

■9 群 (電子材料・デバイス) - 6 編 (受動・機能デバイス)

---

## 5 章 分散補償デバイス

### 【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 5-1 分散補償光ファイバ
- 5-2 導波路型分散補償デバイス
- 5-3 自由空間光学系分散補償デバイス
- 5-4 ファイバブラッググレーティング
- 5-5 偏波分散補償技術

## ■9 群-6 編-5 章

### 5-1 分散補償光ファイバ

(執筆者：笹岡英資) [2011 年 10 月 受領]

#### 5-1-1 波長分散補償の必要性と分散補償光ファイバの位置付け

光ファイバ中を伝搬する光の波長に依存する群遅延時間差である波長分散は、時間領域での光信号歪みをもたらす。波長分散は伝送用光ファイバ長に応じて変化する。また、光信号の変調周波数が高いほど波長スペクトル広がりが増大し、かつ、1 信号に対応する時間も短くなるため、許容可能な波長分散量は変調周波数の 2 乗に反比例して減少する。このため、長距離かつ大容量（高変調周波数）な光通信システムほど波長分散補償の必要性は高まる。例えば、標準的なシングルモード光ファイバ（SMF：Single Mode Fiber）の波長 1550 nm における波長分散の典型値は約 17 ps/nm/km であり（図 1・1 参照）、外部変調器を使用した強度変調直接検波での 10 Gbps 光通信システムの許容波長分散量は 1000 ps/nm 程度となる。このため、光ファイバ長が 60 km 程度以上となると、波長分散補償の必要性が生じる。更に、40 Gbps の光通信システムでは、4 km 程度以上で波長分散補償を行うことが必要となる。

光学的分散補償デバイスとしては、分散補償光ファイバ（DCF：Dispersion Compensating Fiber）の他に、光導波路型、自由空間光学型、ファイバブラッググレーティング型などがあるが、DCF は以下の特徴を有し、広く実用化された分散補償デバイスである。

- ・分散補償可能な波長帯域が広い。
- ・波長に対する分散値の変動が滑らか。
- ・伝送路用光ファイバとの接続が比較的容易。
- ・ファイバ長により波長分散補償量が調整可能。

#### 5-1-2 波長分散補償の対象と分散補償光ファイバの性能指標

波長分散補償の対象としては、標準的な SMF のほか、非ゼロ分散シフト光ファイバ（NZ-DSF：Non-Zero Dispersion Shifted Fiber）、更には、非線形現象による伝送性能の劣化を避けるために L-band で分散シフト光ファイバ（DSF：Dispersion Shifted Fiber）を使用する場合も含まれる。図 1・1 には、これらの光ファイバについて、波長分散の波長依存性の典型例を示した。

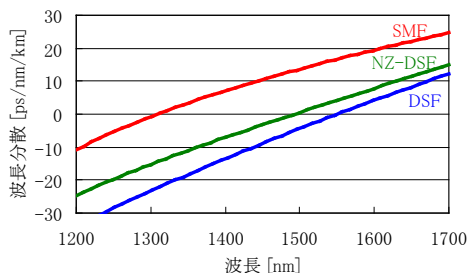


図 1・1 SMF, NZ-DSF, DSF の波長分散の波長依存性典型例

DCF の分散補償性能を示す 1 つの指標として、式(1・1)に示す分散スロープ補償率 (DSCR : Dispersion Slope Compensating Ratio) が挙げられる。

$$DSCR = (D_{\text{伝送路}}/S_{\text{伝送路}}) \times S_{\text{DCF}}/D_{\text{DCF}} \quad (1 \cdot 1)$$

ここで、 $D_{\text{伝送路}}$ 、 $S_{\text{伝送路}}$ はそれぞれ、伝送路用光ファイバの波長分散、分散スロープ、 $D_{\text{DCF}}$ 、 $S_{\text{DCF}}$ は DCF の波長分散、分散スロープであり、一般に DSCR が 100%に近いほど、伝送路の波長分散を広帯域にわたり補償可能となる。

DCF の屈折率分布例を図 1・2 に示すが、負に大きな波長分散・分散スロープを得るためには、コア部の屈折率を高くし、屈折率の低いトレンチ部を設けることが多く、この結果、単位 DCF 長さ当たりの伝送損失  $\alpha_{\text{DCF}}$  が大きくなる可能性がある。そこで、DCF の波長分散値  $DD_{\text{DCF}}$  と伝送損失  $\alpha_{\text{DCF}}$  を加味した性能指標として、式(1・2)に示した性能指数 (FOM : Figure of Merit) がよく用いられる。FOM が大きいほど、単位損失量当たりの分散補償量が大きく、より優れた DCF であると言える。

$$FOM = |D_{\text{DCF}}| / \alpha_{\text{DCF}} \quad (1 \cdot 2)$$

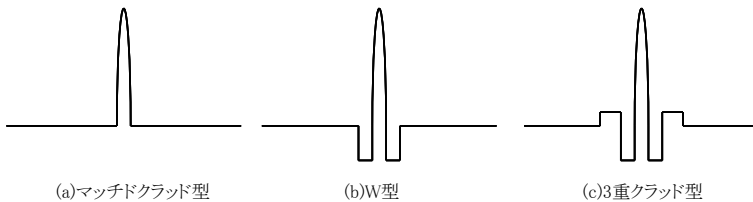


図 1・2 DCF の屈折率分布例

### 5-1-3 波長分散補償のメカニズムと分散補償光ファイバの例

一般的な DCF では、基底モードの構造分散を大きく変化させるため、標準的な SMF の数倍の比屈折率差を持たせている。更に、分散スロープも調整するためには、構造分散の波長依存性も調整する必要があるため、図 1・2 に示した W 型、あるいは、3 重クラッド型 DCF が用いられる。なお、3 重クラッド型は、DCF を小径に巻いてモジュール化する際の課題である曲げ損失の抑制にも効果的である。これらの結果として、標準的な SMF 用としては、FOM を 450 ps/nm/dB まで向上させた DCF が実現されており<sup>1)</sup>、NZ-DSF、DSF 用の DCF も製品化されている。一方、これ以上の FOM 向上には限界があると考えられ、また、比屈折率差が大きいために偏波モード分散 (PMD : Polarization Mode Dispersion)、非線形性の低減も課題となる。

前記の課題に対する一つの対処策として、多モードファイバにおいて、基底モードではなく、高次モードの波長分散特性を利用する方法が考えられる。この方法の一例として、FOM が 2200 ps/nm/dB と前記の一般的な DCF の約 5 倍の値が報告されている<sup>2)</sup>。更に、多モードファイバを利用するため、コア径の拡大、この結果として実効断面積の拡大が可能となり、DCF の非線形性低減に対しても有効な方法となっている。反面、この方法においては、入射部で基底モードを高次モードに、出射部で高次モードを基底モードに変換するデバイスが必須となる。更に、これら変換デバイスの不完全さ、及び、DCF 内でのモード変換によりモード間の干渉 (MPI :

Multi Path Interference) が発生する可能性があるため、MPI を伝送性能に悪影響を及ぼさないレベルに抑えることが課題となる。

より一層大きな FOM を実現する可能性のある手段として、3重クラッド型の屈折率分布を調整することにより、中心コア部を伝搬するモードとリングコア部を伝搬するモードの結合状態が波長に依存して変化することを利用する方法が提案されている。中心コア部・リングコア部を含めたコア部分全体について考えると、結合状態の波長依存変化は実効屈折率の波長依存変化とみなせ、この結果として構造分散を変化させることができる。更に、中心コア部とリングコア部の結合状態の変化をより急激にするため、中心コア、リングコア間に空孔を導入した例が報告されており、波長分散値が 11200 ps/nm/km と、高次モードを利用した DCF の約 9 倍の値が実現されている<sup>3)</sup>。一方、この方法においては、波長分散値の波長変化が急激であり、分散スロープの調整、及び、広い波長帯域への対応が課題となっている。更に、空孔径の安定化などによる長手方向での構造・特性安定化、及び、伝送損失の低減も課題になると考えられる。

前記 3 種類の DCF 例について、特性、課題をまとめた一覧表を表 1・1 に示す。

表 1・1 各種 DCF 例の比較表

	一般的な DCF <sup>1)</sup>	高次モード DCF <sup>2)</sup>	モード結合 DCF <sup>3)</sup>
波長分散 [ps/nm/km]	-180	-1275	-11200
伝送損失 [dB/km]	0.40	0.58	不明
FOM [ps/nm/dB]	450	2200	不明
実効断面積 [ $\mu\text{m}^2$ ]	17	90	不明
課題	FOM の限界、偏波モード分散、非線形性	モード変換デバイスの必要性、モード間干渉	分散スロープの調整、広い波長帯域への対応

#### ■参考文献

- 1) M. Hirano, S. Hagihara, F. Ohkubo, Y. Koyano, and T. Sasaki : “DCF module with low insertion loss, small residual dispersion, and low PMD,” Tech. Digest of OFC2009, Paper OWN-5, 2009.
- 2) L.G. Nielsen, K.G. Jespersen, D. Jakobsen, and K.S. Feder : “A dispersion compensating fiber with a factor 5 improvement in figure of merit and a factor 4.5 improvement in effective area,” Tech. Digest of OFC/NFOEC2011, Paper OWA1, 2011.
- 3) T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, and S. Tomita : “Hole-assisted dual concentric core fiber with ultra large negative dispersion coefficient of -11200 ps/nm/km,” Proc. of ECOC 2010, Paper We.8.F.2, 2010.

## ■9群-6編-5章

### 5-2 導波路型分散補償デバイス

(執筆者：津田裕之) [2011年10月 受領]

導波路型分散補償デバイスとは、伝送路の群速度分散による波形劣化を補償する、伝送路の分散値と逆符号で絶対値の等しい分散値を有する光回路である。分散補償デバイスの補償値は、少なくとも、波長 1550 nm において、陸上伝送システムの標準的区間長である 80 km に相当する標準光ファイバの分散値の 1600 ps/nm 以上でなければならない。また、典型的な波長分割多重システムのチャンネル間隔は 0.8 nm であるから、分散補償デバイスの帯域幅は 0.8 nm であり、デバイス内に 1280 ps の遅延時間に相当する遅延導波路が必要であることが分かる。遅延導波路長は、材質に依存するが、10~25 cm 程度となり、大規模な光回路が必要であることを示している。現時点での導波路損失の値を考慮すると、石英導波路以外の導波路は損失が大きく、実用的ではない。しかし、デバイスサイズの縮小のために、Si などの半導体導波路の伝搬損失が改善され、導波路型分散補償デバイスに適用されることが期待される。

導波路回路構成は、二分岐の干渉導波路を多段に接続するラティス型、多分岐のアレイ導波路回折格子を利用するアレイ導波路回折格子型、及び、それらを組み合わせた構成に分類される<sup>1)</sup>。ラティス型は原理損失がないこと、アレイ導波路回折格子型は制御箇所が少ないことが利点である。これらの分散補償デバイスは、フリースペクトルレンジを波長分割多重システムのチャンネル間隔に一致させることによって、多チャンネルの分散補償を一括して行うことができる。遅延時間を長くするために、共振構造を持つ分散補償デバイスも報告されているが、一般に十分な帯域を得ることができないので本節では割愛する。

#### 5-2-1 ラティス型分散補償デバイス

図 2・1 にラティス型分散補償デバイスの構成を示す<sup>2)</sup>。3 dB 結合器と不等なアーム長を有する干渉導波路が多段に接続されている。ここで、 $\Delta L$ 、 $\Delta L + \Delta L'$  は長いアームと短いアームとの導波路長差である。各アームにはヒータが積層され、ヒータ電流を変えて位相シフトが可能である。適切に位相制御することにより、例えば、入射信号光の高周波成分が長い方のアームを伝搬し、低周波成分が短い方のアームを伝搬するように設定して、波長分散を与えることができる。分散値は、アーム間の遅延時間差で決まる範囲内で、正負の任意の値に設定可能である。非対称干渉導波路の段数に比例して最大分散値は大きくなる。また、導波路長差を大きくすれば、最大分散値は大きくなるが、分散補償帯域は狭まる。

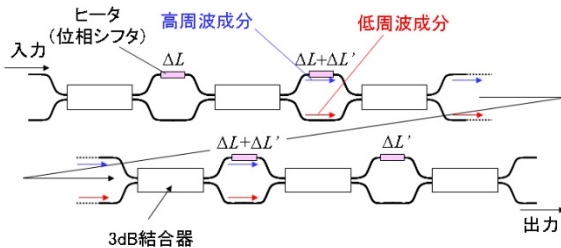


図 2・1 ラティス型分散補償デバイスの構成

## 5-2-2 アレイ導波路回折格子型分散補償デバイス

図 2・2 に 1 段構成のアレイ導波路回折格子型分散補償デバイス<sup>3)~5)</sup>を示す。一般に素子サイズを小形にするために、スペクトル面に配置したミラーで反射して折り返す構造が利用される。動作原理を簡単に述べると、入射光信号をアレイ導波路回折格子によってスペクトル分解し、各々のスペクトル成分の位相をスペクトル面近傍に配置した位相シフタで制御して分散補償する。伝送後の光信号は、伝送路の群速度分散によって中心周波数に対して放物状の位相歪みが生じるので、それと正反対の位相変化を加えることによって、分散補償が行われて波形が再生する。あるいは、アレイ導波路回折格子のスペクトル面に与えられる位相変化に応じて波面が傾き、入射信号光の周波数成分に応じて、アレイ導波路の長い方の導波路に結合したり、短い方の導波路に結合したりして波長分散が与えられると考えてもよい。位相シフタとして、スラブ導波路部分にレンズ形状の溝を形成し、熱光学効果の大きいシリコン樹脂を充填し、ヒータで屈折率を制御する方法が実現されている<sup>6)</sup>。

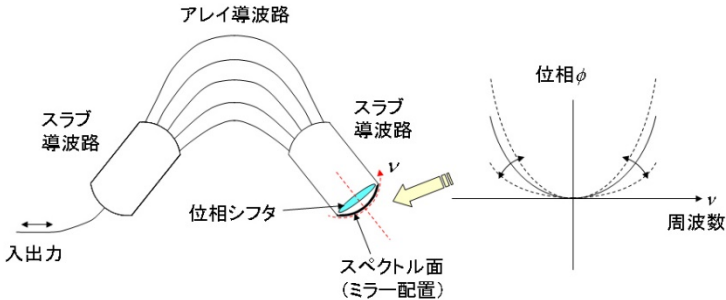


図 2・2 1 段構成のアレイ導波路回折格子型分散補償デバイスと動作原理

### 第1段アレイ導波路回折格子 第2段アレイ導波路回折格子

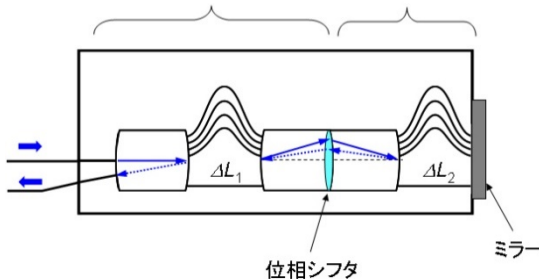


図 2・3 2 段構成のアレイ導波路回折格子型分散補償デバイス

図 2・3 に 2 段構成のアレイ導波路回折格子型分散補償デバイス<sup>7)</sup>を示す。1 段構成では、設定した分散値に応じて補償帯域幅が大きく変化する問題がある。これは、中心周波数から離れた周波数成分ほど、出力導波路に斜めに入射するためである。この問題を解消するために、アレイ導波路回折格子を多段化することが有効である<sup>1)</sup>。また、反射構成であるが、出力ポート

を入力ポートと分離して、配置することが可能である。

### 5-2-3 高次分散補償

波長分割多重通信では、数十 nm にわたる波長範囲を利用するので、チャンネルごとに分散値が少しずつ異なる。このため、多チャンネルの信号に対して一括分散補償を行った後に、中心波長から外れたチャンネルの信号では、分散が完全に補償されない。高速の変調信号に対して、この残留分散を補償するための高次の分散補償器が必要となる。アレイ導波路回折格子型分散補償器では、スペクトル面での位相制御を適切に行って高次の分散補償を行うことが可能であり、原理確認実験が行われている<sup>3)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) C.R. Doerr, S. Chandrasekhar, M.A. Cappuzzo, A. Wong-Foy, E.Y. Chen, and L.T. Gomez : “Four-stage Mach-Zehnder-type tunable optical dispersion compensator with single-knob control,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol.17, no.12, pp.2637-2639, 2005.
- 2) K. Takiguchi, K. Okamoto, and K. Moriwaki : “Planar lightwave circuit dispersion equalizer,” J. Lightwave Technol., vol.14, no.9, pp.2003-2011, 1996.
- 3) H. Tsuda, T. Ishii, K. Naganuma, H. Takenouchi K. Okamoto, Y. Inoue, and T. Kurokawa : “Second- and third-order dispersion compensator using a high-resolution arrayed-waveguide grating,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol.11, no.5, pp.569-571, 1999.
- 4) H. Tsuda, H. Takenouchi, A. Hirano, T. Kurokawa, and K. Okamoto : “Performance analysis of a dispersion compensator using arrayed-waveguide gratings,” J. Lightwave Technol., vol.18, no.8, pp.1139-1147, 2000.
- 5) T. Suzuki, K. Masuda, H. Ishikawa, Y. Abe, S. Kashimura, H. Uetsuka and H. Tsuda : “Planar lightwave circuit dispersion compensator using a compact arrowhead arrayed-waveguide grating,” IEICE Electron. Express, vol.2, no.23, pp.572-577, 2005.
- 6) Y. Ikuma and H. Tsuda : “AWG-based tunable optical dispersion compensator with multiple lens structure,” J. Lightwave Technol., vol.27, no.22, pp.5202-5207, 2009.
- 7) Y. Ikuma, T. Mizuno, H. Takahashi, and H. Tsuda : “Circulator-Free Reflection-Type Tunable Optical Dispersion Compensator Using Tandem Arrayed-Waveguide Gratings,” J. Lightwave Technol., vol.29, no.16, pp.2447-2453, 2011.

## ■9 群-6 編-5 章

### 5-3 自由空間光学系分散補償デバイス

(執筆者：磯野秀樹) [2011 年 11 月 受領]

#### 5-3-1 自由空間光学系分散補償デバイス

波長分散補償を実現する手段としてグレーティングやエタロンなどの空間波長分散素子を利用した自由空間光学系分散補償デバイスがある。一般的にグレーティングやエタロンの波長分散角度特性には限界があるため、WDM 伝送システムで必要とされる波長分散補償量を得るためにはデバイス形状が大きくなってしまおうという課題があった。

1996 年に富士通研究所により VIPA (Virtually Imaged Phased Array) と呼ぶグレーティングに比べ数百倍の波長分散角度特性が得られる素子が発案され<sup>1)</sup>、その後この VIPA 素子を用いた波長分散補償デバイス<sup>2)3)</sup>が市場で実用化されたため本節で詳細に取り上げる。

ほかに、市場で実用化されているデバイスとしては、必要とされる波長分散補償量を得るためにエタロンを複数枚カスケードに接続した構成のデバイスが挙げられ、製品化されている。

#### 5-3-2 VIPA 分散補償の原理

図 3・1、図 3・2 に VIPA 板の構成、VIPA 分散補償器の外観写真を示す。VIPA 板は、表面に透過率 98%以上の誘電体多層膜フィルタ、裏面に全反射膜を有する平行ガラス薄板であり、全反射膜のエッジ部へ光ファイバから出射した入力光を集光して入射することにより、図中に示す多重反射を発生させ光の干渉効果で VIPA 板の前方向へ波長分散を生じさせる機能を有する。多重反射により生じた虚像 (Virtual Image) を考えると、段差がほぼ VIPA 薄板の厚さに相当するグレーティングと同じ機能が得られることになり、通常のグレーティングの数百倍の波長角度分散が得られることが分かる。図の入射角では短波長の信号ほど上方に向かい、長波長の信号ほど下方に向かう波長角度分散が生じる。

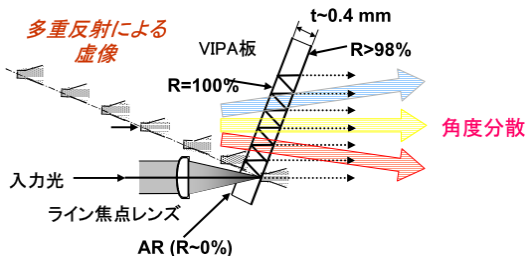


図 3・1 VIPA 板の構成



図 3・2 VIPA 分散補償器

図 3・3 左図に示すように VIPA 板の前方に適切な凸面全反射ミラーを置くと図中に示す光路パスを通り入射ファイバへ信号が戻る。また同右図に示すように適切な凹面全反射ミラーを置くと図中に示す光路パスを通り入射ファイバへ信号が戻る。図 3・3 左図の場合、短波長の信号ほど長い光路パスを通るため入射ファイバへ戻った時点でより大きな遅延が生じる。これは負の波長分散補償が付与されたことを示す。逆に図 3・3 右図の場合、長波長の信号ほど長い光路パ



スを通るため入射ファイバへ戻った時点でより大きな遅延が生じる。これは正の波長分散補償が付与されたことを示す。

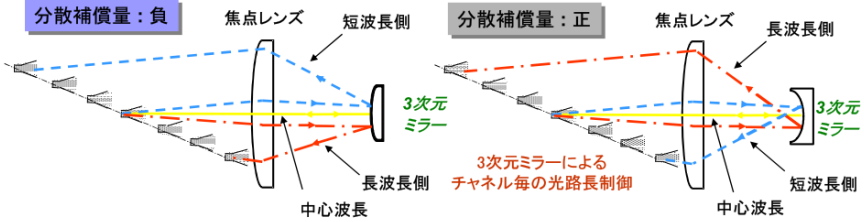


図 3・3 反射ミラーの種類と分散特性

実用デバイスではこの全光路パスでの損失を最小にするため、入射ファイバ端にはシリンドリカルレンズ（一方向球面レンズ）を用い、また VIPA 板、全反射ミラーなどは最適なパラメータで設計されている。

ここで、全反射ミラー上での入射信号の像は図 3・4 上図に示した X 軸に垂直な方向の直線であることに留意すると、X 軸方向の各座標で反射ミラーの曲率が異なる特殊ミラーを考えると、像が形成される X 軸の座標点でのミラーの曲率により異なる波長分散量を付与することが可能となる。像が形成される位置は前方の光学系により決定するため、前記特殊ミラーをステッピングモータ上に設置し X 軸方向に可動できる構造とすれば分散補償量は任意に可変できることになる。

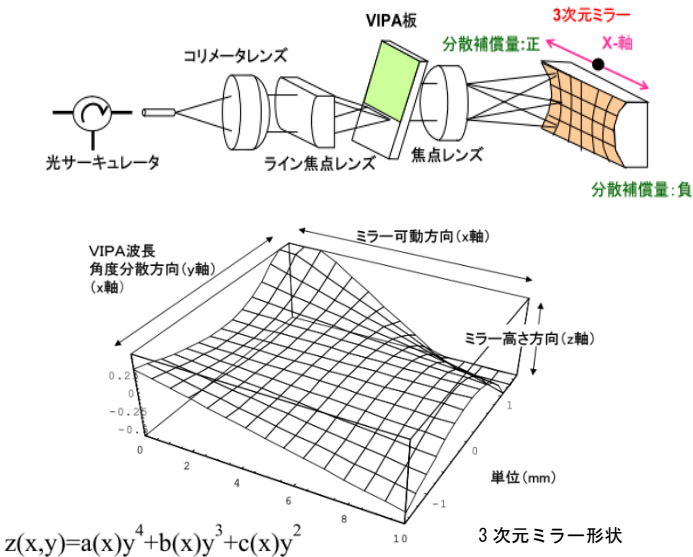


図 3・4 3次元ミラーの形状と VIPA デバイスの構成

実用システムでは負～正まで連続的に分散補償量を変化させるデバイスが必要なため、前記特殊ミラーは図3・4下図に示すように凹面から凸面に連続的に曲面が変更する3次元曲面ミラーになっている。このミラーの曲面関数は光路解析により簡単に求めることができ、3次元に精密加工した原版の曲面を転写する工業的手法で量産化することが可能である。

### 5-3-3 VIPA 分散補償の特性

VIPA 分散補償器の特性例 (図3・5; 10 G 波長分散可変特性, 図3・6; 挿入損失及び波長分散特性) を示す。分散補償量は必要とされる信号波長の通過帯域幅とトレードオフの関係があり、40 G システムで  $-800 \sim +800$  ps/nm 程度, 10 G システムで  $-1500 \sim +1500$  ps/nm 程度の変量を持つデバイスが製品化されている<sup>4)</sup>。

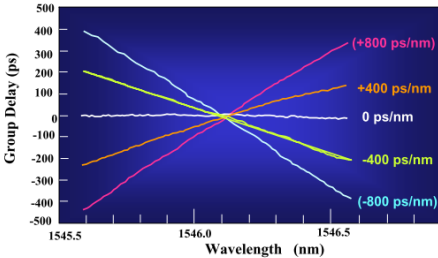


図3・5 10 G 波長分散可変特性

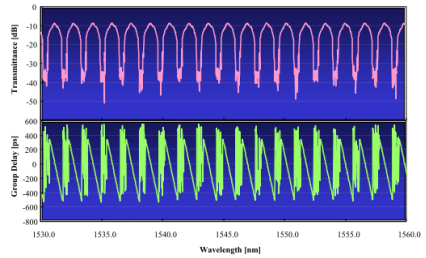


図3・6 挿入損失及び波長分散特性

### 5-3-4 VIPA 分散補償のシステム適用例

VIPA 分散補償器を 40 Gb/s システムで適用した例<sup>5),6)</sup> を図3・7に示す。40 b/s システムでは

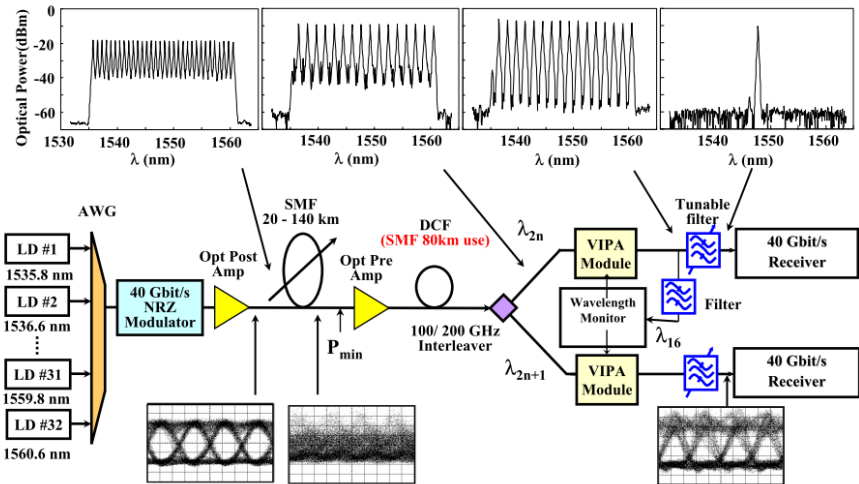
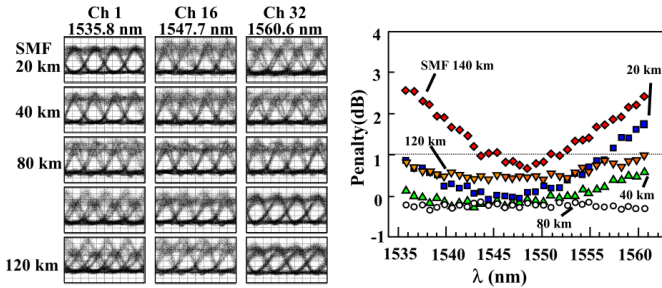


図3・7 (その1) 40 Gbps×32 波長一括自動分散補償実験



140 km **Supporting SMF 40 - 120 km transmission span**  
(VIPA Dispersion compensation range : -650 to +650 ps/nm)

図 3・7 (その 2) 40 Gbps×32 波長一括自動分散補償実験

光線路の敷設環境（温度・湿度など）の変化により波長分散量の経時変動予測され、NRZ 変調方式でも波長分散トレランス 100 ps/nm 以下が必要となり分散補償器が必要である。図 3・7 に 40 Gbps X 32 波のシステム実験例を示す。図中で Interleaver が使用されているのは VIPA の透過帯域を確保するために 200 GHz スペースング VIPA が使用されているためである。図 3・7(その 2)は実際に受信端でパワーペナルティを測定した結果であるが、40~120 km のシングルモードファイバ伝送路に対し、受信端において VIPA による多波長一括補償によりペナルティ 1 dB 以下の良好な伝送特性が実現可能なことを示している。

#### ■参考文献

- 1) M. Shirasaki : "Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer," Optics Lett, vol.21, no.5, pp.366-368, 1996.
- 2) M. Shirasaki, H. Isono, and S. Cao : "Dispersion compensation Using The Virtually Imaged Phase Array," Proc. APCC/OECC'99.
- 3) M. Shirasaki and S. Cao : "Compensation of Chromatic dispersion and dispersion slope using a virtually imaged phased array,"
- 4) 磯野 : "分散補償デバイスの現状と展望," レーザ研究, 第 30 巻, 第 10 号, pp.593-597.
- 5) H. Ooi, T. Takahara, G. Ishikawa, S. Wakana, Y. Kawahata, H. Isono, and N. Mitamura : "40-Gbit/s WDM Automatic Dispersion Compensator with Virtually Imaged Phased Array (VIPA) Variable Dispersion Compensators," IEICE. Trans. Commun., vol.E85-B, no.2, pp.463-469, 2002.
- 6) M. Shirasaki, Y. Kawahata, S. Cao, H. Doi, N. Mitamura, H. Isono, G. Ishikawa, G. Barnarossa, C. Yung, and C. Lin : "Variable Dispersion Compensator using the Virtually Imaged Phased Array (VIPA) for 40G-bit/s WDM Transmission system," Tech Digest, ECOC 2000, PD 2.3.

## ■9 群-6 編-5 章

### 5-4 ファイバブラッググレーティング

(執筆者：若林信一) [2011年10月 受領]

ファイバブラッググレーティング (FBG : Fiber Bragg Grating) は、光ファイバのコア中に周期的屈折率変化によるグレーティング (回折格子) を形成し、その周期に応じた波長 (ブラッグ波長 :  $\lambda_B$ ) を反射する狭帯域の光学フィルタを基本とするデバイスである。グレーティングに変調を加えることや、外部から特性を制御する機構を付加することで、新しい機能創造、従来機能の伸長、小型化や低コスト化による代替などを図ることができる<sup>1)</sup>。

FBG の概略構造を図 4・1 に示す。ブラッグ波長は伝搬モードの実効屈折率とグレーティング周期によって決定されるが、反射率 (透過率) はグレーティングの層数や屈折率変化量に依存する。FBG は光ファイバ中へグレーティング構造を形成するため、光ファイバとの接続が本質的に低損失で行えること、取り扱いが容易であること、光ファイバを利用する装置との組合せが容易なことなどが特徴である。

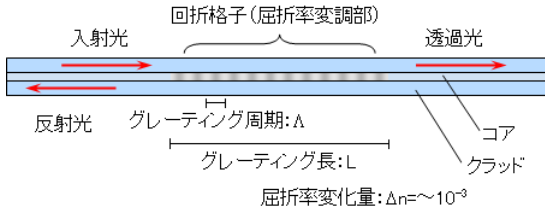


図 4・1 ファイバブラッググレーティングの概略構造

FBG は周期構造の違いにより、①単一周周期 FBG、②チャープ FBG、③その他 (サンプル型 FBG やスラント型 FBG など<sup>2),3)</sup>) の 3 種類に分類され、反射率や帯域である光学特性は屈折率変化量、グレーティング周期、グレーティング長などのパラメータで決定される。

グレーティングの形成には、ゲルマニウムが添加されたコアを有する光ファイバに波長 240 nm 付近の紫外光を照射することで屈折率が増加する現象を利用する。この紫外線誘起屈折率変化のメカニズムは完全に解明されていないが、Ge-Si 結合欠陥が紫外光エネルギーで生じ、新たな吸収帯による吸収スペクトル変化によると言われている<sup>4),6)</sup>。また、高圧水素充填により光ファイバの紫外光に対する感光性が飛躍的に増大することが発見され、通常の光ファイバでも  $10^{-3}$  以上の大きな屈折率変化が容易に得られるようになった<sup>7)</sup>。

FBG の作製には、紫外線の干渉パターンを光ファイバ側面から照射する方法が用いられ、二光束干渉法と位相マスク法が代表的な方法である<sup>8)</sup>。紫外光源としては、KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザー (波長 248 nm) やアルゴンイオンレーザーの第 2 次高調波 (波長 244 nm) が用いられている。

FBG では反射特性におけるブラッグ波長の両側に現れるサイドローブやリップルを抑圧する特性が要求されるため、作製する際にアポダイズという手法が用いられる。ファイバの長手方向に均一な屈折率分布を形成すると、その反射スペクトルではブラッグ波長の両側にサイドローブが現れ、所望のアイソレーションが得られずフィルタとしての特性を阻害する。それを

回避するため、屈折率の包絡線関数として Gauss 関数や tanh 関数などを用いて、有効屈折率がファイバの長軸方向で均一となるようなアポダイズを施すことにより、反射スペクトルのサイドローブが小さくなり、更に、リップルを小さくすることができる<sup>9),10)</sup>。なお、アポダイズ手法の導入や長尺グレーティングの製作には光学系に工夫が必要である。

分散補償には、チャープ FBG (CFBG : Chirped Fiber Bragg Grating) と呼ばれる、グレーティング周期をファイバの長手方向に連続的に変化させた構造が使用される。

チャープ FBG 設計法として、分散とチャープ量、帯域幅などとの関係を以下に示す。チャープ FBG の分散  $D$  [ps/nm] は、群遅延  $\tau$  [ps]、波長  $\lambda$  [nm] に対して、 $D = d\tau/d\lambda$  で与えられる。また、FBG のチャープ量を  $ch$  とすると、分散とチャープ量との関係は  $D = 1/(c \cdot ch)$  で与えられる。チャープ量とは単位長さ当たりのグレーティング周期の変化量であり、 $c$  は真空中の光速を示す。すなわち、あるチャープ量でグレーティング周期を連続的に変化させることにより、所望の分散を設定することができる。なお、実際のチャープ FBG 設計においては、分散値とともに帯域幅を考慮する必要があり、帯域幅はグレーティング長と (屈折率で換算された) チャープ量との積で与えられる。

チャープ FBG を用いた分散補償機能と構成を図 4・2 に示す。通常のシングルモードファイバは 1.55  $\mu\text{m}$  帯の使用波長において約 17 ps/nm/km の分散を有するため、伝送距離に応じて存在する分散量をキャンセルするようにチャープ FBG の分散量が設計される。例えば 100 km 伝送の場合、分散は約 170 ps/nm 存在するため、チャープ FBG には -170 ps/nm の分散値が必要となる。光ファイバに入射された光パルスがある距離を伝送すると、光ファイバの分散によってパルス幅は広がる。入射時点では強度・位相が揃って短パルスを形成していたものが、伝送後には光パルス前縁には波長の短い成分が、また光パルス後縁には波長の長い成分が存在するようになる。この広がった光パルスを元に戻すためには、光ファイバの持つ分散とは逆の効果を与えればよく、波長の短い成分を遠方で反射させ、波長の長い成分を近方で反射させることが必要になる。チャープ FBG を用いたデバイス構成としては、チャープ FBG はグレーティング周期の大きい側をサーキュレータ側に接続すれば、光ファイバの分散値とは逆の分散値を付与させることができ、広がった光パルスを元に戻すことができる。

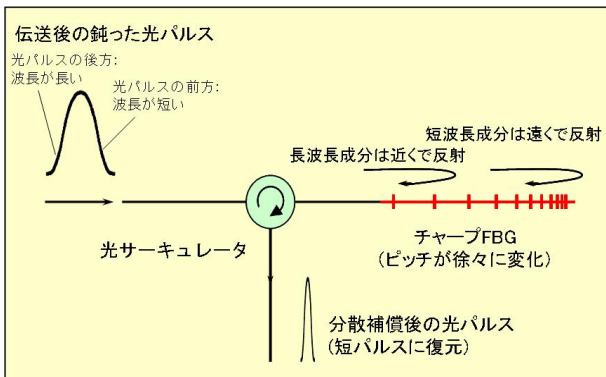


図 4・2 チャープ FBG を用いた分散補償機能と構成

FBG を分散補償に適用する場合、群遅延特性の反射帯域内での変動成分、すなわち群遅延リップルが反射信号の波形を歪ませる要因となり、高ビットレートのデジタル伝送におけるビットエラーの増大やアナログ伝送システムにおける歪みやノイズ成分の原因となることが予想される。FBG は分散補償ファイバと比べれば極めて短い距離で分散補償を行うこともあり、群遅延リップルをゼロにすることは困難であるため、如何にリップルを抑制・制御した特性を得られるかがシステムにおける特性向上のポイントとなる。

ファイバ伝送路には分散以外に分散スロープなどの高次の分散も存在する。高次分散の大きさは極めて微小であるため、伝送特性に影響を及ぼすことは少ないが、例えば伝送速度が 100 Gb/s を越える超高速パルスを扱うような場合には、高次分散を考慮するとともに、分散や高次分散の温度依存性なども考慮する必要がある。超高速の光通信システムにおいては、光ファイバ伝送路全体を高次分散まで含めて厳密に補償する技術、更に、温度変化などに対応する可変分散補償技術<sup>11)~13)</sup>を含めた分散マネジメント技術が求められる。

#### ■参考文献

- 1) 例えば, K.O. Hill: “ブラッググレーティング・ファイバデバイス,” 月刊オプトロニクス, pp.135-141, 1995.
- 2) 山下真司: “光ファイバー型デバイスの現状と展望,” 応用物理, vol.73, pp.1385-1395, 2004.
- 3) 奥出 聡, 和田 朗: “ファイバグレーティング技術とその動向,” 電子情報通信学会論文誌, vol.83-c, pp.1060-1068, 2000.
- 4) P. Bernardin and N. W. Lawandy: “Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optical fibers,” OPTICS COMMUNICATIONS, vol.79, pp.194-199, 1990.
- 5) D.P. Hand and P.S.J. Russell: “Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers,” Optics Lett., vol.15, pp.102-104, 1990.
- 6) 井上 享: “ファイバグレーティング,” レーザー研究, vol.23, pp.68-77, 1995.
- 7) P.J. Lemaire, R.M. Atkins, V. Mizrahi, and W.A. Reed: “High pressure H2 Loading as a UV photosensitivity in GeO2 doped optical fibers,” Electron. Lett., vol.29, pp.1191-1193, 1993.
- 8) 佐藤 登: “IT 時代を支える光ファイバ技術,” 電子情報通信学会, p.32, 2001.
- 9) D. Pastor, J. Capmany, D. Ortega, V. Tatay, and J. Marti: “Design of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Dispersion Compensation,” J. Lightwave Technol., vol.14, pp.2581-2588, 1996.
- 10) K. Ennser, M.N. Zervas and R.I. Laming: “Optimization of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Optical Communications,” IEEE J. Quantum Electron., vol.34, pp.770-778, 1998.
- 11) J.A. Rogers, B.J. Eggleton, and J.R. Pedrazzani: “Distributed on-fiber thin film heaters for Bragg gratings with adjustable chirp,” Appl. Phys. Lett., vol.74, pp.3131-3133, 1999.
- 12) T. Inui, T. Komukai, and M. Nakazawa: “A wavelength-tunable dispersion equalizer using a nonlinearly chirped fiber Bragg grating pair mounted on multilayer piezoelectric transducers,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.12, pp.1668-1670, 2000.
- 13) S. Wakabayashi, A. Baba, H. Moriya, X. Wang, T. Hasegawa, and A. Suzuki: “Tunable dispersion and dispersion slope compensator based on two twin chirped FBGs with temperature gradient for 160 Gbit/s transmission,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, pp.1100-1105, 2004.

## ■9 群-6 編-5 章

### 5-5 偏波分散補償技術

(執筆著者：松本正行) [2012年1月 受領]

ファイバ中の光の伝搬特性が光電界の偏波方向に依存することから生ずる信号波形歪みを偏波モード分散 (PMD : Polarization-Mode Dispersion) と呼ぶ。PMD 現象の解明と定量的な評価及びその補償方法について、1980 年代後半から多くの研究が行われてきた。特に、チャンネル当たりの伝送速度が 40 Gbit/s の強度変調伝送システムの導入が検討された 2000 年前後には、PMD がもたらすシステム不稼働率の見積りや様々な PMD 補償方式について活発な議論が展開された。

本稿では、PMD の概要、主要な PMD 補償方式、及びデジタルコヒーレント伝送における PMD 補償について述べる。

#### 5-5-1 PMD の概要

複屈折ファイバにおいて、2 つの偏波方向の導波モードの伝搬定数 ( $\beta_x$  及び  $\beta_y$  とする) が異なる場合、すなわち、 $\beta_x \neq \beta_y$  の場合、一般に偏波状態は伝送距離とともに変化する。更に 2 つの導波モードの群速度が異なると、すなわち、 $d\beta_x/d\omega \neq d\beta_y/d\omega$  の場合、信号を構成する  $x$  偏波成分と  $y$  偏波成分の包絡線が時間ずれを起こすために波形歪みが生ずる。この現象を偏波モード分散 (PMD) と呼ぶ。

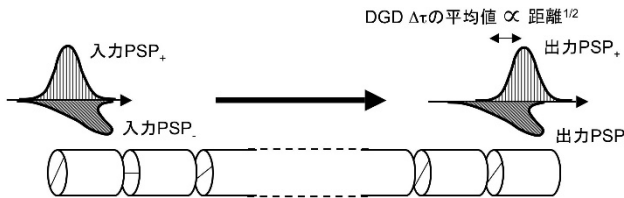


図 5・1 一定の複屈折を持たない偏波非保持ファイバを伝わる光パルス

通常の伝送用ファイバは決まった複屈折を持たないが、大きさと方向がランダムに変化する意図しない微小な複屈折を持つ。このようなファイバは、図 5・1 に示すように固有軸方向がランダムに回転する短い複屈折ファイバの連続接続によってモデル化される。ファイバ全長が  $n$  本の複屈折ファイバ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 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し、その結果、出力波形が歪む。このようなファイバにおいても、狭い周波数範囲に限れば、入力パルスの波形が保たれる互いに直交する 2 つの偏波状態が存在する。これらの偏波状態は主要偏波状態 (PSP : Principal State of Polarization) と呼ばれる。PMD の大きさは、2 つの PSP 間の群遅延時間差 (DGD : Differential Group Delay) によって定量化される。偏波非保持ファイバにおいては、図 5・1 の連続接続における小区間の複屈折固有軸の方向は応力の付加や温度の変化によってランダムに変化し、それに応じて PSP や DGD も不規則に変化する。十分長いファイバにおいては DGD の統計はマクスウェル分布に従い、DGD の平均値は距離の平方根  $\sqrt{z}$  に比例する。その比例係数は偏波モード分散パラメータ  $D_p$  と呼ばれ、伝送用ファイバの PMD の大きさを与える指標となる。古いフ

ファイバでは  $D_p$  は  $1 \text{ ps/km}^{1/2}$  を超えるものもあるが、2000 年前後以降に製造・敷設されたファイバの  $D_p$  は  $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$  程度以下であることが知られている。

### 5-5-2 主な PMD 補償方式<sup>2)</sup>

#### (1) PSP 伝送方式

5-5-1 項で述べたように、非偏波保持のファイバであっても偏波状態の直交性が保たれる 2 つの PSP が存在する。その内の 1 つの PSP だけを使えば PMD による歪みが生じない伝送を行うことができる。そのための伝送系の概略を図 5・2(a)に示す。送信機からの光信号の偏波状態をファイバの PSP に一致させるためにファイバ入力端に偏波コントローラ (PC) が置かれ、受信端における波形歪みが最小になるように PC が制御される。波形歪みのモニタとして、偏光度や検波信号に含まれる特定の周波数 (例えば  $0.5/T$  や  $0.25/T$  などの周波数。ただし、 $T$  はシンボル時間) の成分などが用いられる。この方式では、PC を最適な状態に設定するために受信端から送信端へモニタ信号をフィードバックする必要があるため、高速な適応制御が困難である。また、ファイバの PSP が信号スペクトル帯域内で変化する場合 (高次の PMD が顕著な場合) はこの方式による PMD 補償の有効性が低下する。

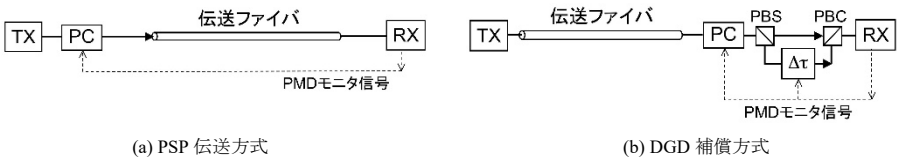


図 5・2 主な PMD 補償方式

#### (2) DGD 補償方式

受信端において 2 つの PSP 成分を分離し、伝送ファイバの DGD と等量逆符号の群遅延時間差を与えた後に再合成することによって伝送路の DGD の合計をゼロとすることができる。この PMD 補償方式の概略を図 5・2(b)に示す。伝送ファイバの出力 PSP を偏波ビームスプリッタ (PBS : Polarization Beam Splitter) の固有偏波に一致させるために伝送ファイバ出力に PC が置かれる。図 5・2(a)と同様に、補償後の波形歪みをモニタしながら PC と遅延時間差  $\Delta\tau$  を制御する。 $\Delta\tau$  を固定した場合にもある程度の補償効果を得ることができる。この構成においても、伝送ファイバと補償器からなる系全体の PSP が入力光信号の偏波状態と一致するように補償器を働かせることも可能である。また、PC と DGD 付与の組合せを多段とすることによって高次 PMD を補償することも可能であるが、制御変数の数が増えると最適解を得るためのアルゴリズムが複雑になる。

### 5-5-3 デジタルコヒーレント伝送における PMD 補償

大容量伝送システムにおいては、2005 年ころから高速デジタル信号処理 (DSP : Digital Signal Processing) を用いたコヒーレント伝送方式 (デジタルコヒーレント伝送方式) が注目を集め、最近では、多値振幅/位相変調や偏波分割多重を用いて高い周波数利用効率の伝送を行うためには、この伝送方式の採用が必須であると考えられるようになっている。

単一モード光ファイバ伝送路における入出力電界の複素振幅間関係は、非線形効果を無視



できる場合、周波数領域において

$$\begin{bmatrix} E_{x,\text{out}}(\omega) \\ E_{y,\text{out}}(\omega) \end{bmatrix} = F(\omega) \mathbf{J} \begin{bmatrix} E_{x,\text{in}}(\omega) \\ E_{y,\text{in}}(\omega) \end{bmatrix}, \quad \text{ただし, } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx}(\omega) & J_{xy}(\omega) \\ J_{yx}(\omega) & J_{yy}(\omega) \end{bmatrix}$$

と書ける．ここで  $F(\omega)$  は波長分散を表す伝達関数であり， $\mathbf{J}$  は偏波回転及び PMD の効果を表す行列 (Jones 行列) である．また， $\begin{bmatrix} E_{x,j}(\omega) \\ E_{y,j}(\omega) \end{bmatrix}^{\dagger}$  ( $j = \text{in}$  または  $\text{out}$ ) は水平偏波及び垂直

偏波の電界振幅のフーリエ変換からなるベクトルである． $E_{x,\text{in}}(\omega)$  と  $E_{y,\text{in}}(\omega)$  は独立な信号で

あり，偏波分割多重された光信号がファイバに入力されることを想定している．位相及び偏波ダイバーシティコヒーレント受信を行う場合は，複素電界振幅がそのまま電気信号に変換されるため，電気信号領域において， $\mathbf{PJ}$  ができるだけ単位行列に一致するような行列

$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{xx}(\omega) & P_{xy}(\omega) \\ P_{yx}(\omega) & P_{yy}(\omega) \end{bmatrix}$  を信号に乗算することで，送信号  $\begin{bmatrix} E_{x,\text{in}}(\omega) \\ E_{y,\text{in}}(\omega) \end{bmatrix}^{\dagger}$  を復元すること

ができる． $\mathbf{P}$  の乗算を行うための回路構成を図 5・3 に示す．なお， $\mathbf{P}$  の各要素は有限インパルス応答 (FIR : Finite Impulse Response) フィルタによって実現される<sup>3)</sup>．信号をアナログ-デジタル変換してデジタル処理をする場合，FIR フィルタのタップ係数の更新を容易に行うことができるため，時間的に変化する PMD を適応的に補償することができる．FIR フィルタのタップ係数の算出のためには，Constant Modulus Algorithm (CMA) などのアルゴリズムがよく用いられる．

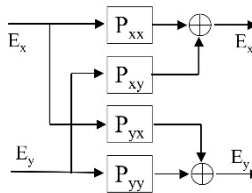


図 5・3 DSP による偏波回転及び PMD 補償

このように，デジタルコヒーレント伝送においては，実装できる DSP の回路規模からの制約があるものの，PMD などの線形な波形劣化はほぼ完全に補償できる．むしろ，分散補償された伝送路においては，ある程度の PMD が存在する場合の方が，異なる波長チャンネル間の非線形相互作用による偏波散乱の程度が小さくなるため，伝送特性が向上することが報告されている．

#### ■参考文献

- 1) H. Kogelnik, R.M. Jospon, and L.E. Nelson: "Polarization-mode dispersion," in Optical Fiber Telecommunications, IV B, I. Kaminow and T. Li Eds. : Academic Press, pp.725-861, 2002.
- 2) H. Sunnerud, C. Xie, M. Karlsson, R. Samuelsson, and P.A. Andrekson : "A comparison between different PMD compensation techniques," J. Lightwave Technol., vol.20, no.3, pp.368-378, 2002.
- 3) S.J. Savory : "Digital filters for coherent optical receivers," Opt. Exp., vol.16, no.2, pp.804-817, 2008.