

無限追尾型偏波制御器の開発

Arbitrary and Endless Polarization Controller

池田和浩*

Kazuhiro Ikeda

高木武史*

Takeshi Takagi

畑野達也*

Tatsuya Hatano

風味 創*

Hajime Kazami

味村 裕*

Yu Mimura

松浦 寛*

Hiroshi Matsuura

概要 近年の通信容量の増大にこたえるための大容量化技術として、高密度波長分割多重 (Dense-Wavelength Division Multiplexing: D-WDM) 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、PMD 補償器の検討が盛んに行われている。PMD 補償器を構成するデバイスとして、常に任意偏光を別の任意偏光に変換する無限追尾の偏波制御器が必須である。今回我々は光学特性に優れ、高い信頼性が期待できる可変ファラデー回転子を用いた無限追尾型偏波制御器を開発したので報告する。

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こたえるために、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) のより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 40 Gbit/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。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。

そこで近年 PMD の影響を補償する PMD 補償器の検討が盛んになされている^{1)~3)}。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 補償器においては、伝送路の分布的な複屈折の変化による偏光変化に追従するために偏波制御器が必須である^{1)~3)}。この偏光変化は伝送路の環境変化によって時間的にランダムであるため、補償状態を維持するためには偏波制御器があらゆる偏光変動に対し、連続的に飽和することなく追従する必要がある (本論文では無限追尾と呼ぶ)。特に、位相量可変デバイスを用いる場合には位相量の可変範囲が限られるために制御に注

意が必要であり、既に考察が与えられている^{4)~5)}。波長板の機械的回転や、それに準じた動作をするリチウムナイオベート (Lithium Niobate: LN) 導波路型偏波制御器⁶⁾は、位相量ではなく光学軸 (固有偏光軸) を回転させるため、飽和について注意を払う必要は無いが、前者は応答速度、後者は光学特性に難点がある。

位相量可変デバイスとしては、すべてファイバで構成でき、光学特性に優れたファイバスキューザがこれまで広く検討されている^{4)~5)}、ファイバに直接側圧を印加するため、インラインのデバイスとしては信頼性に難点があった。

そこで我々は光学特性に優れ、高い信頼性が期待できる可変ファラデー回転子を用いて無限追尾を考慮した偏波制御器を開発したので報告する。設計に際しては、可変ファラデー回転子の位相量可変範囲がファイバスキューザに比べて小さいため、この可変範囲で十分かどうかの議論、制御方法及び追尾の安定性についての議論、が必要である。しかし、これまでの議論^{4)~5)}では、ポアンカレ球上で特定の偏光変換に対して例示的になされているため、以上 2 つの議論は困難であった。今回我々は回転群の表現⁷⁾を用いて偏光変換それ自体を表現し、数学的に前記 2 つの議論を展開したので、その手法も合わせて報告する。

2. 可変ファラデー回転子による偏波制御器

偏波制御器を構成する光学デバイスを表 1 に大まかな特徴とともに列挙する。

LN は変調器にも用いられているように、サブ μ s オーダの高速動作が可能であるが、挿入損失や PDL が他に比べてかなり大きい。液晶は応答速度が ms オーダと遅いうえ、一般に信頼性に難点がある。また、ファイバスキューザは圧電素子により

* ファイナルフォトニクス研究所 光部品開発部

表 1 偏波制御器を構成する光学デバイス
Optical devices that compose a polarization controller

	Liquid Crystal	Fiber Squeezer	Lithium Niobate	Faraday Rotator
Response	△	○	◎	○
Reliability	△	△	○	○
Insertion loss	○	◎	△	○
PDL	○	○	△	○

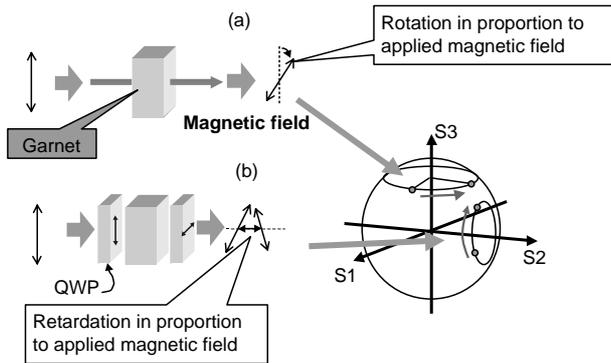


図 1 VFRの動作特性
Operation property of VFR

ファイバに直接側圧を印加するため、オールファイバ型で挿入損失が非常に小さいが、応力印加部分の信頼性の確保が問題である。

一方、可変ファラデー回転子 (Variable Faraday Rotator: VFR) は、応答速度は数百 μs と十分な速さであり、構造もガーネット結晶で構成されているため、挿入損失、PDL等の光学特性や信頼性もこれまでの受動モジュールと同程度の特性が得られ、他のデバイスに比べてバランスの取れた偏波制御器を構成できる。

図 1 に VFR の動作特性を示す。VFR は図 1(a) に示されているように、それ単体では偏光を回転させる、いわゆる可変円位相子であり、ポアンカレ球上では S_3 軸を回転軸とした回転の機能を持つが、これだけでは任意の偏光変換は不可能である。そこで、図 1(b) に示すように、VFR の前後に互いに光学軸が直交するように $1/4$ 波長板を配置することによって、直交する直線偏光間の位相差を可変にできる可変直線位相子を構成することができる。このことは、この構成のジョーンズマトリクスの固有ベクトルを解析すれば容易に理解できる。図 1(b) の光学軸配置による可変直線位相子はポアンカレ球上では S_2 軸を回転軸とした回転の機能となる。

これら可変円位相子と可変直線位相子を交互に多段に組み合わせることによって、任意の変換機能を有し、かつ無限追尾可能な偏波制御器を構成することができる。

なお、これらの位相の可変は、ガーネット結晶に印加する磁界を磁気回路によって変化させることによってなされており、現在用いている VFR の位相可変範囲は π 、ポアンカレ球上での回転角度で言うと 2π である。前記ファイバスクイーズを用いた偏波制御器の議論⁴⁾⁵⁾では 4π が必要とされており、VFR を用いる場合にはこの可変範囲で無限追尾可能か、その安定性は

どうか、の議論をしなければならない。その議論について次節で述べる。

3. 回転群パラメータによる偏光変換の解析方法

3.1 偏光変換のパラメータ空間による表現

光の偏光状態は完全偏光の場合、良く知られているようにポアンカレ球上の点として表現でき、偏光変換は点から点への経路と考えることができる。したがって、実際に光の通る経路を順にポアンカレ球上で軌跡として追って偏光変換を理解することは直感的で理解しやすいが、その軌跡は無限に存在するうえ、入射偏光状態に依存してしまう。偏波制御器のなす変換の構造を体系的に理解するためには、偏光変換をポアンカレ球上における点から点への回転変換と理解しなければならない。すなわち、偏波制御器はそのデバイスの可変パラメータ (位相や固有軸角度) によって張られる回転変換の集まりであり、これは数学的には回転群として理解されている⁷⁾。

このことは、偏光の計算に一般によく使われるジョーンズマトリクスが、回転群の 2 次元表現 (ユニタリマトリクス) そのものであることから確認できる。すなわち、ジョーンズマトリクスの一般形は、

$$U = \begin{bmatrix} a & b \\ -\bar{b} & \bar{a} \end{bmatrix} \quad \bar{a}a + \bar{b}b = |a|^2 + |b|^2 = 1 \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 a と b は複素数であるから、 $a = \kappa - iv$ 、 $b = -\mu - i\lambda$ とおいて整理すると、

$$U = \kappa \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - i\lambda \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} - i\mu \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} - iv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ = \kappa E - i\lambda S_1 - i\mu S_2 - iv S_3 \quad \kappa^2 + \lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 1 \quad (2)$$

となる。 S_1, S_2, S_3 はパウリのスピン行列である。

式 (2) から分かるように、あらゆる偏光変換はジョーンズマトリクスを構成する 4 つのパラメータ、 $\kappa, \lambda, \mu, \nu$ によって規定でき、これらのパラメータが持つ値の範囲、すなわち、部分群の大きさによって偏波制御器の機能が決まる。

上記 4 つのパラメータ、 $\kappa, \lambda, \mu, \nu$ とストークス空間上の回転との関係は次式で表される。

$$\kappa = \cos \frac{\omega}{2}, \lambda = \alpha \sin \frac{\omega}{2}, \mu = \beta \sin \frac{\omega}{2}, \nu = \gamma \sin \frac{\omega}{2} \quad (3)$$

なお、 (α, β, γ) は回転軸の方位、 ω は回転角度をそれぞれ表している。

偏波制御器の持つ部分群の範囲を視覚的に議論するために図 2 に示すパラメータ空間を導入する。すなわち、式 (2) で表されるあらゆる偏光変換を、 λ, μ, ν を基底とし、 κ の正負により場合分けされる 2 つの 3 次元空間で表現する。すると式 (3) から、すべての偏光変換はこれら 2 つの 3 次元空間にまたがる 2 つの球面とその内部の点によって表現することができる (球 S と S' は、表面でつながっている)。この表現は変換そのものの表現であるため、偏波制御器の偏光変換の構造を直接見ることができるうえ、入射偏光を気にすることなく議論できる。

このパラメータ空間を用いて、任意変換が可能か・追尾の安

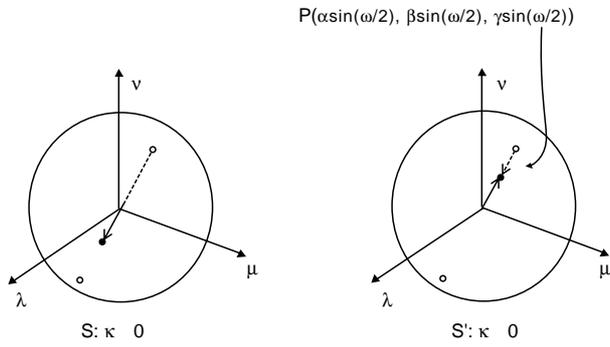


図2 パラメータ空間
Parameter space

定性はどうか、の議論を行うために、それらを満たすための条件を以下に導く。

3.2 任意変換の条件

まず1組の入射・出射偏光を考える。図3(a)にストークス空間上に入射偏光 S_{in} 、出射偏光 S_{out} を定義する。この S_{in} S_{out} を実現する回転変換は、 S_{in} と S_{out} の中面とポアンカレ球の交わる大円C上の方位を向いた回転軸 (α, β, γ) を持ち、 S_{in} S_{out} に必要な回転角度 ω をもつ変換すべてであることが分かる。これをパラメータ空間上に示すと図3(b)のようになる。

図3(b)から、 S_{in} S_{out} を実現する変換の集まりは、 S, S' にまたがる閉曲線 (S_{in} と S_{out} の中点の方位を長軸とする楕円) であることが分かる。結局この S_{in} S_{out} を実現するためには、偏波制御器の部分群が、この S_{in} S_{out} を表す楕円と少なくとも一点で交わればよい。

任意変換はあらゆる S_{in} S_{out} を実現する機能であるから、偏波制御器の部分群が、あらゆる楕円と少なくとも1点で交わることが任意変換可能かどうかの条件となる。

3.3 無限追尾の条件

無限追尾可能かどうかの議論をする前に、位相量の可変範囲の限られた位相量可変デバイスを用いて飽和を回避する制御方法について述べる。図4にその制御手順を示した。

まず、各位相量可変デバイスが光学固有軸を交互に直交するように配置され、各デバイスの位相差が可変幅内で制御されている。このうちの一つが可変幅の限界に達した場合、例えば図4のように最大位相差に達した場合、このデバイスはもはやこれ以上位相差を増やす方向には動作できない。したがって、このデバイスを通常の制御から外し、位相量を可変幅の中心方向へ“巻き戻し”(Unwinding) する必要がある。この巻き戻し動作も当然出射偏光状態に影響を与えるため、巻き戻しの量は小さくし、それによる偏光の変動分は他の位相量可変デバイスで補償しなければならない。すなわち、位相量可変デバイスの飽和が起こっても無限追尾可能であるためには、巻き戻しをするステージ以外の複数のステージで任意変換を実現できることが必要になる。

この点をパラメータ空間で考えると、偏波制御器を構成する各位相量可変デバイスの位相量を強制的に変えたとき、残りのデバイスによって作られる部分群が常にあらゆる楕円と交わり続けること(任意変換の条件を満たすこと)が条件となる。

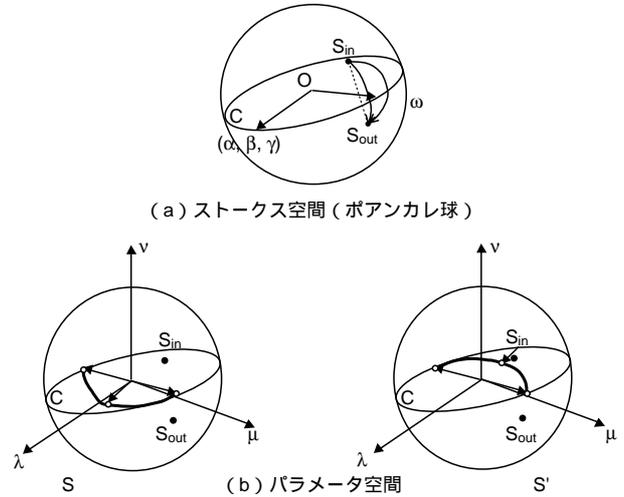


図3 1組の入出射偏光に対応する変換
Conversion corresponding to a pair of input and output polarization states. (a) Stokes space (Poincare sphere), (b) Parameter space

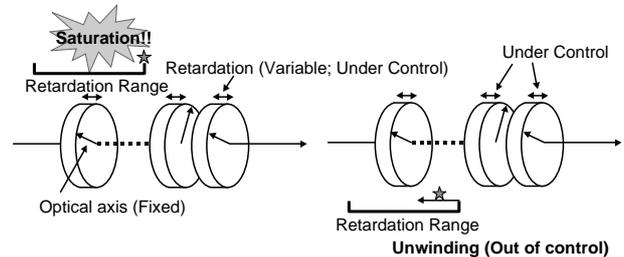


図4 無限追尾のための制御手順(巻き戻し)
Control procedure for endless operation (Unwinding)

4. 無限追尾型偏波制御器の構成

4.1 5段偏波制御器

2つの位相量可変デバイスによる構成では、1つが飽和すると残り1つになるため、明らかに無限追尾の条件を満たさない。それどころか、部分群をパラメータ空間上で表示すると、任意変換の条件すら満足しない。このため、任意変換を実現するには互いに固有軸が直交した、少なくとも3つの位相量可変デバイスが必要である。位相量の可変範囲が π のVFRを用いても同じことがパラメータ空間の解析で明らかになっている。また、反射を用いることによって2つのVFRで任意偏波制御器を構成することも可能である⁸⁾。

したがって、無限追尾の機能を有するためには、任意変換のための3つの位相量可変デバイスに、巻き戻し動作を補償するための位相量可変デバイスを追加して、4つ以上の位相量可変デバイスを有することが必要である。しかし4つでは、巻き戻し動作が複雑になるため、5つの位相量可変デバイスを備えることが良いとされている^{4), 5)}。まず、VFRを用いた5段の偏波制御器の構成について考察する。

VFRを用いた5段の偏波制御器の構成を図5に示す。各部分の動作特性は既に2.で説明したとおりである。

この場合、真中のVFRを除く4つのVFRは、それが巻き戻し動作をしても、残りの部分に連続する3つ以上のVFRが存在

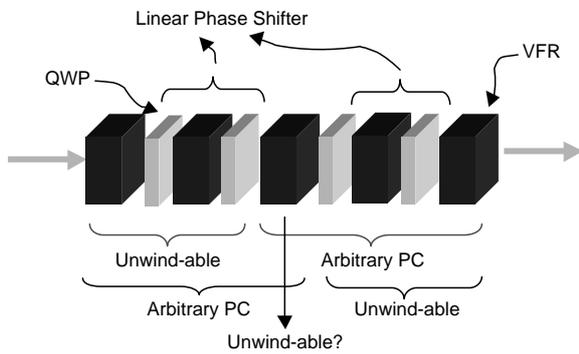


図5 VFRによる5段偏波制御器
Five stages polarization controller with VFR

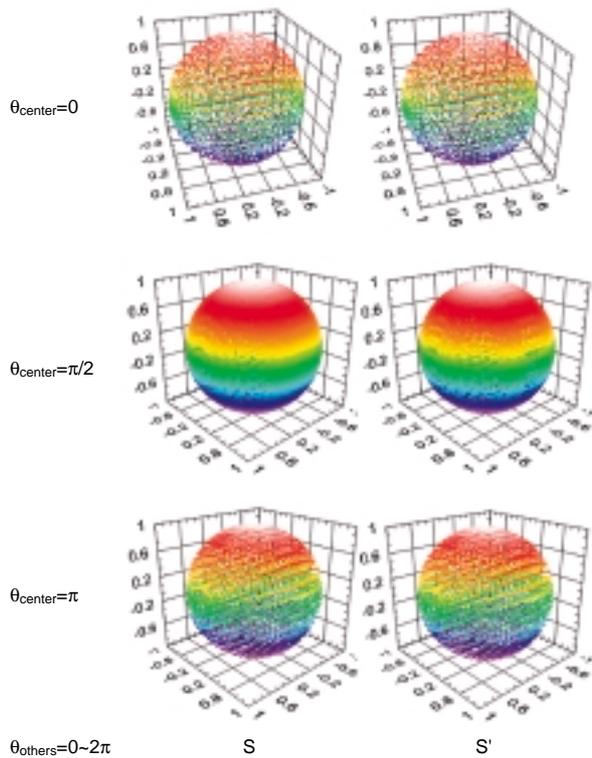


図6 真中のVFRの巻き戻し時の部分群
The subgroup during unwinding at center VFR

し任意変換可能であるので、巻き戻し可能であることが分かる。そこで、真中のVFRを巻き戻した場合に残りの4つのVFRが作る部分群の様子を計算すると、図6のようになる。図6は真中のVFRによるストークス空間上での回転角 θ_{center} を固定したときに残りの回転角 $0 \sim 2\pi$ で作られる部分群を示している。

図6から真中のVFRも巻き戻し可能であることが分かり、結局、図5の構成による偏波制御器はすべてのVFRが巻き戻し可能であって、無限追尾可能であることが分かる。

しかし、ここまでの議論では、巻き戻し可能なのは1つまでであり、2つ以上のVFRを同時に巻き戻すことはできない。したがって、この偏波制御器は、巻き戻しを行うVFRが必ず1つになるように制御する必要があり、これにより偏波制御器の安定性に制限を与えることになる。

すなわち、2つのVFRがほぼ同時に可変範囲の限界に到達した場合、1つしか巻き戻し動作が許されないため、それら2つ

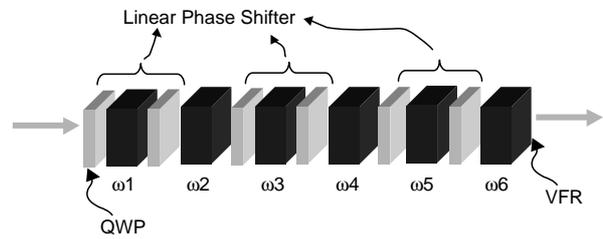


図7 VFRによる6段偏波制御器
Six stages polarization controller with VFR

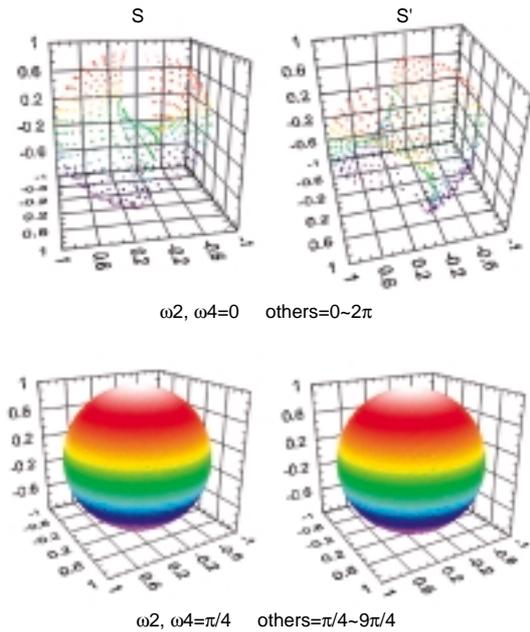


図8 2つのVFRが同時に飽和した場合（オフセット無・有）
The case of the simultaneous saturation of two VFRs

のVFRが巻き戻し動作を相互に引き渡しながらか可変範囲の端に留まることが起こり得る。このとき、偏波制御器がカバーできない変換が存在してしまい、追尾の安定性が損なわれる。

4.2 6段偏波制御器

安定性を向上させるためには、各位相量可変範囲を大きくし、可変範囲の限界に達する確率を下げるのがまず挙げられるが、これは現状のVFRでは磁気回路の設計上好ましくない。そこで、我々はVFRをもう1つ加えて6段の偏波制御器を構成することとした。5段の偏波制御器と同様に構成すると、図7のようになる。

各VFRによるストークス空間上での回転角を ω_i ($i = 1 \sim 6$) とする。このとき、同時に飽和したときに問題となる2つのVFRの組み合わせは幾つかあるが、そのうち、 ω_2 と ω_4 が最小位相量に達して飽和したときに、残りのVFRで作ることができる部分群を図8に示す。ただし、回転角可変範囲にオフセットをつけない場合とつけた場合 ($\pi/4$) の2通りを示してある。

図8によると、回転角可変範囲にオフセットがない場合は、任意変換の条件が満たされなくなり、特定の入出射偏光の変換に対して追尾できなくなる。このことは以下のように考えると、当然の結果である。すなわち、 ω_2 と ω_4 の回転角が0であると言うことは、何の変換もしないと言うことであるから、 $\omega_1 \sim$

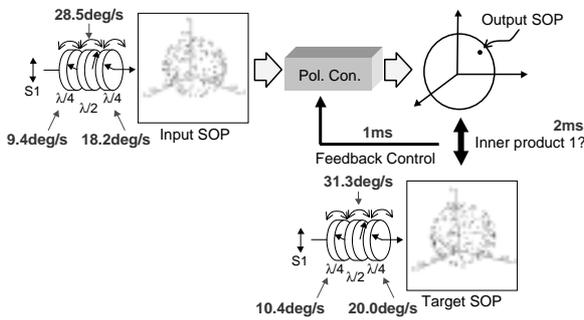


図9 シミュレーションの構成
Configuration of simulation

ω_5 までが同じ固有軸方位の5つの直線位相子の連結と等価となり、これは単一の直線位相子と同じであるから、結局2段の偏波制御器としてしか機能しない。したがって、任意変換が不可能になる。一方、オフセットをつけた場合にはパラメータ空間を満たしており、無限追尾の条件を満たす。以上のことは、2つのVFRの他の組み合わせでも確認されている。

結局、6段構成とし、更にオフセットをつけることによって2つのVFRが同時に飽和することを許容することにより、追尾の安定性が向上することが分かった。

4.3 シミュレーション

これまでの結論を確認するためにシミュレーションを行った。シミュレーションの構成を図9に示す。

入射偏光は1/4波長板・1/2波長板・1/4波長板の構成において、各波長板をそれぞれ9.4 deg/s・28.5 deg/s・18.2 deg/sの速度で回転させることによって、任意の偏光を作り出している。この入射偏光を図7の構成の偏波制御器に入射し、各VFRをシーケンス制御する。偏波制御器からの出力偏光を、入射偏光と同様にして作った（速度はそれぞれ10.4 deg/s・31.3 deg/s・20.0 deg/s）任意の目標偏光と比較し、その内積が1になるように偏波制御器にフィードバックをかける。これら内積の算出・比較及びフィードバック制御にかかる時間をそれぞれ2 ms, 1 msに設定した。

各VFRの1ステップは5.73 degとし、巻き戻しステップは1.15 degとした。また、巻き戻しをするVFRは1つとし、1つのVFRが巻き戻されているときに他のVFRが飽和した場合は、後に飽和したVFRを巻き戻し、前に巻き戻していたVFRは通常の制御に戻すように制御する。

上記同一の構成によって、5段偏波制御器、オフセット無6段偏波制御器、オフセット有6段偏波制御器の3種類の偏波制御器を用いて4時間追尾を続け、内積が0.95以下であった点のプロットを図10に示す。

内積の値が0.95以下となった点の数は、明らかに5段偏波制御器>オフセット無6段偏波制御器>オフセット有6段偏波制御器と小さくなり、また内積の最小値においても、5段偏波制御器<オフセット無6段偏波制御器<オフセット有6段偏波制御器となり、オフセット有6段偏波制御器が最も安定であることが確認できた。

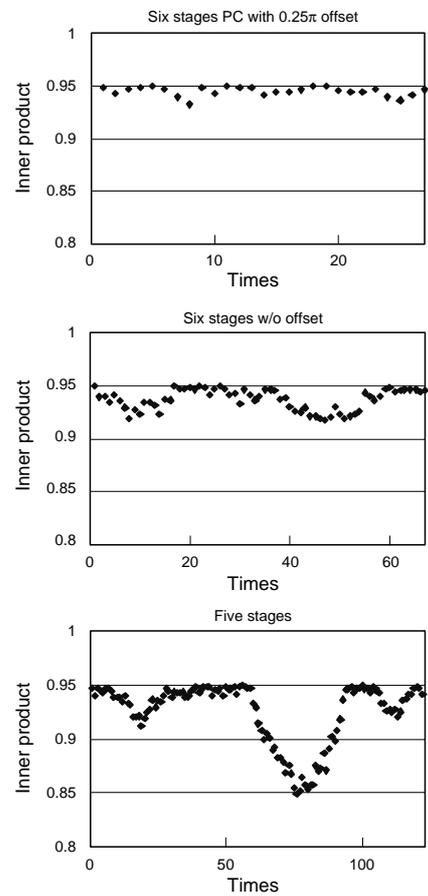
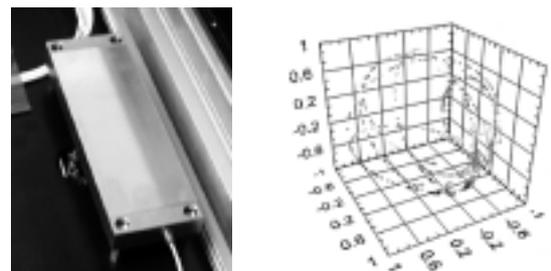


図10 シミュレーション結果 (内積 < 0.95)
Simulation results (Inner product < 0.95)



(a) 外観 (b) 出力偏光測定結果

Number of VFR	6
Insertion loss	1.37 dB
PDL	0.04 dB
Power consumption	Max. 0.6 W/VFR
Response	< 200 μs
Size	90 × 30 × 9.5 (mm ³)

図11 試作した偏波制御器
Prototypical polarization controller

5. 試作

実際にVFRを用いて図7の構成の偏波制御器を試作した。図11に試作した偏波制御器をまとめた。各VFRはそれぞれおよそ $\pi/4 \sim 9\pi/4$ の回転角（ストークス空間上）可変範囲を持ち、オフセット有の6段偏波制御器となっている。

(b)の出力偏光測定結果は、各VFRに電流を0 ~ 100 mAまで連続的に印加したとき（その他のVFRは0 mA）の出力偏光

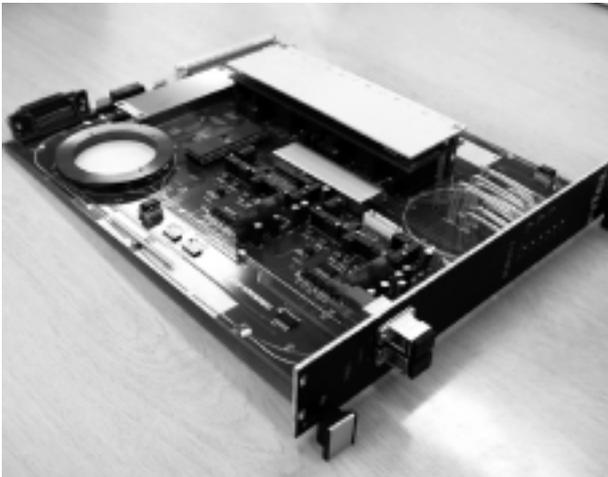


図12 PMD補償器
Prototype PMD compensator

をポラリメータで測定した結果である。各VFRによる円軌道が直交していないのはオフセットがあるためである。

低挿入損失(1.37 dB)、低PDL(0.04 dB)を実現し、サイズも $90 \times 30 \times 9.5$ (mm³)と小型化することができた。

現在、本偏波制御器を搭載したPMD補償器の試作を行っており、その動作特性を確認しているところである(図12)。

6. おわりに

光学特性に優れ、高信頼性の期待できる可変ファラデー回転子を用いて無限追尾機能を有した偏波制御器を開発した。設計にあたっては、可変ファラデー回転子の位相量可変範囲、及び可変ファラデー回転子の段数による追尾の安定性を議論するために回転群のパラメータを導入し、偏波制御器の持つ偏光変換の構造を体系的に理解するための手法を示した。またその手法により、位相量可変範囲にオフセットを持たせた6段偏波制御器が安定に動作することを理論的に示し、シミュレーションで確認した。更に、実際に可変ファラデー回転子を用いて本偏波制御器を試作し、小型で良好な光学特性を持つ偏波制御器を得た。

本偏波制御器により、安定に動作するPMD補償器が得られるものと期待される。またPMD補償器に限らず、非線形デバイス・コヒーレント検波等、次世代光伝送システムにおいては、ますます信号光の偏波を制御する要求が高まってくることが予想され、そのような偏波問題に対する1つの解として、本偏光変換解析手法及び可変ファラデー回転子による偏波制御器が適用されることも期待したい。

参考文献

- 1) T. Takahashi et al; Automatic compensation technique for timewise fluctuation polarization mode dispersion in in-line amplifier systems, *Electron. Lett.*, Vol.30, No.4, pp.348-349, 1994.
- 2) F. Roy et al; A simple dynamic polarization mode dispersion compensator, *OFC'99, TuS4-1*, p275, 1999.
- 3) H. Ooi et al; Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission, *OFC'99, WE5-1*, p86, 1999.
- 4) N. G. Walker et al; ENDLESS POLARISATION CONTROL USING FOUR FIBRE SQUEEZERS, *Electron. Lett.*, Vol.23, No.6, p290, 1987.
- 5) H. Shimizu et al; Highly Practical Fiber Squeezer Polarization Controller, *J. of Lightwave Technol.*, Vol.9, No.10, p1217, 1991.
- 6) F. Heismann; Analysis of a Reset-Free Polarization Controller for Fast Automatic Polarization Stabilization in Fiber-optic Transmission Systems, *J. of Lightwave Technol.*, Vol.12, No.4, p690, 1994.
- 7) 山内恭彦;回転群とその表現, 岩波書店, 1957.
- 8) 池田和浩, 高木武史, 畑野達也, 麻生修, 松浦寛; 可変ファラデー回転子による任意偏波コントローラ, 2002年電子情報通信学会総合大会B-10-112, 2002.
- 9) 池田和浩, 高木武史, 畑野達也, 風味創, 味村裕, 松浦寛; 無限追尾偏波コントローラ, 2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会C-3-31, 2002.
- 10) K. Ikeda; Arbitrary Polarization Controller with Variable Faraday Rotator, *NFOEC2002, Technical Proceedings*, p1965, 2002.