない。

1次PMDC部では、系全体のPSPが入射SOPに同一であるように偏波状態が制御されるために、伝送路と補償用DGDが偏波制御器で接続された伝送路全体のDGD量は、入射SOPに応じて変化する。2次PMDによるペナルティはDGD量にも影響されるため、2次PMDによるペナルティも入射SOPに応じて変化する事となる。よって、1次PMDCを含んだ系の場合には、入射SOPに対してビットエラーレート (BER) の平均をとることにより評価した。

BER試験の結果は図7のとおりである。(a)は伝送路が直結されている状態 (Back to back), (b)はDGD 30 ps + SOPMD 441 ps²の被補償部を1次PMDCとHOPCとで補償した場合、(c)はDGD 30 ps + SOPMD 441 ps²の被補償部を1次PMDCのみで補償した場合、(d)はDGD 30 psのみの被補償部をPMD補償しない場合、(e)はDGD 30 ps + SOPMD 441 ps²の被補償部をPMD補償しない場合である。PMD補償した(b),(c)の場合には入射SOPに対して平均のBERを、PMD補償しない(d),(e)の場合は入射SOPに対して最悪の場合のBER値をプロットしてある。

(b)が今回検討した構成、(c)が1次PMDCのみの場合であるが、HOPCを含む簡単な構成のPMDCにおいて、従来の構成の2次PMDCと同じ方法で2次PMDの影響を抑圧できていることがわかる。抑圧の効果は、1次PMDCのみの場合と比較して、パワーペナルティにおいて30%程度である。補償効果は完璧ではないが、今回検討した構成は非常に簡単であり、コストも少なくすむ。実際の伝送システムにおいてもこの構成が有効かどうかを今後確かめる必要があるだろう。

5. おわりに

可変ファラデー回転子を用いた2次PMDエミュレータを検討し、2次PMDの2成分を発生できることを確認した。PMDエミュレータで発生させたDGDと2次PMDの2成分の測定結果は、理論計算値と良く一致した。

また、1次PMDCにHOPCを組み合わせた簡単な構成の2次補償器を検討した。10 Gbit/s-NRZ試験システムにおいて、この構成での動作を確認し、2次PMDのPSD成分による影響を抑圧できることを確認した。

今後、伝送速度はさらに高速化することは確実であり、高次分散補償と同様、高次PMD補償は避けて通れない課題である。今回検討した2次PMDエミュレータは、補償すべき2次PMDに関するさらに深い理解に役立つであろうし、2次PMD補償技術とあわせて、2次PMD補償器の最適化に有用であろう。

参考文献

- 1) H. Ooi et al. : "Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission," OFC'99, WE5-1 (1999), 86.
- 2) F. Bruyere: Optical Fiber Technol., 2(1996), 269.
- 3) T. Takahashi et al. : "Automatic compensation technique for timewise fluctuation polarization mode dispersion in in-line amplifier systems," Electron. Lett., 30(1994), 348.
- 4) F. Roy et al. : "A simple dynamic polarization mode dispersion compensator," OFC'99, TuS4-1(1999), 275.
- 5) C. Francia et al. : Photon. Technol. Lett., 10(1998), 1739.
- 6) F. Bruyere: IEEE Photon. Technol. Lett., 10(1996), 696.
- 7) J. P. Gordon and H. Kogelnik: Proc. Nat. Acad. Sci., 97(2000), 4541.
- 8) J. Poirrier et al. : OFC2002, W14(2002), 236.
- 9) 味村 他: 2003年電子情報通信学会総合大会, B-10-119(2003).
- 10) R. M. Jopson, L. E. Nelson, and H. Kogelnik: IEEE Photon. Technol. Lett., 11(1999), 1153.
- 11) K. Ikeda: OFC2003, MF90(2003).
- 12) K. Ikeda: NFOEC2002, Technical Proceedings,(2002), 1965.