

光ファイバリング干渉計の基礎技術

光システム事業部 高嶋 徹^{*1}・戸倉 武^{*1}・二階堂 伸一^{*2}・荒井 克幸^{*3}

Basic Technology of Optical Fiber Ring Interferometer

T. Takashima, T. Togura, S. Nikaido & K. Arai

光ファイバを用いた干渉型センサは、様々な物理量を測定する手段として広く用いられている。当社はこれまでに光ファイバリング干渉計を用い、無切断通話装置¹⁾、光ケーブル対照器²⁾などを開発してきたが、さらにこの技術を応用した定量的な測定が可能な振動検知センサの検討を行っている³⁾。しかし、定量測定が可能なセンサとして使用するためには、感度の安定性や直線性を改善する必要がある。そこで、光ファイバリング干渉計の原理と問題点を確認し、その解決方法についての検討・評価を行ったので、その内容を報告する。

Optical fiber sensors with interferometer are used for measuring various physical quantities. We have developed the optical talk-set and optical cable identifier with optical fiber ring interferometer ¹⁾²⁾, and have studied the vibration sensor usable quantitative measurement with their techniques ³⁾. However, for usage in this application, the stability and linearity of sensitivity needs to be improved. This report describes principles and problems of optical fiber ring interferometers, investigation of their solutions, and evaluation results obtained.

1. ま え が き

光ファイバを用いた干渉型センサは、電界、電圧、磁界、電流、圧力、変位、速度、角速度等の物理量を測定することが可能であり、様々な用途で利用されている。また、干渉計の種類も、マッハツェンダ型、マイケルソン型、リング型、ファブリーペロー型、レイリー型等があり、用途に応じて使い分けられている。

この中で、リング型干渉計はサニャック効果を利用した角速度を検出する光ファイバジャイロスコープで広く研究・開発が行われている。また、参照光と測定光が同一の光路を伝搬するため、マッハツェンダ型やマイケルソン型に比べ温度などの外的要因による干渉光強度変動が小さく、比較的低感度のセンサが容易に実現できる。この特長を生かして、当社はこれまでに光ファイバリング干渉計を用い、無切断通話装置¹⁾、光ケーブル対照器²⁾などを開発してきた。しかし、この技術を定量的な測定が可能な振動検知センサとして使用するためには、感度の安定性や直線性を改善する必要がある。そこで、光ファイバリング干渉計の原理と問題点を確認し、その解決

方法について検討を行った。

2. 原 理

光ファイバリング干渉計型センサの基本構成を図1に示す。光源、フォトダイオード (PD)、1対1カプラ、光ファイバリングで構成される。光源から出射された光は1対1カプラによって分岐され、光ファイバリングの両端に入射される。分岐された光は、時計回り (clockwise : CW) 光と反時計回り (counterclockwise : CCW) 光として逆方向に光ファイバリングを伝搬し再び1対1カプラに入射される。CW光とCCW光は1対1カプラで結合され、互いに干渉する状態でPDに検出される。

光源からPDまでの光路を考えた場合、CW光とCCW光の光路長は1対1カプラ以外同一である。1対1カプラは、結合光と透過光の間に $\pi/2$ の位相差を生じるため、図1

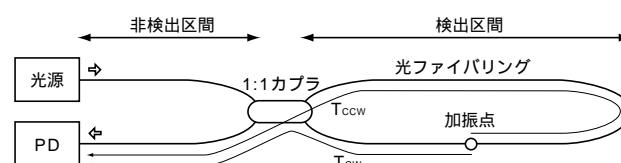


図1 光ファイバリング干渉計型センサの構成
Configuration of the optical fiber sensor with interferometer

*1 光システム開発部
*2 光システム開発部グループ長
*3 光システム開発部長

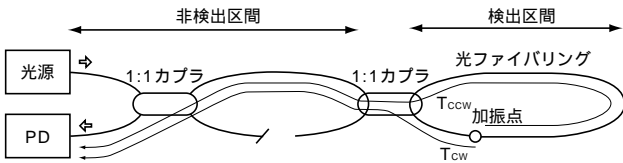


図2 二つの1:1カプラを用いた光ファイバリング干渉計型センサの構成
Configuration of the optical fiber sensor with interferometer using two 1:1 couplers

の構成の場合、CW光とCCW光の間に の位相差を生じる。

また、図2の構成の場合、結合光と透過光の間に生じる位相差を相殺することになり、CW光とCCW光の光路長が等しくなる。したがってこの場合の両光波間の位相差は0となる。

ここで、光ファイバリングに振動を加えると、光弾性効果により光ファイバ内の屈折率が変動する。この現象をPDから見ると、振動によってCW光とCCW光が位相変動されたことになる。時間tにおける加振点での位相変動を $\phi(t)$ 、CW光が加振点からPDに到達する時間を T_{CW} 、CCW光が加振点からPDに到達する時間を T_{CCW} とすると、PDで検出される干渉光強度 $P_p(t)$ は、

$$P_p(t) = P_i + P_c \times [1 + \cos(\phi_0 + (t - T_{CW}) - (t - T_{CCW}))] / 2 \dots (1)$$

で表される。ただし、 P_i はPDで検出される非干渉光成分の大きさ、 P_c は可干渉光成分の大きさである。また、 ϕ_0 は静的な状態でのCW光とCCW光の位相差であり、図1の場合、図2の場合0となる。したがって、光ファイバリングに振動を加えるとその歪みに対応した検出光レベルの変動が見られ、振動を検知することができる。

光ファイバリング干渉計を振動センサとして使用した場合、次のような利点がある。

光ファイバリング以外の光ファイバに振動を加えてもCW光とCCW光間の位相差は変化せず、振動を検出しないので、光源や受光回路から離れた特定の区間のみを検出が可能

光源や受光回路以外は、受動光学素子で構成されるため、検出区間近傍での電源や、避雷・防爆の対策が不要

しかし、この光ファイバリング干渉計を定量的な測定が可能なセンサとして使用するには、感度の安定性や直線性に問題がある。そこで、これらの問題点とその解決方法について検討を行う。

3. 問題点と対策

3.1 光ファイバリングの不感条件

(1)式をみると、 $T_{CW} = T_{CCW}$ となる振動点、すなわち光ファイバリングの中心では、感度が最も小さくほとんど検出できないことがわかる。この条件を避けるために、図3(a)のように光ファイバリングの中心に遅延素子を

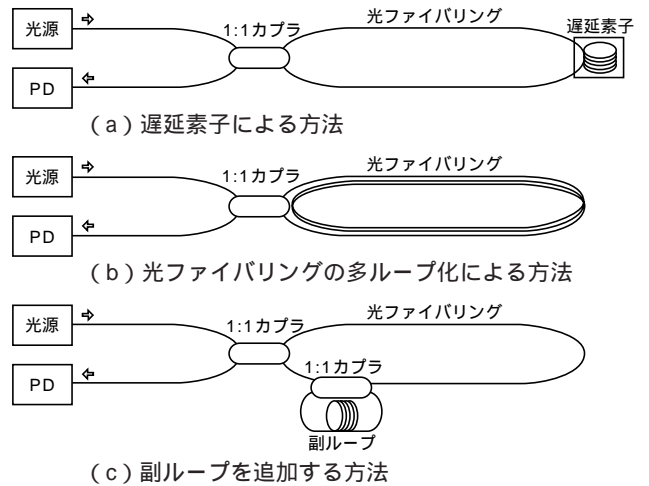


図3 不感条件の解消方法
Method of removing nonsensed conditions

挿入したり、図3(b)のように光ファイバリングを多ループ化する等の対策が考えられる。ほかに、図3(c)のように光ファイバリング中に副ループを設けることで感度の距離依存性を改善する方法がある⁴⁾。

図3(a)の方法で、長さ1kmの光ファイバリングの中心に遅延素子(2kmの光ファイバ)を挿入することにより、30dB以上あった感度の距離依存性を3dB以下に改善させることができた。

3.2 偏光変動の影響

感度の安定性を考えた場合、偏光変動の影響は無視できない。図1~3のように偏光変動の対策が行われていない場合、感度の変動は20dB以上あり、定量的な計測は困難である。偏光変動の影響を低減させる方法として次の2とおりの方法が考えられる。

伝送路を定偏波型として、一定の偏光状態を保持する
信号光を無偏光状態にして、偏光依存性を低減させる

は、高精度の光ファイバジャイロスコープなどでよく用いられる方法であるが、振動センサとして考えた場合、長尺の定偏波ファイバが必要になり、コスト面でのデメリットが大きい。また、長尺化による偏波クロストークの影響が問題となる。は、高精度化には不向きだが、通常のSMファイバを使用できるため、コスト面で有利である。振動センサの場合は の条件がより適していると考えられるため、信号光の無偏光化について検討した。

無偏光化する方法として、PANDAファイバの複屈折性を利用したデポライザがある。これは伝搬する2つの直交偏波に伝搬光のコヒーレンス長以上の光路差を与え、両偏波間の位相相関を無くすことで無偏光化する。デポライザの構成を図4に示す。長さがL、2Lとなる2本のPANDAファイバの偏波保持面を /4傾けて接続することで、すべての偏光面に対して無偏光化できる。このとき、PANDAファイバの偏波モード分散による直交偏波間の光路長差が伝搬光のコヒーレンス長以上である必要がある。PANDAファイバの長さを短くするため、低コヒ

ーレンス光源としてスーパー・ルミネッセント・ダイオード (SLD) を使用した。

また、PANDAファイバ間の接続面の傾き誤差などの要因により、1つのデポライザでは十分な無偏光化ができないため、長さがL、2Lのデポライザと、4L、8Lのデポライザの2つを直列に挿入した。

図1のセンサに上述の偏光変動対策を行ったものを図5に示す。図1のセンサでは偏光変動による感度変化が20dB以上あったのに対し、図5のセンサでは0.1dBとなり、大幅に改善された。

3.3 直線性の改善

(1) 式から、CW光とCCW光の位相差と検出光強度は非線形であり、 ϕ が n (n は整数) の場合、小信号入力時の感度は最も小さくなるのがわかる。また、 ϕ が $(n+1/2)$ の場合、感度は最も大きくなり、直線性も位相差の変化が $\pm \pi/6$ の範囲で5%以下となって、最も線形に近くなる。

これまでに説明した構成では ϕ が0または π となり、最も感度が小さく直線性が悪い条件で使用していることになる。

この条件を改善する方法としてインライン型の $\pi/2$ 非相反位相バイアス器を用いる方法を検討した。構成を図6

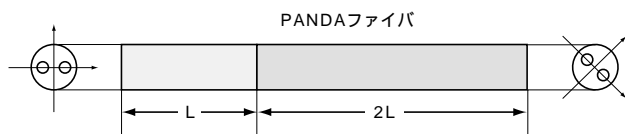


図4 PANDAファイバによるデポライザの構成
Configuration of depolarizer with PANDA fiber

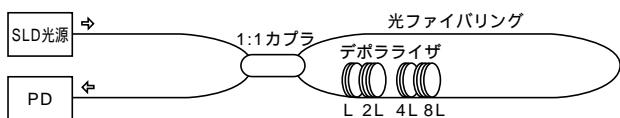


図5 デポライザによる偏光変動の影響の低減方法
Method of reducing effect of polarized fluctuations with depolarizer

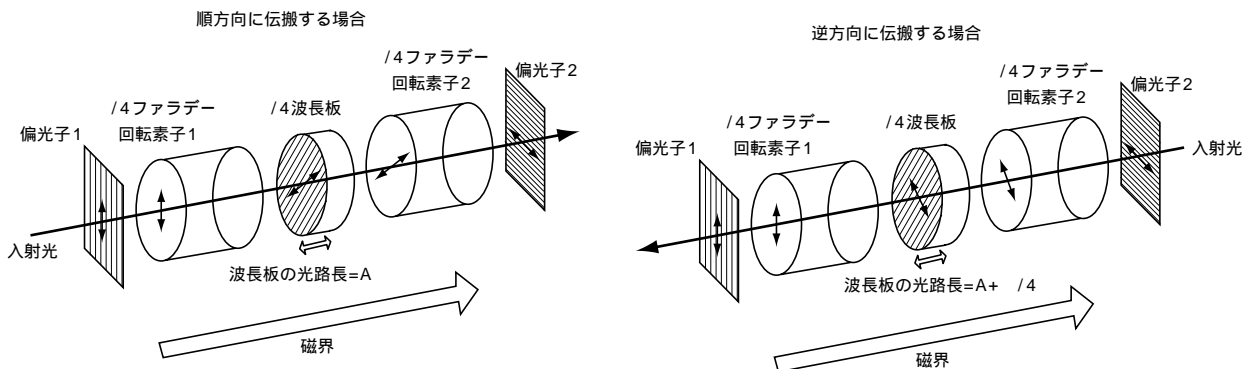


図6 $\pi/2$ 非相反位相バイアス器の構成
Configuration of nonreciprocal $\pi/2$ phase shifter

に示す。順方向に入射した光は、偏光子1によって直線偏光となり、 $\pi/4$ ファラデー回転子1で光の入射側から見て時計回りに $\pi/4$ 偏光軸が回転する。さらに、 $\pi/4$ 波長板の短光路軸を経て、 $\pi/4$ ファラデー回転子2で再び時計回りに $\pi/4$ 回転し、偏光子2の透過軸を伝搬し出射される。逆方向に入射した光は、偏光子2によって直線偏光となり、 $\pi/4$ ファラデー回転子2で光の入射側から見て時計回りに $\pi/4$ 偏光軸が回転する。さらに、 $\pi/4$ 波長板の長光路軸を経て、 $\pi/4$ ファラデー回転子1で再び時計回りに $\pi/4$ 回転し、偏光子1の透過軸を伝搬し出射される。その結果、順方向と逆方向で $\pi/4$ の光路差、すなわち $\pi/2$ の位相バイアスが生じる。順方向に伝搬する光路と逆方向に伝搬する光路が同一媒質でほぼ同一空間となるため、振動や温度変化などの影響を低減させることができる。

この位相バイアス器を光ファイバリングの中に挿入した場合の構成を図7に示す。位相バイアス器を伝搬する光は直線偏光となるため、偏光変動の影響を低減させるためには、位相バイアス器の両隣りにデポライザを設置する必要がある。

光ファイバリングに周波数10kHzの正弦的な歪み変化を加えたときに観測される検出信号の周波数成分を図8に示す。位相バイアス器を挿入しないときの波形 (図8(a)) は、2次高調波成分がほとんどで、波形の歪みが大きいことを示している。位相バイアス器を挿入したときの波形 (図8(b)) は、若干の3次高調波成分があるものの、波形の歪みは大幅に改善されているのがわかる。

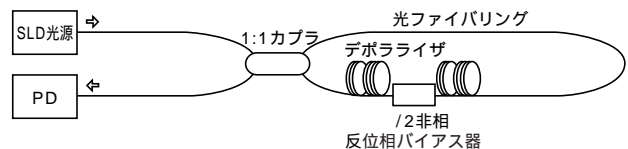


図7 $\pi/2$ 非相反位相バイアス器を挿入した光ファイバリング干渉計型センサの構成
Configuration of optical fiber sensor with interferometer using nonreciprocal $\pi/2$ phase shifter

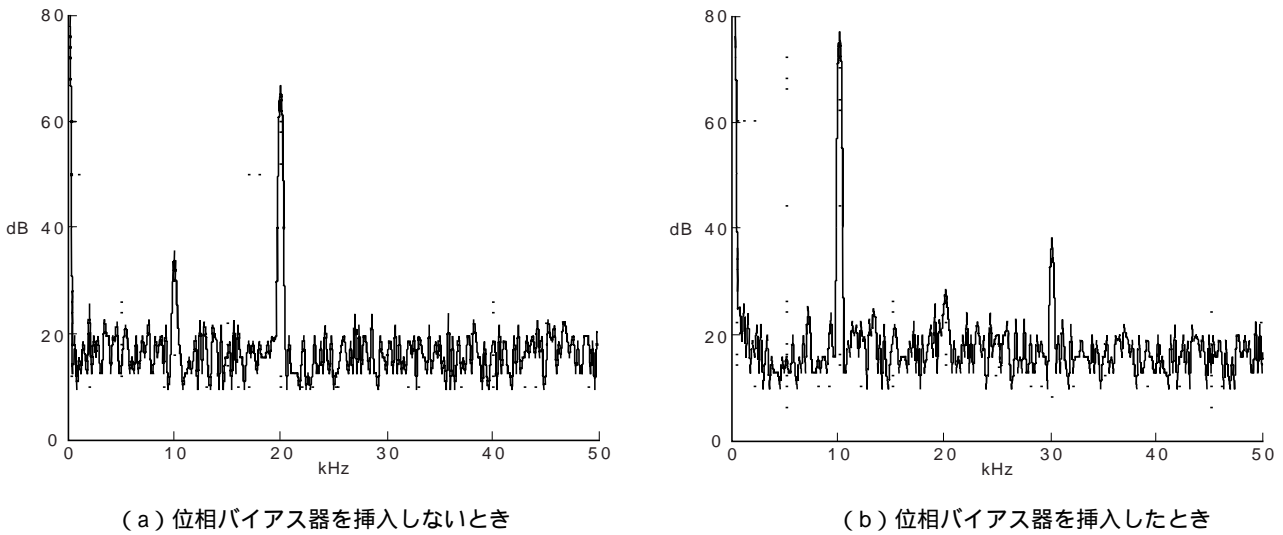


図8 10kHzの正弦的な歪みを加えたときの検出信号の周波数分布
Frequency distribution of detecting signal when 10kHz sinusoidal strain occurs

4. む す び

光ファイバリング干渉計型センサの問題点である不感条件、偏光変動の影響や直線性について、遅延素子、デポライザや $\lambda/2$ 非相反位相バイアス器を利用することで改善させることができた。今後はCW光とCCW光の位相差が大きい場合の直線性の改善について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 中村ほか：光ファイバ無切断通話器の開発，フジクラ技報，第96号，1999
- 2) 桑原ほか：ファイバリング干渉計型光ケーブル対照器の開発，電子情報通信学会全国大会，B - 10 - 67，1999
- 3) 高嶋ほか：ファイバリング干渉計型落石検知装置の検討，電子情報通信学会全国大会，B - 13 - 7，2000
- 4) 大森ほか：光リング干渉計型振動検知センサの周波数特性に関する一検討，電子情報通信学会全国大会，B - 13 - 26，2001