

高精度DOP測定器の開発

Development of High Precision DOP Measuring Instrument

畑野達也*

Tatsuya Hatano

高木武史*

Takeshi Takagi

池田和浩*

Kazuhiro Ikeda

松浦 寛*

Hiroshi Matsuura

概 要 光デジタル通信における高速・大容量化のニーズにこたえるために、高速デジタル伝送技術が研究されているが、特に40 Gbpsの伝送速度においては、偏波モード分散（Polarization Mode Dispersion; PMD）の影響によって伝送特性が悪化するため、PMD補償器が必要になってくると言われている。一般にPMDの量と偏光度（Degree of Polarization; DOP）には相関があることが知られていることから、信号光のDOPをモニタすることによってPMD補償が可能になる。そこで、我々はPMD補償器用のPMDモニタを目的として低コストで小型パッケージされた高精度DOP測定器を開発した。本測定器の試作結果について述べる。

1. はじめに

光デジタル通信における高速・大容量化のニーズにこたえるために高速デジタル伝送技術が研究されているが、特に40 Gbit/sという伝送速度においては、従来の伝送速度ではあまり問題とされていなかった伝送路中で発生する偏波モード分散（Polarization Mode Dispersion; PMD）の影響によって伝送特性（Bit Error Rate, BER）が悪化するため、PMD補償器が必要であると言われる。PMDとは、シングルモード光ファイバのコアの楕円化、側圧や部分的な温度変化などによって、2つの直交する偏波モード間に群遅延差が生じるために起こる分散である。PMD補償器は、伝送路中で発生するPMDの影響を補償する装置であるが、そのためにはPMDの量をモニタしなければならない。一般にPMDの量とDOPとに相関があることから、PMDモニタとしてDOPモニタが有効であると考えられる。図1にPMD補償例を示す。

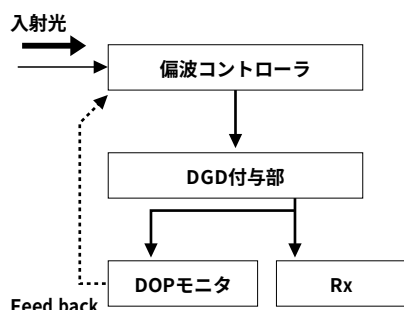


図1 PMD補償例
Example of PMD compensation

実際に、10 Gbit/sの伝送実験系において可変DGD（Differential Group Delay）を用いて、PMDを発生させそのときの信号光のDOPを測定した。10 Gbit/sの伝送速度では、隣り合うビットの時間間隔は100 psecであるが、その半分の50 psecのPMDを与えたときでも、DOPは80%程度とそれ程劣化しない。しかし、BERは大きく劣化したので、BER改善のためのPMD補償器のPMDモニタとして使用することを考えれば、DOPの高い状態（80%以上）において精度良くDOPを測定する必要がある。そこで我々は、PMD補償器用のPMDモニタを目的として小型、高性能、低コストなDOP測定器を開発したのでここに報告する。

2. 高精度DOP測定器

高精度DOP測定器は、入力された光の偏波状態を式（1）によって定義されるストークスパラメータ（ S_0, S_1, S_2, S_3 ）で表し、 S_1, S_2, S_3 を出力するものである。上記の4つストークスパラメータは、後で述べる構成から出力される4つの電流値（ $I_t, I_0, I_{45}, I_{q45}$ ）と式（2）によって計算し出力している。ここで、 $I_t, I_0, I_{45}, I_{q45}$ は、それぞれ本DOP測定器に入射される全体の光、入射光の4分岐光の1つが0度の偏光子を透過した光、4分岐光の1つが45°の偏光子を透過した光、4分岐光の1つが1/4波長板と45°の偏光子を透過した光を、フォトダイオードによって光電変換された電流である。ここに、0度の偏光子と45度の偏光子の結晶軸の相対角度は45度であり、基準角度の設定は任意である。つぎに、ポアンカレ球表示について説明する。すべての偏波状態を一座標系に表したもので、偏光状態の遷移が分かりやすいので用いられる（図2）。ポアンカレ球表示の直交基軸として、水平直線偏光成分を S_1 、45度直線偏光成分を S_2 、右円偏光成分を S_3 で定義している。

* ファイテルフォニクス研究所 光部品開発部

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle \\
 S_1 &= \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle \\
 S_2 &= \langle 2 \cdot E_x \cdot E_y \cdot \cos \delta \rangle \\
 S_3 &= \langle 2 \cdot E_x \cdot E_y \cdot \sin \delta \rangle
 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\delta = \Phi_y - \Phi_x$

S_0 ：全体強度 S_1 ：水平直線偏光成分

S_2 ：45度直線偏光成分 S_3 ：右円偏光成分

$$\begin{aligned}
 S_0 &= I_t \\
 S_1 &= 2 \cdot I_0 - I_t \\
 S_2 &= 2 \cdot I_{45} - I_t \\
 S_3 &= 2 \cdot I_{q45} - I_t
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$DOP = \{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2} / S_0\} \quad (3)$$

つぎに、高精度DOP測定器の構成を図3に示す。

大きく光学部と電気回路部に分かれている。光学部はファイバコリメータ、光スプリッタ、1/4波長板、偏光子、フォトダイオード(PD)から構成されていて、それらは、幅26 mm長さ70 mm高さ8 mmのきょう体に配置されて、モジュール化されている(図4)。

ストークスパラメータの定義から、4つの透過光強度を測定すればストークスパラメータを算出できる。ここで、図3に基づいて、光学部、電気回路部について説明する。入射光が、ファイバコリメータによって光スプリッタに入射されて、4つの分岐光となる。1番目の分岐光は、直接PDに受光されて電流 I_t を出力する。2番目の分岐光は、結晶軸の角度が0度の偏光子を透過してPDに受光されて電流 I_0 を出力する。3番目の分岐光は、結晶軸の角度が45度の偏光子を透過してPDに受光されて電流 I_{45} を出力する。4番目の分岐光は、1/4波長板、45度の偏光子を透過してPDに受光されて電流 I_{q45} を出力する。ここで、0度の偏光子の結晶軸に対して45度の偏光子の結晶軸は、

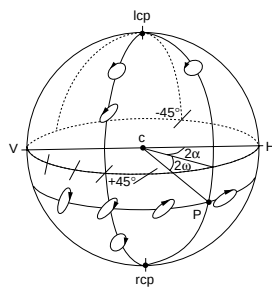


図2 ポアンカレ球表示
Poincare sphere

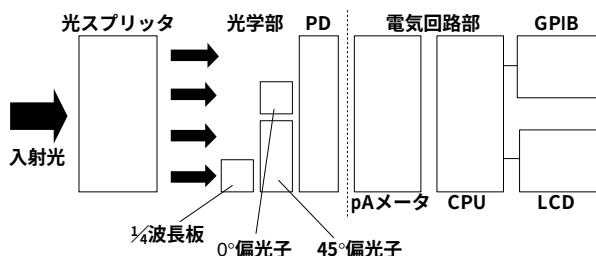


図3 高精度DOP測定器の構成図
Schematic diagram of high DOP measuring instrument

入射光の進行方向に対して垂直な面内で、45度回転している。1/4波長板の結晶軸は、0度の偏光子の結晶軸と一致している。以上の4つの出力電流値 I_t , I_0 , I_{45} , I_{q45} を電気回路部のpAメータによって測定して、CPU内で式(2), (3)による演算を行い、ストークスパラメータ, DOPを求め、GPIB通信, LCD表示によって出力している。

電気回路部は、主に32-bit CPU, EPROM部, GPIBコントローラ, 微小電流測定部(pAメータ部;測定チャンネル数4 ch, 最小分解能100 pA, 最大測定電流1 mA, 最大サンプリングレート1 msec)から構成されていて、それらは、幅182 mm長さ257 mmの基板上に配置されている。光学部のモジュールも小型化するために同一基板上に配置されている。光学部のモジュールを配置した基板は、図5のように電源, LCD, 各種設定SW等とともにケーシングされている。

3. 組み立て

本構成要素である光学部の組み立てにおいて、DOP精度に大きく影響がある要因に、光学部の構成部品の1/4波長板、0度、45度の偏光子の結晶軸の角度に対する配置の精度がある。1/4波長板の回転角度が設計からずれた場合についてのSOPとDOP精度への影響を、2個の45度の偏光子の結晶軸に角度ずれがなく、0度の偏光子と45度偏光子の結晶軸が10分ずれた場合についてシミュレーションを行った。結果を図6, 7に示す。また、0度の偏光子と45度の偏光子の結晶軸がずれた場合についてのSOPとDOP精度への影響を、2個の45度の偏光子の結晶軸に角度ずれがなく、1/4波長板の回転角度ずれが20分の場合についてシミュレーションを行った。結果を図8, 9に示す。

シミュレーション結果から、DOP精度 $\pm 1\%$ となるのは、1/4波長板の回転角度ずれが20分以内、偏光子の角度ずれが10分以内である必要があることが分かった。現在の配置方法は、1/4波長板と偏光子のホルダに対して、それぞれの部品形状に対して結晶軸の角度を合わせる方法である。



図4 ストークスアナライザモジュールの外観図
Appearance of Stokes analyzer module



図5 高精度DOP測定器の外観図
Appearance of high precision DOP measuring instrument

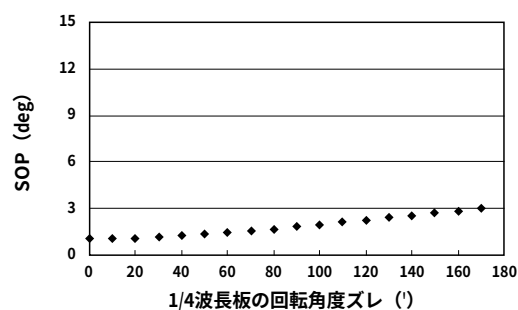


図6 シミュレーション結果1 (SOP)
Result of simulation on SOP (Case I)

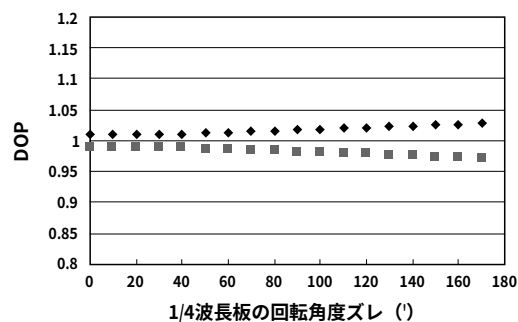


図7 シミュレーション結果1 (DOP)
Result of simulation on DOP (Case I)

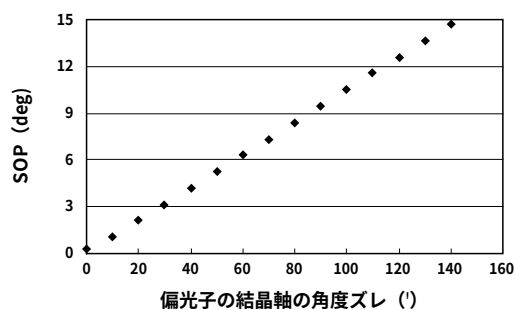


図8 シミュレーション結果2 (SOP)
Result of simulation on SOP (Case II)

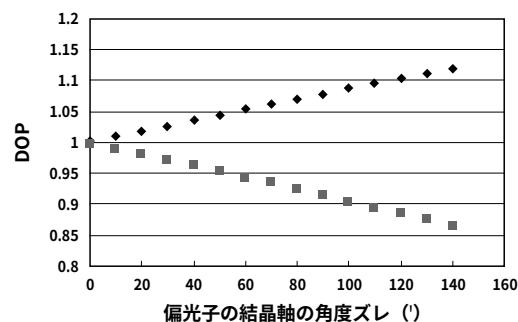


図9 シミュレーション結果2 (DOP)
Result of simulation on DOP (Case II)

4. 評価

ストークスパラメータの精度に関しては、図10に示す系で評価を行った。まず、方向を示すSOPに関してはストークスベクトルのある基準状態（1, 0, 0）から1/4波長板、1/2波長板を順次 θ_1 、 θ_2 回転させることで、波長板の回転角 θ_1 、 θ_2 から計算されるポアンカレ球上の回転角と、本DOP測定器で実測されるポアンカレ球でのSOPの回転角を比較した。大きさであるDOPに関しては、光源からの出射光（DOP=1）の偏波状態を、図11のようにポアンカレ球上を回転させた場合のDOPを測定して比較した。

図11に、図10に示した1/4波長板の回転角 θ_1 を0度、±10度、±20度、±30度、±40度、±45度に設定して、1/2波長板の回転角 θ_2 を10度ステップで0度から90度まで回転させたときの、DOP測定器で測定したストークスパラメータのポアンカレ球上での遷移を示している。（例えば、 θ_1 を+10度を設定して、 θ_2 を0度から90度まで回転させる。つぎに、 θ_1 を別の設定値にして同様に行う。）

本DOP測定器で測定したストークスパラメータの、1/4波長板と1/2波長板のそれぞれの結晶軸の角度 θ_1 、 θ_2 から求まるストークスの計算値に対する角度ズレは、+1.2～-2.0度であった。DOPの測定結果は、0.973～1.016であった。表1に、本DOP測定器の性能を示す。

5. 用途

本DOP測定器の用途例として、PMD測定を行った。

その測定系を図12に示す。波長可変光源、DUT、本DOP測定器、制御パソコンをつないで、図13のPMD測定プログラムで、ポアンカレ球法で測定した。ポアンカレ球法は、その球上

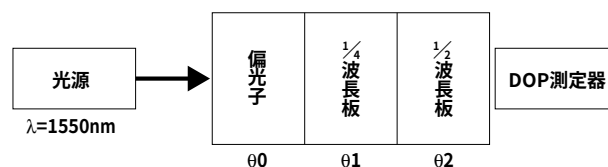


図10 評価測定系
Measurement system for evaluation

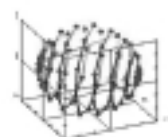


図11 測定したストークスパラメータの遷移
Changes of measured Stokes parameter

で、SOPの描く軌跡の円弧の1周を位相差360度とすることにより、PMDを求める方法である。ポアンカレ球上の任意の2点の波長と、それに対するストークスベクトルの回転角により、PMD $\Delta\tau$ は式(4)によって算出される。DUTには、PMF 9.5 mと50 mを使用した。

測定結果を図14、15、表2に示す。

$$\Delta\tau = (\Delta\Phi/360) \cdot (\lambda_n \cdot \lambda_{n+1} / C \cdot (\lambda_{n+1} - \lambda_n)) \quad (4)$$

ただし、

$\Delta\Phi$: 2波長に対するストークスベクトルのポアンカレ球上の回転角(°)

C : 光速度 (3.0×10^8 m/s)

λ_n : 光源波長

n : n番目の波長

表1 本DOP測定器の性能

Performance of developed DOP measuring instrument

測定波長	1480～1640 nm
入力パワー	-35～0 dBm
サンプリング時間	8 msec (typ)
DOP精度	±2.5%
SOP精度	±2 deg
I/F	GPIO
消費電力	7.5 W
電源	AC 100 V
外形寸法	210×99×350 mm
出力データ	ストークスパラメータ, DOP

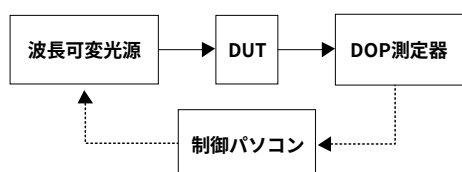
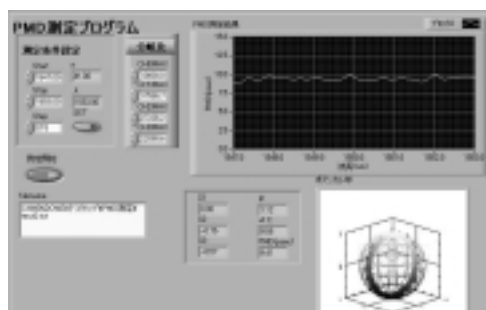
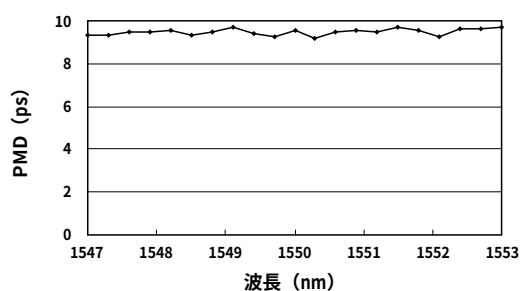
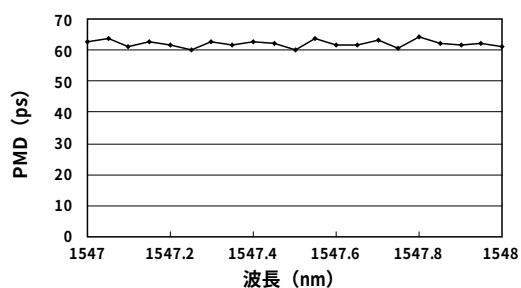
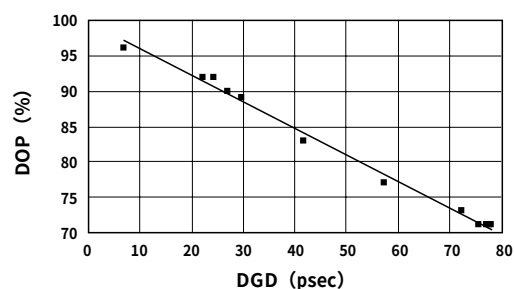
図12 PMD測定系
PMD measurement system図13 PMD測定プログラム
PMD measurement program図14 PMD測定結果 (PMF = 9.5 m)
Result of PMD measurement (PMF=9.5 m)図15 PMD測定結果 (PMF = 50 m)
Result of PMD measurement (PMF=50 m)

表2 PMD測定結果の比較

Comparison of measured value of PMD

DUT		PMD (ps)	
		古河製での測定	他社品での測定
PMF (9.5 m)	1回目	9.70	9.37
	2回目	9.66	9.46
PMF (50 m)	1回目	62.28	63.32
	2回目	62.20	63.45

図16 DGD量に対するDOPの変動
DGD versus changes of DOP図17 PMD補償器の外観
Appearance of PMD compensator

また、PMD補償システムのモニタとして、本DOP測定器を使用する用途がある。DGDに対するDOPの変動を測定した結果を図16に示す。測定系は、10 Gbpsの信号光を偏波コントローラ、可変DGDの順に入射させた後、本DOP測定器に受光させて測定した。DGDとDOPに相関があり、PMDモニタとしてPMD補償器に用途がある。図17に、PMD補償器の外観を示す。

入射光が、偏波コントローラ、PMF、カプラを介して、出力される。カプラによる分岐光をストークスアナライザモジュールに受光して、DOPをモニタして偏波コントローラにフィードバックをかける構成である。

6. おわりに

ファイバコリメータ、スプリッター、1/4波長板、偏光子、フォトダイオード (PD) から構成されるストークスアナライザモジュールと32-bit CPU、EPROM部、GPIOコントローラ、微小電流測定部等から構成される電気回路部を同一基板上に配置し一体化し、電源、LCD、設定SW等とともにケーシングを行い、小型、高精度、低コストな高精度DOP測定器を開発した。PMD補償器用のPMDモニタとして、需要が期待される。