高速光ファイバ通信における偏波モード分散の補償

戸田 裕之, 松本 正行, ダニエレ アルゼッタ

大阪大学大学院 工学研究科通信工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Compensation of Polarization Mode Dispersion for High-Speed Optical Fiber Transmission Systems

Hiroyuki TODA, Masayuki MATSUMOTO and Daniele ALZETTA

Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received August 27, 2004)

In optical fiber transmission systems, polarization mode dispersion (PMD), represents a severe source of degradation as the bit rate increases. In this paper, we review PMD compensation techniques performed in optical domain. We also report our experimental results on PMD compensation by distributing linear polarizers along the transmission line. Polarizers are used as PMD compensator elements with only 1 degree-of-freedom (DOF) which result in simple configuration and fast response. Even though the polarizers do not compensate 1st-order PMD perfectly, Distributed 4 polarizers outperformed a 2-DOF polarizer-based PMD compensator placed at the optical receiver front-end.

Key Words: Optical fiber communication, Polarization mode dispersion (PMD), PMD compensation, Polarizers, Polarization control

1. はじめに

基幹系光ファイバ伝送システムは、様々な要素技術の発展によって、大容量化、長距離化が実現されてきた。このうち光ファイバ伝送路では、これまでは、損失の低減、および群速度分散と非線形光学効果をうまく制御することが重要であったといえる。これらとは別に、システムの高速化に伴い、これまで問題にはならなかった偏波モード分散(PMD: polarization mode dispersion)が伝送特性に深刻な影響を与える場合が出てくるようになった。PMDは時間的に変化する現象であるため、その補償には多くの場合、フィードバック制御が行われる。システムによっては100 μ sオーダー以下の応答速度でPMD補償を行う必要があり、制御パラメータの多いタイプの補償器では所望の応答を得ることは難しい。これに対して最近、制御パラメータの少ない簡易型PMD補償器を伝送路途中に複数分布的に配置して、補償特性を改善する方法が提案された。補償のための制御回路が簡易化でき、高速のPMD補償が実現できる可能性がある。本稿では、PMDについて概略を説明し、その光領域での各種補償方法について述べる。さらに、最近筆者らが行った、偏光子を用いた分布型PMD補償実験について述べる。

2. 偏波モード分散

通常の単一モードファイバでは、横方向からの応力やねじれが加わったり、横断面構造が真円からずれていると複屈折が生じる¹⁾。Fig. 1のように、時間領域でみれば、発生した複屈折によって二つの直交偏光間に群遅延時間差(DGD: differential group delay)が生じ、光信号波形の歪みの原因となる。周波数領域でみれば、出射光の偏光状態(SOP: state of polarization)が光周波数によって変化することになる。

PMDを、ファイバ伝送後の出射光のSOPをポアンカレ球面上で表して説明する^{2,3)}。以下の議論では、偏波依存損失はないものとする。偏波保存ファイバのように直交導波モード間の結合がない場合は、出射光のSOPは光周波数 ω の変化に伴い、複屈折の主軸に対応した点を結んだ軸を中心として回転する。したがって、SOPの軌跡はポアンカレ球面上の小円となる。ここで、出射光のSOPを示すストークスベクトルを $\mathbf{S}$ として、PMDベクトル $\mathbf{\Omega}$ を、

$$\frac{d\mathbf{S}}{d\omega} = \mathbf{W} \times \mathbf{S} \quad (1)$$

と定義する。 $\mathbf{\Omega}$ は、SOP軌跡の回転軸方向 $\mathbf{q}$ を向き、その大きさはDGD $\Delta\tau$ に比例する。

$$\mathbf{\Omega} = \Delta\tau \mathbf{q} \quad (2)$$

Fig. 1 Origin of the polarization mode dispersion (PMD).

通常の単一モードファイバの場合、複屈折の大きさや主軸の方向はファイバ長手方向に変化するためにモード間の結合が生じ、出射光のSOPは ω の変化に対して複雑に変化する (Fig. 2)。しかしながら、図に示したように光周波数変化の小さい範囲では、SOPの軌跡はポアンカレ球面上の小円と近似してよい。この時、式(1)で近似できるPMDを1次PMDという。また、SOPの回転軸とポアンカレ球表面との交点 P_1 、 P_2 に対応する2つの偏光状態を主偏光状態または固有偏光状態 (PSP: principal state of polarization) という。ファイバ入射端からPSPの光を入射すると、1次PMDによる波形歪みは起こらない。光周波数変化が大きくなると、すなわち光信号帯域が広がると、 $\Omega(\omega)$ の周波数に対する変化の影響を考慮しなければならない。

$$\frac{\partial \Omega(\omega)}{\partial \omega} = \frac{\partial \Delta\tau}{\partial \omega} \mathbf{q} + \Delta\tau \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \omega} \quad (3)$$

式(3)は2次PMDを表したもので、右辺第一項は、PSP間で符号の異なる群速度分散に対応する。第二項は偏光度の劣化 (depolarization) に対応する⁴⁾。偏波多重を用いない場合、第一項による波形歪みが問題となる。一般に光周波数の帯域が $1/\text{DGD}$ を超える領域では、2次以上のPMDの影響も考慮する必要がある⁵⁾。

単一モードファイバの複屈折は、周囲温度や振動などまわりの環境によっても変化するから、PMDベクトルは時間的に変動する。PMDベクトルの各成分の変化がラン

Fig. 2 A trace of the state of polarization of the output light transmitted through a standard single-mode fiber with respect to optical frequency ω .

ダムであるとする、DGDはマクスウェル分布に従う。地中や海底に敷設された光ファイバケーブルなら、変動は数十分～時間オーダーのゆっくりしたものである^{6,7)}が、例えば線路沿いに敷設された光ファイバでは、列車からの振動によってmsオーダーの変動が観測される。このような環境では、 $100 \mu\text{s}$ オーダー以下の応答速度でPMD補償を行う必要がある。また、ファイバ長手方向にも複屈折はランダムに変化するから、ファイバ伝送路全体のDGDは、ファイバ長の平方根に比例する⁸⁾。単一モードファイバのPMDの大きさの評価にはPMD係数 D_p [$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$] が用いられる。

いま、ビット間隔の10%まで平均DGDが許容されるとすると、ファイバのPMD係数が $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ の場合、10 Gbit/sでは伝送距離は10,000 kmであるが、40 Gbit/sでは600 kmになる。PMD係数が $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ の場合は、10 Gbit/sでも伝送距離は100 kmに、40 Gbit/sでは6 kmに制限される。最近ではPMD係数が $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ を下回るファイバは比較的容易に作成できる。しかしながら、NoutsiosとPoirierの報告によると、北米で敷設されたファイバの約20%が $1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 以上のPMD係数を示している⁹⁾。したがって、40 Gbit/sベースの長距離基幹系伝送路を構築する場合や、既設ファイバを利用して伝送速度をアップデートする場合に、PMDは留意すべき問題となる。

3. 各種偏波モード分散補償

これまでに検討されてきた主な光領域でのPMD補償器の構成をFig. 3にまとめた^{10, 11)}。前節で述べたように、PMDは時間的に変化する現象であるから、適応的な補償が必要になる。多くの場合、受信器側から制御信号をフィードバックして補償器を制御する。本稿では、制御パラメータの数を自由度と呼ぶ。Fig. 3(a)は、送信器端でファイバへの入射光のSOPを偏光制御素子によって伝送路のPSPに調整する¹²⁾もので、1次PMDが補償できる。送信信号のSOPが直線偏光なら、偏光制御素子は2枚の波長板で構成できるので自由度は2である。しかしながら、受信器から制御信号を送信器まで伝送させなければならないから、高速の制御は困難である。Fig. 3(b)から(e)は、受信器側で補償を行うものである。Fig. 3(b)は、偏光制御素子と可変遅延線を組み合わせた構成である¹³⁾。偏光制御素子で伝送後のPSPを直交直線偏光に変換し、可変遅延線でDGDを補償する。自由度は3で、1次PMDが補償できる。Fig. 3(c)のように、遅延時間を固定としたものも提案されている¹⁴⁾。補償可能なDGDの範囲が制限されるが、自由度が2となる。Fig. 3(d)は、偏光制御素子と遅延線の組を複数接続した構成である¹⁵⁻¹⁷⁾。多段接続とすることで、高次PMDも補償できる。すなわち、波長帯域の広いWDMシステムにおいても、1つの補償器で全チャネルを一括して補償することが可能となる。しかしながら、自由度が多くなると制御が難しくなるので、チャネルあたりの伝送速度の小さなWDMシステムでは、数チャネルごとに1次PMD補償器を設ける方法も有力と考えられる。Fig. 3(e)は、伝送光のPSPを固定偏光子の主軸に一致した

Fig. 3 PMD compensator schemes.

直線偏光に変換するものである^{18,19)}。偏光子の損失(補償時で最大3 dB)があるものの、自由度2で1次PMDが補償できる。フィードバック制御は、偏光子透過光パワーが最大となるように行う方法¹⁸⁾と、受信信号のRFキャリア成分が最大となるように行う方法¹⁹⁾が提案されている。前者の方法では、補償特性がやや劣るものの、制御信号の生成が非常に簡単に行えるという特長がある。

最近、1次PMD補償器をファイバ伝送路に複数分布的に配置する方法が提案された^{20,21)}。分布的に配置することで、高次PMDの影響をある程度抑圧することができる。1次PMD補償器としてFig. 3(e)に示した偏光子による補償器を用いれば、補償器出力のSOPは常に一定であるから、各補償器を独立に制御することができる。このことは、補償器の配置数を多くしても、制御の速度が低下しないことを示す。さらに、ファラデー回転子と固定偏光子で構成された簡易型補償器を分布的に配置する方法が提案されている²²⁾。各補償器は自由度1であるが、1次PMDを部分的にしか補償できない。例えば、PSPが直交円偏光の場合は、DGDによる波形歪みは補償器を通っても低減しない。しかしながら、分布配置数を多くすることで、受信器に配置された1次PMD補償器よりも優れた補償特性が得られることが数値計算によって示されている。文献22では、光中継増幅器前段に補償器を配置し、光増幅器の利

得飽和を利用して補償器出力光パワーの変動を抑制している。一方、各補償器を光中継増幅器直後に配置し、光増幅器の出力光パワー制御ループ内に組み込んで、補償器は光パワー制御より十分速い応答速度で制御する方法も、ASE雑音電力低減の観点から有力と考えている。

4. 偏光子による分布型偏波モード分散補償実験

偏光子による分布型PMD補償の効果を確認するための実験を行った²³⁾。Fig. 4に実験系を示す。実験では、10 Gbit/sのRZ光パルスをもPMDエミュレータに通し、分布型PMD補償器の配置数によってパワーペナルティがどのように変化するかを測定する。波長1550 nmのDFBレーザーの連続出力光をニオブ酸リチウム強度変調器(LN変調器; LNM1)で切り出して繰り返し周波数10 GHzのチャープフリーRZ光パルスを生成した。パルス幅は33 psである。次段のLN変調器(LNM2)を10 Gbit/sのNRZ疑似ランダム信号(PN31段)で駆動して10 Gbit/sの光パルスとした。PMDエミュレータは、長さ12 mの偏波保存ファイバ(PMF)2本を2枚の1/4波長板を介して接続したものである。波長板の角度を変化させることで、DGDを変化させることができる。PMFのDGDは1.5 ps/mである。この値から、4個のPMDエミュレータを直列接続した時の平均DGDは、マクスウェル分布を仮定すると47 psと見積もることができる²⁴⁾。PMD補償器には手動回転偏光子を用い、偏光子後の透過光パワーが最大となるように偏光子の角度を調節した。

LNM: LiNbO₃ intensity modulator, PMDE: PMD emulator, PMDC: PMD compensator, VOA: variable optical attenuator, OPM: optical power monitor, OBPF: optical bandpass filter, SO: sampling oscilloscope, ED: error detector

Fig. 4 Experimental setup for distributed PMD compensation using linear polarizers. (a) Whole setup. (b) Distribution arrangement of PMD emulators and compensators, where N is the number of PMD compensators.

まず、PMDエミュレータと補償器を接続しないback-to-backの状態では符号誤り率(BER)を測定し、可変光アッテネータVOAを調節して $\text{BER} = 10^{-9}$ となる光パワー(受信感度) P_0 [dBm]を測定した。次にエミュレータと補償器を接続した時の受信感度 P_1 [dBm]を測定し、パワーペナルティ($= P_1 - P_0$)を求めた。測定は、PMDエミュレータの1/4波長板の角度を変えながら256通り行い、パワーペナルティが1 dBまたは2 dB以上となる確率(本稿では不稼働率と呼ぶ)を求めた。 10^{-5} 以下といった不稼働率²⁵⁾を求めるには、自動制御を行って測定点を大幅に増やす必要がある。

本実験では、偏光子による最大3 dBの損失の影響は測定にはかからない。補償器による波形歪み改善の効果だけを測定することになる。Fig. 5は観測したアイパターンの代表例である。分布段数を増やしていくほど歪みの少ない良好なアイが得られている。

Fig. 6は配置数 $N = 1, 2, 4$ の時に得られたパワーペナルティのヒストグラムである。 $N = 1$ と2では、3 dBを超えるパワーペナルティが見られるが、 $N = 4$ とするとパワーペナルティは大きく改善されていることがわかる。Table 1に平均パワーペナルティと、不稼働率をまとめた。比較の

Fig. 5 Examples of observed waveforms (40 ps/div) when (a) $N = 1$, (b) $N = 2$, and (c) $N = 4$, respectively.

Fig. 6 Obtained histograms of power penalty when (a) $N = 1$, (b) $N = 2$, and (c) $N = 4$, respectively.

Table 1 Measured results.

		Average power penalty	Outage probability	
			> 1 dB	> 2 dB
Distributed PMDC	$N = 1$	1.0 dB	0.36	0.08
	$N = 2$	0.9 dB	0.29	0.04
	$N = 4$	0.4 dB	0.03	0.00
Post-PMDC (Fig. 3(e))		0.5 dB	0.06	0.00

ために行った、偏光制御素子と偏光子で構成した自由度2の1次PMD補償器(Fig. 3(e))による結果も示している。分布型補償での各補償器は1次PMDを部分的にしか補償しないが、配置数を4とすることで、受信端に配置した1次PMD補償器よりも小さな平均パワーペナルティと不稼働率が得られた。この結果は、従来の受信端に配置された1次PMD補償器では対応できない、より広帯域のWDM伝送システムへの適用可能性を示唆するものである。

5. むすび

本稿では、PMDについて概略を説明し、その光領域での各種補償方法を説明した。さらに、筆者らが行った、偏光子を用いた分布型PMD補償実験について述べた。10

Gbit/sのRZ光送受信機と平均DGDが47 psのPMDエミュレータを用いて補償実験を行った結果、自由度1の簡易型補償器を4段分布的に配置することで、受信器に配置した自由度2の1次PMD補償器よりも小さな平均パワーペナルティおよび不稼働率が得られた。

謝 辞

実験を行うにあたり協力頂いた奈良 成記君(現(株)NTTデータ)に謝意を表します。また、偏光子による分布型PMD補償に関する研究は、通信・放送機構「トータル光通信技術の研究開発」および「文部科学省科研費基盤研究(S)13852010」の援助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) N. Gisin, J. P. Vonderweid, and J. P. Pellaux: IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **9** (1991) 821.
- 2) H. Kogelnik, R. M. Jposon, and L. E. Nelson: *Polarization-mode Dispersion, Optical Fiber Telecommunications IVB*, I. Kaminow and T. Li Ed: Academic Express (1990) Chap. 15, pp. 725-861.
- 3) D. Derickson Ed: Fiber optic test and measurement, Prentice Hall (1998) Chap. 12, pp. 487-495.
- 4) L. E. Nelson, R. M. Jposon, H. Kogelnik, and G. J. Foschini: IEEE Photon. Tech. Lett. **11** (1999) 1614.
- 5) S. Betti, F. Curti, B. Daino, G. De Marchis, E. Iannone, and F. Matera: Opt. Lett. **16** (1991) 467.
- 6) M. Karlsson, J. Brentel, and P. A. Andrekson: IEEE/OSA J.

- Lightwave Technol. **18** (2000) 941.
- 7) M. Brodsky, P. Magill, and N. J. Frigo: IEEE Photon. Tech. Lett. **16** (2004) 209.
- 8) F. Curti, B. Daino, G. de Marchis, and F. Matera: J. Lightwave Technol. **8** (1990) 1162.
- 9) P. Noutsios and S. Poirier: Tech. Digest of NFOEC 2001, 1342.
- 10) H. Sunnerud, C. Xie, M. Karlsson, R. Samuelsson, and P. A. Andrekson: IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **20** (2002) 368.
- 11) 瀧口 浩一: 偏波モード分散(PMD)補償デバイス, オプトロニクス, **21** (2002) 66.
- 12) T. Ono, S. Yamazaki, H. Shimizu, and H. Emura: IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **12** (1994) 891.
- 13) F. Heismann, D. A. Fishman, and D. L. Wilson: Tech. Digest of ECOC'98, 1, 529.
- 14) T. Takahashi, T. Imai, and M. Aiki: Electron. Lett. **30** (1994) 348.
- 15) T. Ozeki and T. Kudou: Tech. Digest of OFC/IOOC'93, WI-9.
- 16) W. Shieh, H. Haunstein, B. McKay, D. Fishman, A. Golubchik, J. Diubaldi, C. Martell, V. Arya, R. Lee, and H. Choudhury: Tech. Digest of ECOC2000, 2, 41.
- 17) Q. Yu, L. Yan, S. Lee, Y. Xie, M. Hauer, Z. Pan, and A. E. Willner: Tech. Digest of ECOC2000, 2, 47.
- 18) M. Karlsson, H. Sunnerud, and P. A. Andrekson: Tech. Digest of ECOC2000, 2, 33.
- 19) M. Hayashi, H. Tanaka, and M. Suzuki: Tech. Digest of OECC/IOOC2001, 48.
- 20) J. M. Fini and H. A. Haus: IEEE Photon. Tech. Lett. **13** (2001) 124.
- 21) C. Xie: Tech. Digest of ECOC2002, 7.1.1.
- 22) D. Alzetta and M. Matsumoto: IEEE Photon. Tech. Lett. **15** (2003) 822.
- 23) 戸田 裕之, 奈良 成記, 松本 正行, ダニエレ アルゼッタ: 信学技報 (2004) NS2003-247.
- 24) C. D. Poole and D. L. Favin: IEEE/OSA J. Lightwave Technol. **12** (1994) 917.
- 25) 高橋 哲夫, 中島 和秀, 大橋 正治: Opt. Lett. **24** (2002) 999.

レーザワード

偏波モード分散(polarization mode dispersion; PMD)

通常の単一モードファイバでは、横方向からの応力やねじれが加わったり、横断面構造が真円からずれていると複屈折が生じる。ファイバ伝送後の光信号を時間領域でみると、発生した複屈折によって二つの直交固有偏光状態の間に群遅延時間差が生じ、光信号波形の歪みの原因となる。この現象を偏波モード分散(PMD)という。単一モードファイバの複屈折は、周囲温度や振動などまわりの環境によっても変化するから、PMDは時間的に変動する。したがって、PMDの補償には多くの場合、フィー

ドバック制御が用いられる。また、ファイバ長手方向にも複屈折はランダムに変化するから、ファイバ伝送路全体のPMDの大きさは、ファイバ長の平方根に比例する。そのため、単一モードファイバのPMDの大きさの評価にはPMD係数 $D_p[\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$ が用いられる。PMDは、40 Gbit/sベースの長距離基幹系伝送路を構築する場合や、既設ファイバを利用して伝送速度をアップデートする場合に、留意すべき問題となる。

(戸田 裕之)