

解説

ヘテロダイン干渉センサーのクロストークによる 非線形性とその低減

中谷 登*・小塩 高文*・阪部 俊也**

* 芦屋大学産業教育学科 〒659 芦屋市六麓荘町 13-22

** 奈良工業高等専門学校電子制御工学科 〒639-11 大和郡山市矢田町 22

(1993年2月22日受理)

Reduction of Nonlinearity Caused by Crosstalk in Sensors Using Heterodyne Interferometry

Noboru NAKATANI,* Takanori OSHIO* and Toshiya SAKABE**

* Department of Industrial Education, Ashiya University,
13-22, Rokurokuso-cho, Ashiya 659

** Department of Control Engineering, Nara National College of Technology,
22, Yata-cho, Yamatokoriyama 639-11

1. はじめに

ヘテロダイン干渉法は、高感度で、検出位相とセンサー出力との間に線形関係が成立し較正の必要がない、光源の出力変動の影響を受けにくい、などの特色があり、多くの研究がなされて測長器などで、実用的に使用されているものや、光ファイバセンサーにも採り入れられている¹⁻⁸⁾。これらの干渉計では、光学系の簡素化や外乱除去のため、偏波面保存光ファイバや直交2周波光源が使用されることが多くなっている。しかし、これらの光源、光ファイバ、使用光学部品での直交偏波間の漏れから生じるクロストークが、検出位相とセンサー出力の関係を非線形にし、誤差やゆらぎの原因になる。本解説では、この非線形性およびその低減方法と実験例、その低減度について述べる。

2. 直交2周波光源と漏れ成分

直交2周波光源としては、代表的なものとして、ゼーマン効果を利用した He-Ne レーザ^{9,10)}、レーザー光源と音響光学素子を組み合わせたシステム²⁾、この他導波路に集積化したもの¹¹⁾などがある。最初の二つのものが実用化している。このうち一番最初のものは、安定化レーザーでもあり、光路差がある場合にもそのまま使用

できる。

ゼーマン効果を利用したものとして、軸ゼーマン型(YHP)と横ゼーマン型(朝日分光、マイクロ光機)があるが後者は光出力約 2 mW と大きく、低価格で操作性もよく、堅牢で広く使用されている。直交成分の周波数差は、100~500 kHz の間のものがあり、これはレーザー管の特性で決まり、固定である。周波数差安定度は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (1時間)程度、周波数そのものの安定度は $10^{-8} \sim 10^{-10}$ (1時間)程度である。

二つの音響光学素子を用いた直交2周波光源(HOYA, 旭硝子)では、別にレーザー光源を必要とする。この場合の周波数安定度は、使用するレーザー光源によって決まる。大きな光路差がある干渉計では、単一周波数安定化レーザーを使用する必要がある。周波数差の安定度は、音響光学素子に加える駆動発振器の安定度で決まり、水晶発振器を用いると 10^{-6} 程度にできる。

ヘテロダイン干渉光源として使用する場合、図1に示すような、直交偏波間の漏れがあると3.項で述べるように、検出位相とセンサー出力の関係が非線形になり、誤差の要因となる¹²⁻¹⁶⁾。

安定化横ゼーマンレーザーは、磁場軸の設定角度ずれ、レーザーミラーの歪みや誘電体多層膜の複屈折性のため、出力が楕円偏光化し、非直交性になり、直交偏波

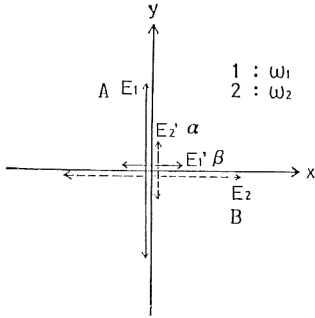


図 1 偏波面間の漏れ成分
A, B: 主成分, α, β : 漏れ成分.

間に漏れが存在する¹⁴⁾. 出力光の偏光特性を調べるため、検光子を通して直交 2 周波光の干渉ビート信号を観測した結果を図 2 に示す. 漏れがないと、検光子の直交成分の方向 0 rad と $\pi/2$ rad 方向で、ビート信号は観測されないはずであるが、(a), (c) のようにビートが観測され大きな漏れ成分がある. パビネソレイユ補償板, ベレック補償板, または $1/4$ 波長板を用いて補償すると図 3 のように漏れ成分を低減できる. 補償前の漏れ成分 $Q/P(= \beta/A + \alpha/B) = 0.475$ (この漏れ成分については §3. 項に記す) である. 補償後は $Q/P = 0.037$ となり、約 $1/10$ に低減できる.

音響光学素子を用いた直交 2 周波光源も、使用している偏光ビームスプリッタの反射光の消光比が悪いこと、および偏光軸の設定角度誤差のため、直交偏波間に漏れが存在する. 漏れ成分は最大で 0.10 程度である.

3. クロストークによる非線形性とその評価法

安定化横ゼーマンレーザーは、直交 2 周波光を出力するのみならず、周波数が安定化されているので、可干渉性がよく、光路長の差が大きくても干渉可能であるので高精度干渉計の光源として利用されている. 例として、測長用のヘテロダイン干渉計の基本的な光学系を図 4 に示す. このマイケルソン型干渉計は、精度の高い測長が可能で、機械計測ばかりでなく、リソグラフィなどで微小位置決めなどに利用されている. また、著者らが構成した機能型光ファイバヘテロダイン干渉計に

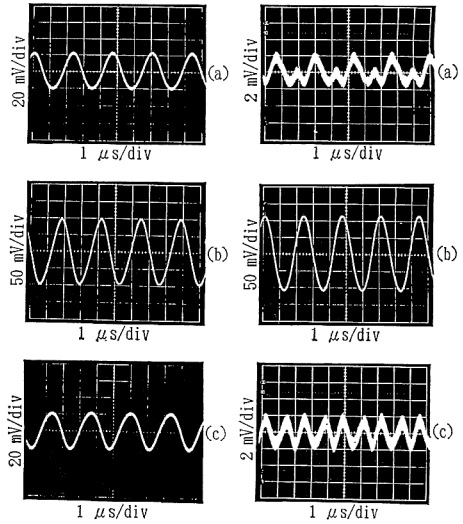


図 2

図 3

- 図 2 安定化横ゼーマンレーザーの干渉ビート信号, 補償板なし
(a): 検光子光学軸方位角 Y 軸に対して 0 rad,
(b): $1/4\pi$ rad, (c): $3/4\pi$ rad.
- 図 3 安定化横ゼーマンレーザーの干渉ビート信号, 補償板使用
(a): 検光子光学軸方位角 0 rad,
(b): $1/4\pi$ rad, (c): $3/4\pi$ rad.

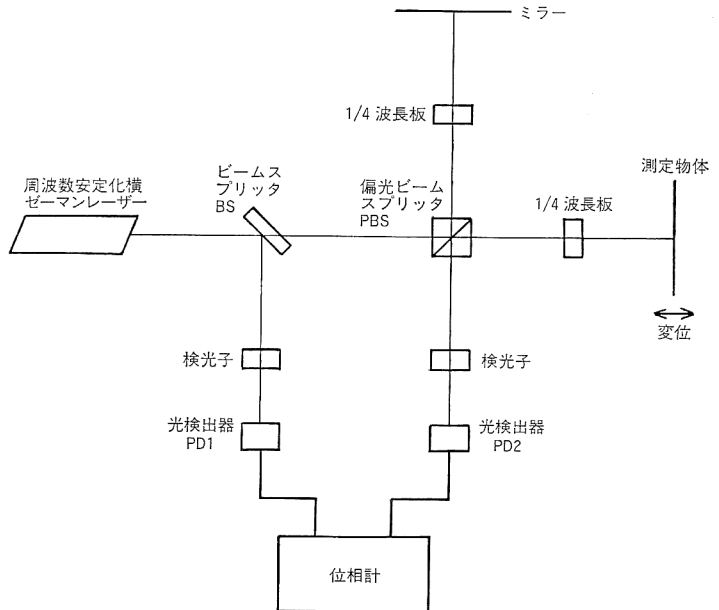


図 4 測長用ヘテロダイン干渉計

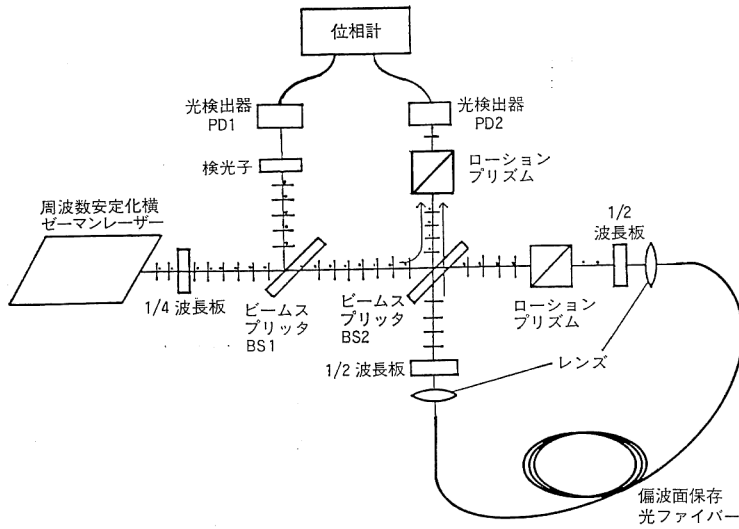


図5 機能型光ファイバヘテロダイン干渉計による温度センサー

よる温度センサーを図5に示す^{6,13)}。この光学系では、参照光路をなくし、センサー部が環状になっており、参照信号を得るビームスプリッター BS1 以後の光学系のみをシールドして使用でき、外乱の影響防止の対策がやりやすい。光路差は大きく測定精度は安定化レーザーの安定度によって左右される。周波数安定度 10^{-9} の安定化レーザーを用いるとこのセンサーは高感度10万分の1の温度変化のセンサーとして使用できる。これらの干渉計を用いて高精度で計測する場合問題となる非線形性について述べる。

使用する直交2周波光源、光学部品によって、直交偏波間に、図1に示すような漏れが存在すると、光検出器(図4, 5中のPD2)では次式に示す4波の混合が検出される。

$$\begin{aligned} E_1 &= A \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ E_2 &= B \cos(\omega_2 t + \phi_2 + \phi) \\ E_2' &= \alpha \cos(\omega_2 t + \phi_2) \\ E_1' &= \beta \cos(\omega_1 t + \phi_1 + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

PD2の出力のAC成分は、 $\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$ とし、簡単のため初期位相 $\phi_1 = \phi_2$ と仮定すると(初期位相が異なる一般的な場合については、参考文献6)参照)。

$$I_{AC} \propto AB \cos(\Delta\omega t + \phi) + (A\alpha + B\beta) \cos(\Delta\omega t) + \alpha\beta \cos(\Delta\omega t - \phi) \quad (2)$$

2次項 $\alpha\beta$ は微小で無視できるとすると、第2項の影響で位相出力は後の4.項図11に示すように非線形になり、検出位相は真の値 ϕ から異なる次式の値 ϕ' となる。

$$\tan \phi' = \sin \phi / \{ \cos \phi + (Q/P) \} \quad (3)$$

異なる偏波間の漏れ量 $(\beta/A + \alpha/B) = Q/P$ に対する位相誤差を計算した結果を図6に示す。 $1/2\pi$ rad と π rad で最大の誤差を示す。この誤差は干渉縞の各次数内を分割して高精度計測を行う場合に問題となるもので、干渉縞の次数の誤差ではないので累積誤差にはならない。初期位相 $\phi_1 = \phi_2$ と仮定したが、異なる場合には、上記の値が最大誤差を見積ることになる。

偏波間の漏れ量は、振幅変調されたビート信号(模式図の図7)から求める。この図より、偏波間の漏れ量は、

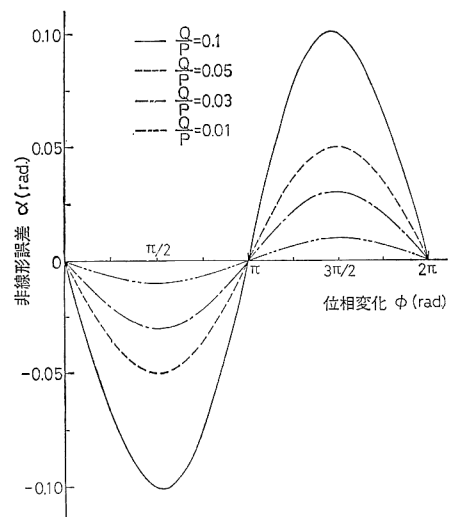


図6 偏波面間の漏れ成分のクロストークによる位相誤差

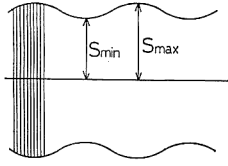


図 7 ビート信号の振幅変調

$$Q/P = (S_{max} - S_{min}) / (S_{max} + S_{min}) \quad (4)$$

から求まる。

初期位相 $\phi_1 = \phi_2$ を仮定したが, 異なる場合には, 参考文献 6) に記されている。

4. 非線形性の低減

非線形性を低減する方法^{6,17)}として, 2. 項で述べた 2 周波光源の直交漏れ成分を各種補償法により低減をはかる以外に, 実験結果を計算により補正する方法, 実験により低減する方法として, ビート信号のセンシング部の位相を含む項の位相を π 偏移させて, クロストーク項を除去する方法がある。実験の方法として偏光法^{18,19)}, 空間分布縞法⁶⁾, 3 周波数光を用いる方法²⁰⁾が提案されている。ここでは, 一般的な前 2 者について述べる。

(a) 計算による補正

ビート信号の振幅変調などから, あらかじめ偏波間の

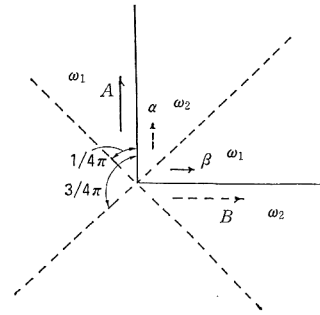


図 9 偏光法における各振幅成分の方位角の関係

漏れ量 Q/P がわかっている時, 測定値 Φ と真の位相 ϕ との関係は, (3) 式で与えられる。この式を逆変換すると次式から真の位相 ϕ をもとめることができる。

$$\phi = \Phi + \sin^{-1}[(Q/P) \sin \Phi] \quad (5)$$

(b) 偏光法

偏光法により, 位相を π 偏移させる光学系 (図 4 に対応する) を図 8 に示す。検出される電場成分の振幅値の関係を図 9 に示す。光検出器 PD2, PD3 で検出されるビートの交流成分は, 次式のように表される。

$$I_{Ac, 1/4\pi} \propto AB \cos(\Delta\omega t + \phi) + (A\alpha + B\beta) \cos(\Delta\omega t) \quad (6)$$

$$I_{Ac, 3/4\pi} \propto -AB \cos(\Delta\omega t + \phi) + (A\alpha + B\beta) \cos(\Delta\omega t) \quad (7)$$

それぞれのビート信号の差をとると, 第 2 項のクロストーク成分を除去できる。ただし, $\alpha\beta \ll 0$ とし, 第 3 項は無視できるものとする。

$$I_{DIFF} \propto \cos(\Delta\omega t + \phi) \quad (8)$$

このビート信号と PD1 での参照ビート信号との位相差をとり, センシング部での真の位相変化を検出する。

(c) 空間分布縞を用いる方法

偏光法を用いることができない場合には, 空間分布縞を用いて, 2 点の位相差を π 偏移させる光学系 (図 10 に示す) が試みられている。図 5 の光学系では, センシング部の位相変化を含むビート信号を一つの光検出器 (PD2) だけで検出していたのを, センシング部の位相変化を含むビート信号をビームスプリッタ BS3 で二つに分け, 二つの光検出器 PD2, PD3 でビート信号の光ファイバの位相変化を含む項

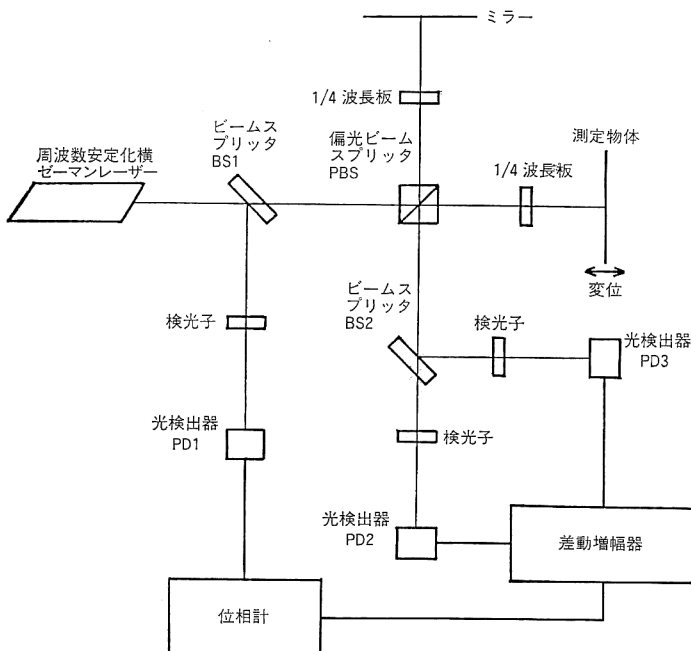


図 8 測長用ヘテロダイン干渉計の非線形性低減のための偏光法光学系

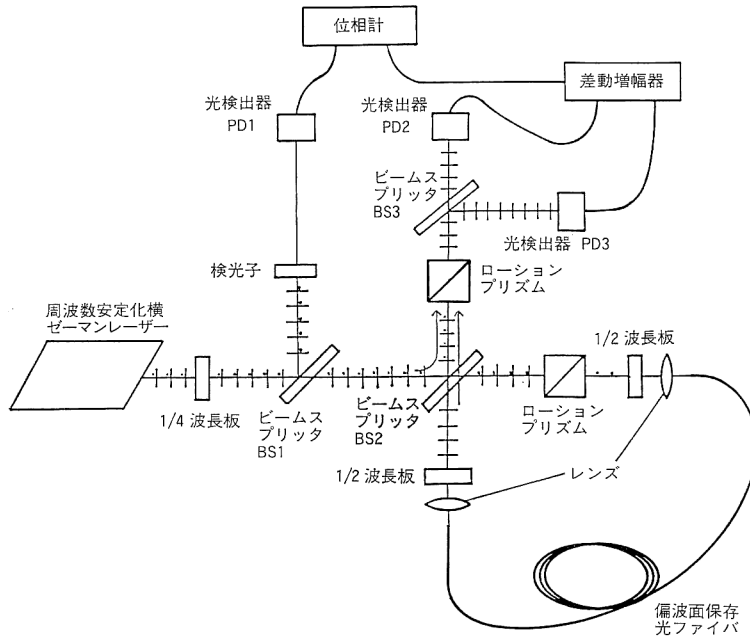


図 10 光ファイバヘテロダイン干渉センサーの非線形性低減のための空間分布縞法光学系

が互いに π 偏移するように検出している。位相偏移は、ビームスプリッタの傾きを調整し、任意の空間的な分布縞を作成し、光検出器 PD 2, PD 3 の 2 点の受光ピンホールを微動させて行っている。その π 偏移の確認は、PD 2 と PD 3 のビート信号の差を差動増幅器でとり、そのビート信号の振幅変調が最小になるように、上記の光学系の調整と増幅器の各チャンネルの増幅率をかえて、調整しながら行っている。理論式は、式 (6)~(8)と同じである。

非線形性除去の検証実験例として、センシング部に熱を加え、その時の位相出力をオシロスコープで観察した結果を示す。図 11 は PD 2 で検出されるビート信号と PD 1 で検出されたビート信号の位相差を示す。このように大きな非線形性を示す。この時のクロストーク量を図 12 に示すビート信号の振幅変調から求めると、 $Q/P = 0.54$ であった (この実験例では、わかりやすくするためクロストークを大きくしている)。図 13 は、空間分布縞法による非線形性の低減例を示す。PD 2 で検出されたビート信号と PD 3 で検出されたビート信号のセンシング部の位相変化 ϕ を含む項が互いに π ずれるようにして、差動増幅器により差をとってクロストーク成分を低減したビート信号をえる。このビート信号と PD 1 で検出されるビート信号の位相差を示す。この図のように線形になり、この方法の有効性を示している。

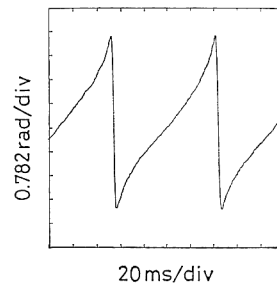


図 11 クロストークによる非線形性の典型的なオシロスコープパターン
PD 1 と PD 2 のビート信号間の位相差。

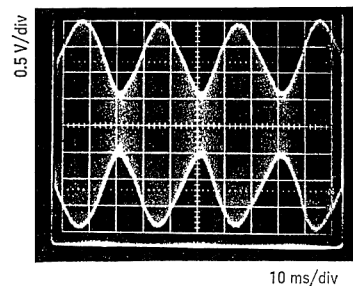


図 12 クロストークによる振幅変調を受けたビート信号例
 $Q/P = 0.54$.

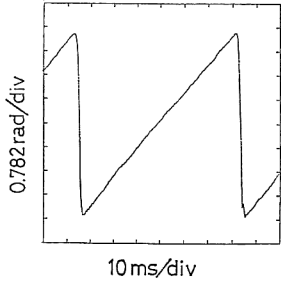


図 13 図 12 の空間分布縞法光学系を用いて非線形性が低減されたオシロスコープパターン例. PD 2 のビート信号と PD 3 のビート信号を差動増幅で差をとったビート信号と PD 1 のビート信号の位相差.

5. 測定位相誤差の低減度

以下に, 4. 項に述べた (b), (c) の低減法について, 2 次項の影響, PD 2 と PD 3 の振幅値に差がある場合, π シフトの位相調整誤差, 検光子の光学軸の方位角設定誤差がある場合の測定位相誤差の低減度について考察する. まず, クロストークが大きくて 2 次項 $\alpha\beta$ が無視できない場合, 式 (8) は次式になる.

$$I_{DIFF} \propto 2(AB + \alpha\beta) \cos \phi \cos(\Delta\omega t) - 2(AB + \alpha\beta) \sin \phi \sin(\Delta\omega t) \quad (9)$$

したがって, 位相計で検出される位相は

$$\tan \Phi = \{(1 - \alpha\beta/AB)/(1 + \alpha\beta/AB)\} \tan \phi \quad (10)$$

Q/P に対する誤差を $\beta/A = \alpha/B$ として計算した結果を図 14 に示す. $Q/P = 0.1$ 以下では市販の位相計の測定限界 1.7×10^{-3} rad 以下になり無視できる.

PD 2, PD 3 のビート成分の振幅値に差がある場合, I_{DIFF} , $\tan \Phi$ は, 次式のようなになる. ただし, ビートの振幅比を X とし, $\alpha\beta \ll 0$ とする.

$$I_{DIFF} \propto \{AB(1+X) \cos \phi + (A\alpha + B\beta)(1-X)\} \cos \Delta\omega t - \{AB(1+X) \sin \phi\} \sin \Delta\omega t \quad (11)$$

$$\tan \Phi = \sin \phi / \{\cos \phi + (Q/P)(1-X)/(1+X)\} \quad (12)$$

クロストーク成分 Q/P に対する低減度は $(1-X)/(1+X)$ となり, たとえば $X = 0.9$ の時で 0.05 となり, 1/20 低減できる. したがって, PD 2, PD 3 の増幅器の増幅率の調整が荒くても, クロストーク成分をかなり小さくできる.

空間分布縞法における π 位相偏移の誤差 $\Delta\phi_s$ がある場合, I_{DIFF} , $\tan \Phi$ は, 次式のようなになる. ただし, $\alpha\beta \ll 0$ とする.

$$I_{DIFF} \propto AB \{\cos \phi + \cos(\phi + \Delta\phi_s)\} \cos(\Delta\omega t) - AB \{\cos \phi + \cos(\phi + \Delta\phi_s)\} \sin(\Delta\omega t) \quad (13)$$

$$\tan \Phi = \tan(\phi + \Delta\phi_s/2) \quad (14)$$

真の値から, $\Delta\phi_s$ だけ常に, 異なった値となり, 線形性に影響しないことがわかる. この問題は, 偏光法においても, 光検出器 PD 2, PD 3 の位置が異なると生じる.

偏光法において, 図 9 で検光子の光学軸方位角 $1/4\pi$

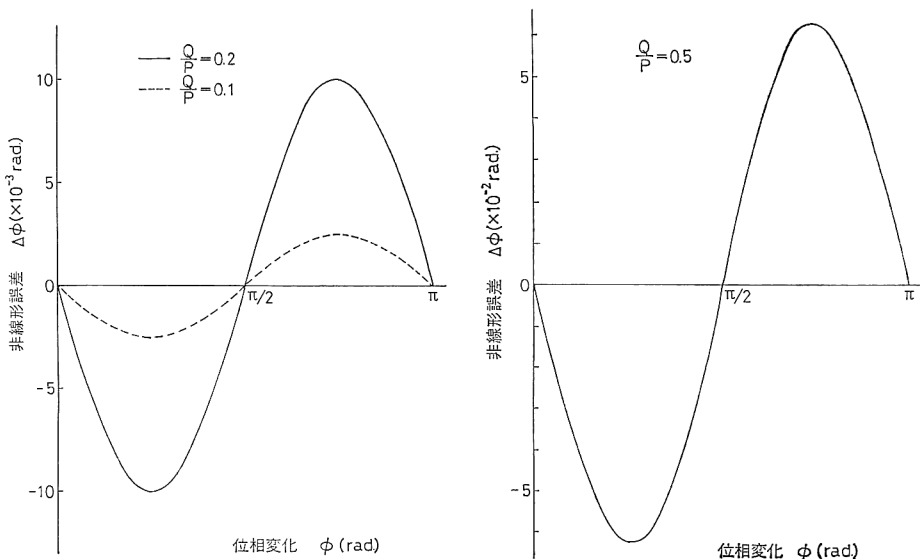


図 14 偏光法と空間分布縞法におけるクロストーク量 Q/P の大きい場合の 2 次微小項による残留非線形誤差

rad, $3/4\pi$ rad に対して軸がそれぞれ $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ の設定誤差がある場合, I_{DIFF} は次のようになる. ただし, $\alpha\beta \ll 0$ とする.

$$I_{\text{DIFF}} \propto (AB/2) \cdot (\cos 2\Delta\theta_1 + \cos 2\Delta\theta_2) \cos(\Delta\omega t + \phi) \\ - [(\alpha A - \beta B)/2] \cdot (\sin 2\Delta\theta_1 \\ - \sin 2\Delta\theta_2) \cos \Delta\omega t \quad (15)$$

クロストーク成分は(第2項の振幅)/(第1項の振幅)で与えられる.

$$\tan \phi = \sin \phi / \{ \cos \phi \\ - (\alpha/B - \beta/A) (\sin 2\Delta\theta_1 \\ - \sin 2\Delta\theta_2) / (\cos 2\Delta\theta_1 + \cos 2\Delta\theta_2) \} \quad (16)$$

クロストーク成分は各軸の漏れ量の2倍に比例し, また各検光子の光学軸方位角設定誤差の差に比例するので, 余り大きな設定誤差がない限り位相誤差を無視できるくらいに低減できる.

6. おわりに

ヘテロダイン干渉計において, 直交2周波光源や光学部品による偏波間の漏れが存在すると, クロストークによる非線形位相誤差が生じる. この誤差は, 累積誤差とはならないが, 干渉縞内を分割して測定する高精度干渉計測で問題となる. 偏光補償および光学軸設定を精度よく行い, クロストーク量を0.1以下にしておけば, 偏光法や空間分布縞法により実験的に位相誤差を無視できる程度(市販の位相計の測定限界 1.7×10^{-3} rad 以下)に低減できる. なお, このような偏波間の漏れによる位相誤差以外にも光学部品の反射光が原因となる位相誤差²¹⁾, レーザー共振器から出力したビーム自体の回折波面歪みによる位相誤差²²⁾などがあり, すべての原因が取り除かれて初めて高精度なヘテロダイン干渉計が実現する.

文 献

- 1) 芳野俊彦: "5.2 ヘテロダインファイバセンサ", 光波センシングの基礎と応用(オーム社, 1990) pp. 191-193.
- 2) 山浦 均: "ヘテロダイン光源", O plus E, NO. 150 (1992) 97-102.
- 3) 平野雅夫, 石灰勲夫, 宮本正巳: "ヘテロダイン変位計の特徴と使い方", オプトロニクス, NO. 134 (1993) 161-166.
- 4) N. Nakatani, T. Izumi, S. Asano, T. Yamada and T. Sakabe: "Optical fiber heterodyne interferometer probe free from external disturbance," Rev. Sci. Instrum., **58** (1987) 2161-2164.
- 5) 中谷 登, 山田朝治, 阪部俊也: "ナノメータ変位計測光ファイバヘテロダイン干渉計プローブ", 計測自動制御学会論文集, **25** (1989) 2678-2681.
- 6) 中谷 登, 山田朝治, 阪部俊也: "安定化横ゼーマンレーザを用いた光ファイバ温度センサ特性と非線形性の除去法", 計測自動制御学会論文集, **27** (1991) 12-18.
- 7) N. Nakatani, S. Asano, T. Kadoguchi and T. Yamada: "Optical fiber heterodyne interferometer free from external disturbance—a functional type and a probe type—," Proc. of the 2nd Int. Symp. on Fluid-Control, Measurement, Mechanics and Visualization, Sheffield (BHRA, 1988) pp. 332-336.
- 8) N. Nakatani and T. Oshio: "Photothermal velocimeter using an optical fiber heterodyne interferometer with phase differentiation at two points," Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Springer-Verlag, 1991) pp. 331-346.
- 9) 高崎 宏, 梅田倫弘: "周波数安定化横ゼーマンレーザとその応用〔1〕", O plus E, NO. 19 (1981) 66-78.
- 10) 高崎 宏, 梅田倫弘: "周波数安定化横ゼーマンレーザとその応用〔2〕", O plus E, NO. 20 (1981) 77-87.
- 11) 西原 浩: "6.4 センサ用光回路の集積化", 光波センシングの基礎と応用(オーム社, 1990) pp. 274-285.
- 12) N. Bobroff: "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity," Appl. Opt., **26** (1987) 2678-2681.
- 13) 中谷 登, 門口哲也, 山田朝治, 阪部俊也: "直交2周波数光源を用いた光ファイバセンサとクロストークによる非線形", 第1回光波センシング技術研究会講演論文集(光波センシング技術会, 1988) pp. 105-112.
- 14) Y. Xie and Y. Wu: "Elliptical polarization and nonorthogonality of stabilized Zeeman laser output," Appl. Opt., **28** (1989) 2043-2046.
- 15) Y. Xie and Y. Wu: "Zeeman laser interferometer errors for high-precision measurements," Appl. Opt., **31** (1992) 881-884.
- 16) C. M. Sutton: "Non-linearity in length measurement using heterodyne laser Michelson interferometry," J. Phys. E: Sci. Instrum., **20** (1987) 1290-1292.
- 17) 中谷 登, 山田朝治, 阪部俊也: "ヘテロダイン干渉センサの非線形性の除去", 第3回光波センシング技術研究会講演論文集(光波センシング技術研究会, 1989) pp. 69-76.
- 18) 山田啓文: "技術ノート(光ヘテロダイン干渉計測技術)—非線形性誤差の低減", 応用物理, **58** (1989) 1515-1516.
- 19) W. How and G. Wilkening: "Investigation and compensation of the non-linearity of heterodyne interferometers," Progress in Precision Engineering (Springer-Verlag, 1991) pp. 1-14.
- 20) K. Oka and Y. Ohtsuka: "Polarization heterodyne interferometry using another local oscillator beam," Opt. Commun., **92** (1992) 1-5.
- 21) C. Ai and C. Wyant: "Effect of spurious reflection on phase shift interferometry," Appl. Opt., **27** (1988) 3039-3045.
- 22) J. P. Monchalin, M. J. Kelly, J. E. Thomas, N. A. Kunitz, A. Szoke, F. Zernike, P. H. Lee and A. Javan: "Accurate laser wavelength measurement with a precision two-beam scanning Michelson interferometer," Appl. Opt., **20** (1981) 736-757.