

偏波モード分散とその補償

Polarization-mode dispersion and its mitigation

松本正行

MATSUMOTO Masayuki

要旨

偏波モード分散 (PMD) は高速光ファイバー伝送システムにおける信号劣化の主要な原因の一つである。本解説では、PMD の基本的な性質を述べた後、敷設されたファイバー伝送システムの PMD の統計的な性質や、これまでに提案されている PMD 補償方法の概要を紹介する。

Polarization-mode dispersion (PMD) is one of major factors limiting the performance of high-speed optical fiber transmission systems. This review paper describes basic mathematics and features of PMD, statistical properties of PMD of some installed systems, and principles of proposed methods of PMD mitigation.

[キーワード]

偏波モード分散、光ファイバー伝送システム、複屈折、偏波モード分散補償、信号再生

Polarization-mode dispersion, Optical fiber transmission system, Birefringence, Polarization-mode dispersion compensation, Signal regeneration

1 まえがき

チャンネルあたりの速度が 10Gbps を越える光ファイバー伝送システムにおいて、偏波モード分散 (PMD) はシステムの性能を制限する主要な要因の一である。信号劣化の他の要因 (波長分散や非線形効果) と異なり、PMD による信号劣化は時変かつランダムであり対処が難しい。1980 年代後半から現在に至るまで、PMD 現象の解明と定量的な評価、およびその補償方法に関して多くの研究が行われてきた。最近では、40Gbps 伝送の実システムへの導入とも関連して、敷設ファイバーのより詳細な PMD 評価も行われている。本稿では、PMD の基本的な性質について述べた後、敷設されたファイバ

一伝送システムの PMD の統計的な性質や、PMD 補償方法の概要を紹介する。

2 偏波モード分散の基本的性質

長距離伝送に用いられる単一モード光ファイバーは、製造・ケーブル化・敷設時におけるコアの非真円化や横方向の応力印加のためにわずかな複屈折性をもち、その大きさと方向が伝送方向にランダムに変化する。このような光ファイバーは、固有軸方向がランダムに回転する短い複屈折ファイバーの縦続接続によってモデル化される。ファイバー全長が n 本の複屈折ファイバーから構成されているとすると、入射された光パルスは一般に 2^n 個の成分に分解され、個々の成分はそれぞれ異なる時刻に出力端に到達する。その結果出力波形が歪む。この現象を偏波モード分散 (PMD) と呼ぶ。

図1 (片段)

このような光ファイバーに単色の連続光を入射することを考える。入力光の偏波状態を適当に選んで固定した場合、入力光のキャリア波長を変えると出力光の偏波状態が周期的に変化する。ところが、入力光の偏波状態がある特定の状態の場合は、入力光の波長を変えても出力光の偏波状態が変化しない。このような入力偏波状態は2つ存在し(互いに直交する)、これらを入力主要偏波状態 (Principal State of Polarization: PSP) と呼ぶ[1]。また、入力 PSP に対応する出力の偏波状態を出力 PSP と呼ぶ。また、直交する2つの PSP 間の群遅延時間差を DGD (Differential Group Delay) と呼ぶ。なお、この振舞いは、複屈折が一定の直線複屈折ファイバーに単色の連続光を入射した場合の偏波の振舞いと同一である。つまり、ランダムに変化する微小な複屈折性をもつ一般の単一モード光ファイバーは、一定の複屈折性をもつ直線複屈折ファイバーと同様の振舞いをするとと言える(図1参照)。ただし、PSP は一般には楕円偏波となり、さらに、PSP および DGD は波長によって変化する。一般の単一モード光ファイバーが一定の複屈折性をもつ直線複屈折ファイバーとしてモデル化できるのは、各波長を中心とする狭い帯域内においてである。その帯域幅のおおよその値は

$$\Delta\nu_{\text{PSP}} = 125\text{GHz}/\langle\text{DGD}(\text{ps})\rangle \quad (1)$$

で与えられる[2,3]。ただし、 $\langle\text{DGD}(\text{ps})\rangle$ は ps を単位とする DGD の平均値である。

今、上述の単一モードファイバーに任意の偏波状態の単色光を入射することを考え、

その偏波状態を角周波数 ω_0 における2つの直交する入力 PSP、 $\mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0)$ 、 $\mathbf{e}_{\text{in}}^-(\omega_0)$ を用いて、

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = c_1 \mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0) + c_2 \mathbf{e}_{\text{in}}^-(\omega_0) \quad (2)$$

のように表す。出力信号の電界は、伝搬定数 $\beta(\omega)$ および偏波状態の変化を記述する

ユニタリ行列 $\mathbf{U}(\omega) = \begin{bmatrix} u_1(\omega) & u_2(\omega) \\ -u_2^*(\omega) & u_1^*(\omega) \end{bmatrix}$ を用いて

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}}(\omega) &= \exp[i\beta(\omega)z] \mathbf{U}(\omega) \mathbf{E}_{\text{in}} \\ &\equiv \exp[i\beta(\omega)z] \left[\mathbf{U}(\omega_0) + \frac{d\mathbf{U}}{d\omega} \Delta\omega \right] \left[c_1 \mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0) + c_2 \mathbf{e}_{\text{in}}^-(\omega_0) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

のように表される[1,4]。ただし、上式の最終行では $\mathbf{U}(\omega)$ を ω_0 のまわりで展開し、2次以上の項を省いている。また、 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ である。ここで、入力 PSP $\mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0)$ が、固有値方程式

$$-i\mathbf{U}^+ \frac{d\mathbf{U}}{d\omega} \mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0) = k^+ \mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0)$$

を満たすこと、さらに、出力 PSP と入力 PSP の間に、関係式 $\mathbf{e}_{\text{out}}^+(\omega_0) = \mathbf{U}(\omega_0) \mathbf{e}_{\text{in}}^+(\omega_0)$ が成り立つことを用いると、(3)は

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(\omega) = \exp[i\beta(\omega)z] \left[c_1 \exp(ik^+ \Delta\omega) \mathbf{e}_{\text{out}}^+(\omega_0) + c_2 \exp(ik^- \Delta\omega) \mathbf{e}_{\text{out}}^-(\omega_0) \right], \quad (4)$$

のように書ける。ここで、2つの PSP 間の DGD $\Delta\tau$ は

$$\Delta\tau = k^+ - k^- = 2\sqrt{|du_1/d\omega|^2 + |du_2/d\omega|^2}$$

で与えられる。

式(4)より、出力光 \mathbf{E}_{out} のストークスベクトル \mathbf{S}_{out} を計算すると、 \mathbf{S}_{out} は

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{\text{out}}}{\partial \omega} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{S}_{\text{out}}, \quad (5)$$

を満たすことがわかる。ここで、 $\boldsymbol{\Omega}$ は大きさが $\Delta\tau$ に等しく、出力 PSP $\mathbf{e}_{\text{out}}^+$ に対応するストークスベクトルと同じ方向を向くストークス空間内のベクトルである。 $\boldsymbol{\Omega}$ はこの伝送路の偏波特性を特徴付ける量であり、偏波モード分散ベクトルと呼ばれる。

(5)は、伝送路の長さ z と伝送路への入力光の偏波状態を固定した場合に、キャリア周

波数を変えると出力光の偏波状態がどのように変化するかを示す式である。一方、キャリア周波数を固定して伝送路の長さを変えた場合、伝送路出力光の偏波状態は

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{\text{out}}}{\partial z} = \mathbf{W} \times \mathbf{S}_{\text{out}}, \quad (6)$$

に従って変化する。 \mathbf{W} は伝送路の局所的な複屈折を与えるベクトルであり、複屈折ベクトルと呼ばれる。例えば、複屈折の大きさが $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ 、軸方向がx方向から θ 傾いている直線偏波複屈折ファイバーの場合、

$$\mathbf{W} = [\Delta\beta \cos(2\theta), \Delta\beta \sin(2\theta), 0]^t \quad (7)$$

となる。(5)と(6)を連立させることにより、偏波モード分散ベクトルの場所的な変化を与える方程式が

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \omega} + \mathbf{W} \times \Omega \quad (8)$$

のように求まる[5]。

先にも述べたように、一般の単一モード光ファイバーは固有軸方向がランダムに回転する短い複屈折ファイバーの縦続接続によってモデル化される。このようなファイバーに対して、(7)を用いて(8)を解くことにより、ファイバー全長の偏波特性を記述する偏波モード分散ベクトル Ω が求まる[6]。各複屈折ファイバーの固有軸方向がランダムに変化する場合は、 Ω もランダム変数になる。また、 Ω の大きさの2乗平均を計算すると、

$$\langle |\Omega|^2 \rangle = N(\Delta t)^2 \quad (9)$$

となる。ただし、 N は縦続接続された複屈折ファイバーの個数であり、 Δt は各複屈折ファイバーの群遅延時間である。(9)は、一般の単一モード光ファイバーのDGDのrms値が距離の平方根に比例することを示している。また、 N が十分に大きい場合、 Ω の各成分はガウス分布に従うランダム変数となる。この場合、 Ω の大きさ、つまりDGDは、マクスウェル分布に従い、その確率密度関数は

$$P_{\text{DGD}}(x) = \frac{32x^2}{\pi^2 \langle |\Omega|^2 \rangle^3} \exp\left(-\frac{4x^2}{\pi \langle |\Omega|^2 \rangle}\right) \quad (10)$$

で与えられる。

3 敷設された光ファイバー伝送路の偏波特性

一般の単一モード光ファイバー伝送路の DGD は、伝送路周囲の環境変化に応じて時間的にランダムに変化する。DGD は信号のキャリア波長を変化させても変化し、(1) で与えられる周波数幅の6倍程度以上の周波数差があると、2つの波長における DGD の振舞いはほぼ独立になる[7]。DGD が、信号の伝送速度や変調形式で決まる上限を越えて大きな値をとるとシステム不稼働 (outage) が発生する。PMD によるシステム不稼働率が、伝送速度や変調形式にどのように依存するかや、PMD 補償によって不稼働率をどの程度下げることができるかを知ることは、高速の伝送システムを設計するにあたって重要である。

PMD によるシステム不稼働率の計算にあたって、これまでのほとんどの場合では、伝送路の DGD の分布として2で述べたマクスウェル分布が仮定されてきた[8]。また、WDM システムの各チャンネルは同一の不稼働特性を示すと考えられてきた。それに対して、最近、敷設された現実の伝送システムの中には、時間スケールにもよるが、DGD がマクスウェル分布に従わない場合があること、WDM システムの異なる波長チャンネルは異なる不稼働特性を持つ場合があることが指摘されている[9-11]。

図2 (片段)

図2にそのような伝送システムのモデル図を示す。送受信機間の伝送路ファイバーはほとんどの区間では地中に埋設されているが、有限個の場所(光増幅器や分散補償モジュールが挿入される地点や、伝送路が河川をまたぐ場所等)で、地上に引出されている。伝送路が地中に埋められている区間では、周囲温度の時間変化は小さく、この区間の DGD や PSP は長期間(数週間あるいは数ヶ月)にわたってほとんど変化しない。一方、伝送路が地表に引出されている箇所では、ファイバーの周囲温度は時間あるいは分の速さで細かく変化し、それに応じて光の偏波状態が大きく変化する。つまり、このような伝送ファイバーは、有限個の複屈折ファイバーが可変の偏波回転器を介して接続されたものとして振舞う。全伝送路を構成する複屈折ファイバーの個数が少なくなると、DGD の統計的な性質はマクスウェル分布で記述される性質から大きく異なってくる。

例えば、送信機から受信機までの DGD の平均値が 3ps の伝送路を考える。この伝送路が、6区間の安定な伝送路とそれをつなぐ5個の偏波回転器から構成されるとする。各区間の DGD は平均値が $3\text{ps}/\sqrt{6}$ のマクスウェル分布に従うランダムな値をとる。今、6区間の DGD が(0.93, 0.82, 1.17, 1.62, 1.14, 0.55ps)となる組(組 A)と、(1.37,

0.77, 1.94, 1.47, 1.70, 2.43ps)となる組(組B)を考える[11]。これら2つの組はWDMシステムにおける異なる2つの波長チャンネルにおける値であると考えられることもできる。ファイバー区間の接続点に置かれた偏波回転器が、偏波状態をポアンカレ球面上でランダムにかつ均一に散乱させるとすると、組Aおよび組Bにおける全DGDの確率密度分布は図3のようになる(確率密度関数は解析的に計算できる[12])。図3には平均値が3psのmaksウェル分布も重ねて描かれてある。図3から、2つの組のDGDの確率密度関数は互いに、またmaksウェル分布とも異なった形になることがわかる。特に、システム不稼働をもたらすような大きなDGDの発生確率が異なる。これらの分布は、各区間のDGDの値が変化するまでのかなりの長い期間内にわたって継続する。従って、この期間内においては、ある波長チャンネルではシステム不稼働が頻繁に発生し、一方、他の波長チャンネルではシステム不稼働がごく稀(または不稼働になる確率がゼロ)になる、といった状況が発生する。これは、全ての波長チャンネルのDGDが同じmaksウェル分布に従うと考えたときのシステム不稼働性と大きく異なっており、システムの設計指針やPMD補償の戦略も、それに応じて見直す必要がある。

図3(片段)

4 偏波モード分散補償

上述のように、光ファイバー伝送路の偏波特性は時間的にランダムに変化する。PMDによる信号劣化とそれによるシステム不稼働発生を回避するために、これまで多くの方法が提案され議論されてきた。PMDによる信号劣化を低減するための方法としては、1. PMDへの耐性に富む変調フォーマットを用いる方法と、2. 光または電気領域で補償を行う方法、が代表的である。

1. に関しては、まず、RZ信号形式がNRZ信号形式よりもPMD耐性に優れていることが示されている。これは、RZ信号のほうがビットスロットの中央に電力がより集中しているため、PMDによる波形広がりが生じてもシンボル間干渉が起きにくいためである。ただし、RZ信号のほうがスペクトル幅が広いので、光領域におけるPMD補償の有効性は低くなる[13]。最近では、ビット速度を保ったままシンボル速度を下げることもできる多値変調方式の利用も、PMDによる伝送特性劣化を避ける方法として注目を集めており、DQPSK(Differential Quadrature Phase-Shift Keying)伝送方式のPMD耐性が詳しく調べられている[14]。同期振幅変調などの伝送制御を併用した光ソリトン伝送方式も大きなPMD耐性をもつことが知られているが[15]、これは一種の全光3R再生を施し

た伝送方式であると言える。2R や 3R 再生は PMD に限らず様々な信号劣化の累積をリセットする方法として有効であり、PMD に関しても補償効果があることが示されている[16,17]。図4に、ファイバーの非線形効果を利用した簡易な構成の全光 2R 信号再生器を示す。高非線形ファイバー中の自己位相変調によって入力信号のスペクトル幅が広げられ、その一部を波長をわずかにずらした光バンドパスフィルタによって切り出す。この方法によって信号パルスの波形整形と雑音除去効果が得られる[18]。図5は、40Gbps、1000km の伝送システム(PMD が $0.3\text{ps}/\text{km}^{1/2}$)にこの再生器を挿入した場合に、PMD によるアイ開口劣化がどれだけ抑制されるかを計算した結果である[16]。2R 再生だけでは十分な PMD 補償効果が得られないが、同期変調によるタイミング再生を併用すると、信号劣化が大幅に小さくなることがわかる。

図4(片段)

図5(片段)

2. に関しては、十数年前から光領域での適応的な補償法について多くの研究が報告されてきた[19]。代表的な方法として、伝送路入力端に偏波コントローラ(受信器からフィードバックされる信号品質モニタ信号によって制御される)を置き、伝送路の一方の PSP のみを使って信号を伝送する方法と、受信端に偏波コントローラと遅延線からなる PMD 補償器を挿入する方法がある。なお、これらの PMD 補償は基本的には1次の PMD 補償であり、補償できるスペクトル帯域幅は狭く、WDM システムにおける PMD 補償を行うためには、複数個またはチャンネル毎に補償器を用意する必要がある。この問題を軽減するために、WDM チャンネル間で補償器を共用する方法もいくつか提案されている[20,21]。

検波後の電気領域の信号処理による波形補償[22]もコスト(特に WDM システムにおいてチャンネル毎に補償を行う場合)の点で有利であるが、高次 PMD も含めた精密な補償は困難で、40Gbps やそれ以上の高速伝送への適用も難しい。

5 今後の研究課題

PMD による信号劣化に適切に対応しそれを有効に補償するためには、PMD の時変性およびランダム性の定量的な把握が不可欠である。DGD や PSP の時間変化の速さを測定した例はいくつかあるが、理論的な解析はほとんど行われていない[23]。今後、

システム不稼働持続時間の統計などを明らかにすることが重要である。また、適応的な PMD 補償器における、動作速度や適応制御アルゴリズムの最適化もあまり論じられていない。これら、PMD 現象と補償の動的な振舞いの定量的な解明と制御が、偏波モード分散に関する今後の主要な研究課題の一つであると考えられる。また、光ネットワーク上位層における制御も含めて、間欠的かつ確率的に生じる PMD による伝送劣化の影響を回避する効果的な方法を明らかにすることも重要である。

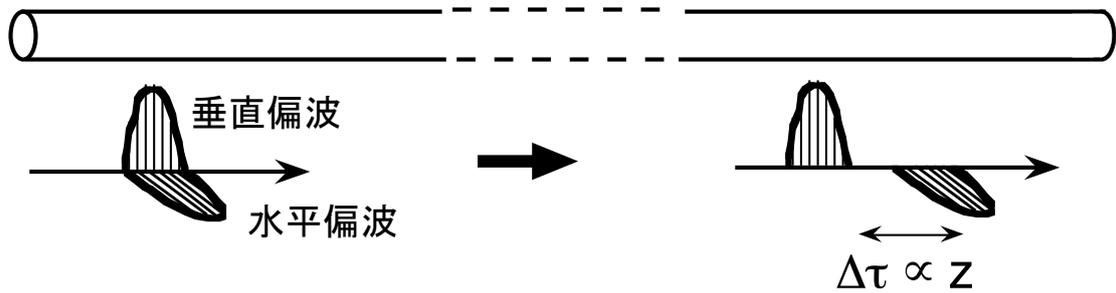
謝辞 本報告の一部は情報通信研究機構委託研究「トータル光通信技術の研究開発」の成果です。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

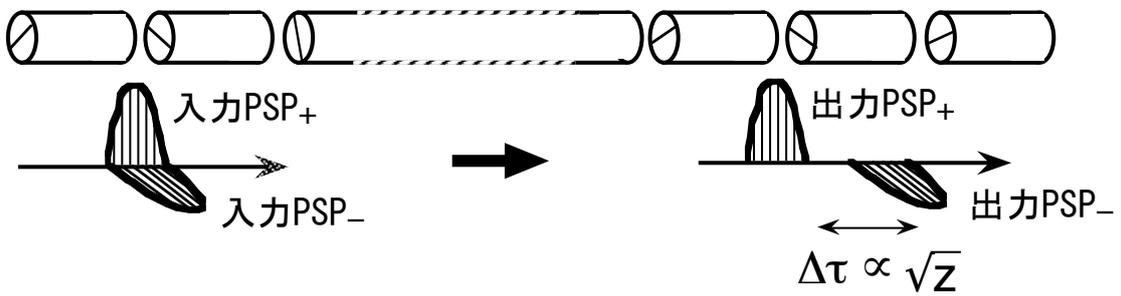
- 1 C. D. Poole and R. E. Wagner, "Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres", *Electron. Lett.* Vol.22, pp. 1029-1030, 1986.
- 2 S. Betti, F. Curti, B. Daino, G. De Marchis, E. Iannone, and F. Matera, "Evolution of the bandwidth of the principal states of polarization in single-mode fibers", *Opt. Lett.* Vol. 16, pp. 467-469, 1991.
- 3 H. Kogelnik, R. M. Jopson, and L. E. Nelson, "Polarization-mode dispersion", *Optical Fiber Telecommunications, IV B, System and Impairments*, ch.15, Academic Press, San Diego, 2002.
- 4 A. Hasegawa and M. Matsumoto, "Optical Solitons in Fibers, 3rd Ed.", ch.9, Springer, Berlin, 2002.
- 5 C. D. Poole, J. H. Winters, and J. A. Nagel, "Dynamical equation for polarization dispersion", *Opt. Lett.* Vol.16, pp. 372-374, 1999.
- 6 C. D. Poole and D. L. Favin, "Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer", *J. Lightwave Technol.* Vol.12, pp. 917-929, 1994.
- 7 M. Karlsson and J. Brentel, "Autocorrelation function of the polarization-mode dispersion vector", *Opt. Lett.* Vol.24, pp. 939-941, 1999.
- 8 J. A. Nagel, M. W. Chbat, L. D. Garrett, J. P. Soigne, N. A. Weaver, B. M. Desthieux, H. Bülow, A. R. McCormick, and R. M. Derosier, "Long-term PMD mitigation at 10Gb/s and time dynamics over high-PMD installed fiber", 2000

- European Conference on Optical Communication, Vol.2, 31, 2000.
- 9 A. Mecozzi, C. Antonelli, M. Boroditsky, and M. Brodsky, "Characterization of the time dependence of polarization mode dispersion", *Opt. Lett.* Vol.29, pp. 2599–2601, 2004.
 - 10 M. Boroditsky, and M. Brodsky, N. J. Frigo, P. Magill, C. Antonelli, and A. Mecozzi, "Outage probabilities for fiber routes with finite number of degrees of freedom", *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol.17, pp.345–347, 2005.
 - 11 H. Kogelnik, P. J. Winzer, L. E. Nelson, R. M. Jopson, M. Boroditsky, and M. Brodsky, "First-order PMD outage for the hinge model", *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol.17, pp.1208–1210, 2005.
 - 12 C. Antonelli and A. Mecozzi, "Statistics of the DGD in PMD emulators", *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol.16, pp.1840–1842, 2004.
 - 13 H. Sunnerud, M. Karlsson, C. Xie, and P. A. Andrekson, "Polarization-mode dispersion in high-speed fiber-optic transmission systems", *J. Lightwave Tech.* Vol.20, pp. 2204–2219, 2002.
 - 14 DQPSK
 - 15 M. Matsumoto, Y. Akagi, and A. Hasegawa, "Propagation of solitons in fibers with randomly-varying birefringence : Effects of soliton transmission control", *J. Lightwave Technol.* Vol. 15, pp. 584–589, 1997.
 - 16 M. Matsumoto, "PMD mitigation by a fiber-based all-optical signal regenerator", 2003 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, Polarization Mode Dispersion, WB2.5, 2003.
 - 17 Y. Akasaka, Z. Zhu, Z. Pan, and S. J. B. Yoo, "PMD mitigation application of MZI-SOA based optical 2R regeneration in the receiver", 2005 Optical Fiber Communication Conference, JWA22, 2005.
 - 18 P. V. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect", 1998 European Conference on Optical Communication, pp.475–476, 1998.
 - 19 T. Takahashi, T. Imai, and M. Aiki, "Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarisation mode dispersion in in-line amplifier systems", *Electron. Lett.* Vol.30, pp. 348–349, 1994.
 - 20 R. Khosravani, S. A. Havstad, Y. W. Song, P. Ebrahimi, and A. E. Willner, "Polarization-mode dispersion compensation in WDM systems", *IEEE Photon.*

- Technol. Lett. Vol.13, pp.1370–1372, 2001.
- 21 M Boroditsky, C. Antonelli, and A. Mecozzi, "Broadband PMD mitigation using a mid-span polarization controller", 2005 European Conference on Optical Communication, We1.3.5, 2005.
 - 22 F. Buchali and H. Bülow, "Adaptive PMD compensation by electrical and optical techniques", J. Lightwave Technol. Vol. 22, pp. 1116–1126, 2004.
 - 23 C. Antonelli, A. Mecozzi, M. Brodsky, and M. Boroditsky, "A simple analytical model for PMD temporal evolution", 2006 Optical Fiber Communication Conference, OWJ4, 2006.



(a)



(b)

図1 (a)一定の複屈折をもつ直線複屈折ファイバー(偏波保持ファイバー)と、(b)一般の単一モード光ファイバー(非偏波保持ファイバー)、を伝わる光パルスの様子(本文中の説明とは異なり、この図では連続光ではなく、パルスをファイバーに入射している)。

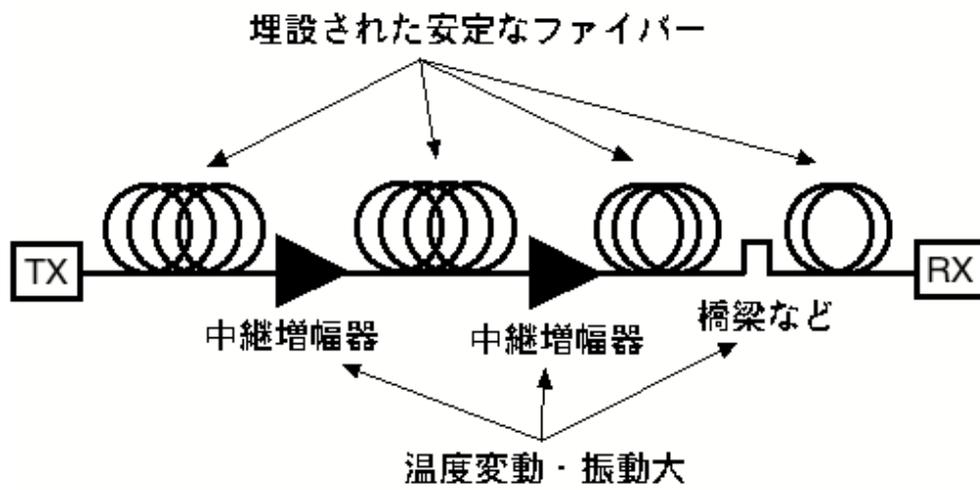


図2 敷設された伝送路のモデル

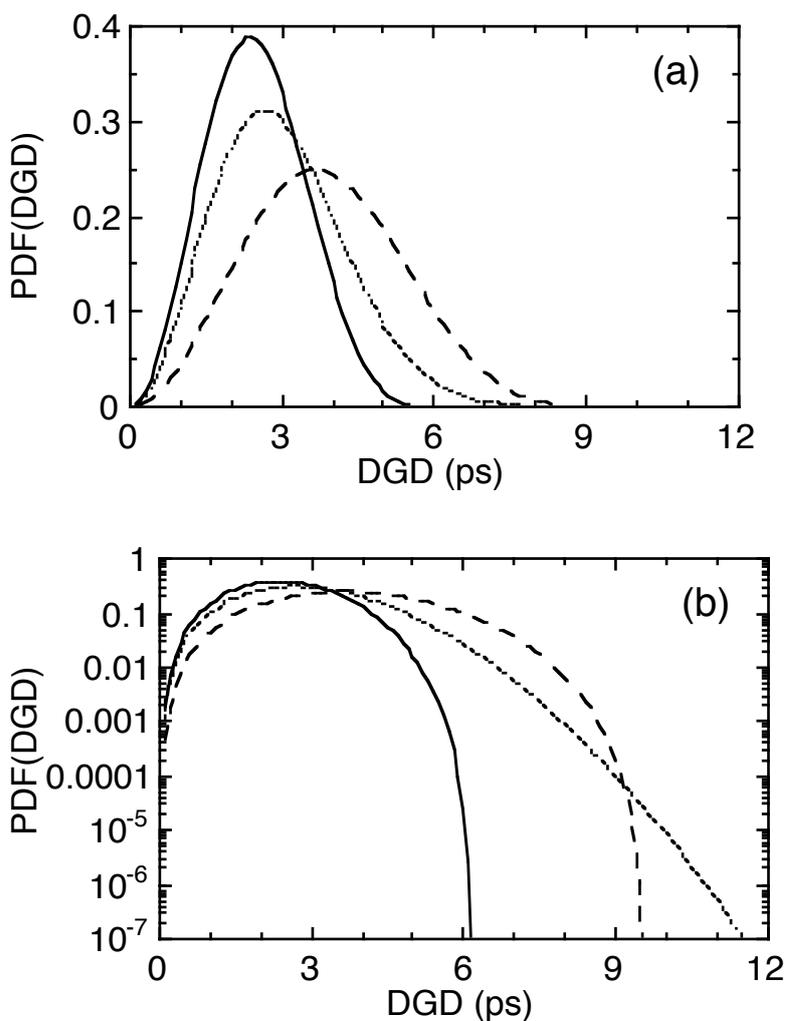


図3 DGD が固定された6本のファイバから構成された伝送システムの総 DGD の確率密度関数。実線:組 A、破線:組 B、点線:マクスウェル分布。(a):縦軸が線形目盛、(b):縦軸が対数目盛。

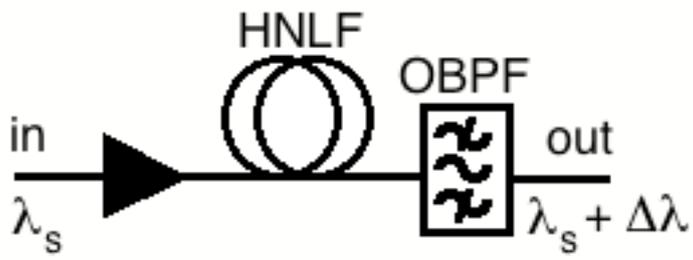


図4 光ファイバーの非線形効果を利用した全光 2R 再生器、HNLF:高非線形ファイバー、OBPF:光バンドパスフィルター。

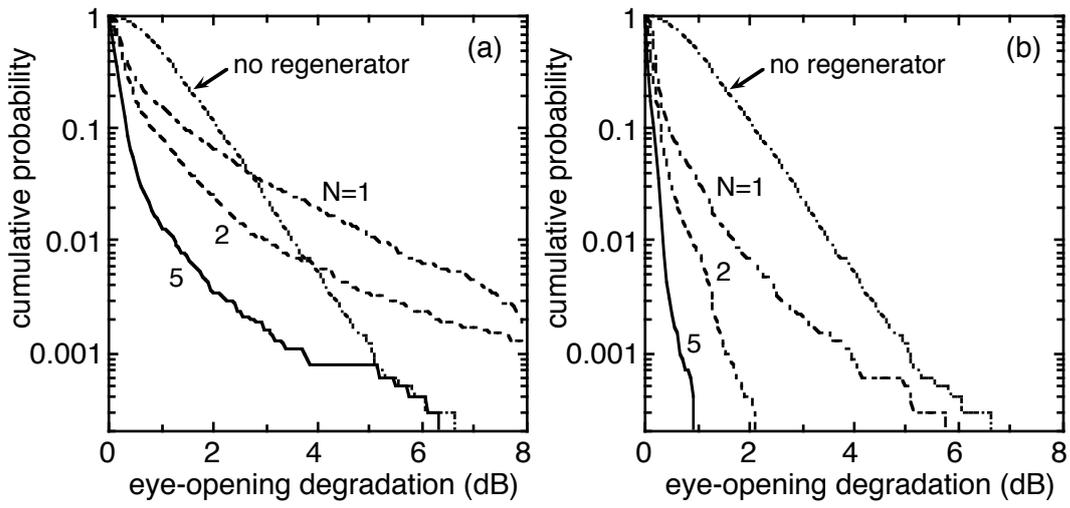


図5 信号再生器による PMD 補償効果。(a)図4に示す 2R 再生器を伝送路中に N 個挿入した場合のアイ開口劣化の累積分布、(b)図4に示す 2R 再生に同期変調によるタイミング再生を付加した場合。