

研究

極座標表示測角干渉計

叶 盛祥*・梅田 倫弘**・高崎 宏**

* 中国科学院光電技術研究所 成都市 355 信箱

** 静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1984年2月1日受理)

Heterodyne Interferometer for Angle Measurement

Shengxiang YE,* Norihiro UMEDA** and Hiroshi TAKASAKI**

* Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica,
P. O. Box 355 Chengdu, China** Research Institute of Electronics, Shizuoka University,
3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432

Rotation angle of an optical sine-bar is determined by a heterodyne two-beam interferometer, and the phase angle of the interference is shown by the azimuthal angle of a radial arm displayed on an oscilloscope screen. Due to the adoption of digital processing, the system works without re-adjustment of the circuit despite the change of heterodyne frequency.

1. 緒 言

工業的角度測定に、サインバーによる角度設定がある。この方法では、サインバーと呼ばれる両端に円筒形接触部分をもつ棒の端を、長さの差を $l \sin \theta$ に組み合わせたゲージブロックに載せ、所望の角 θ をつくる。 l は両端の円筒の中心間長である。

この方法では、設定角度が変わるごとにゲージブロックの組替えを行わなければならない。いま、サインバー両端の位置の差を光波干渉で測定できれば、この値が $l \sin \theta$ になるようにサインバーを回すことによって所望の角をつくることができる。

2点の位置の差は、それらの位置にリトロレフレクターを置いて二光束干渉計の光路を折り返し、光波干渉の位相によって測定できる。光波干渉測定は、ヘテロダイン干渉方式によって能率的に行なえる。また、光波干渉の位相角を方位が回転する半径の方位で指示する極座標表示法^{1,2)}を用いると、「何度の方向から何回まわって何度の方向を向いている」というように、一波長以上の干渉位相変化を直観的に読み取ることができる。

そこで、干渉位相の測定を周波数安定化横ゼーマンレ

ーザー^{3,4)}を用いてヘテロダイン干渉化し⁵⁾、その結果を極座標表示する測角干渉計を試作した。この装置の原理と構造、および、この装置をきわめて小さい角度変化の測定に用い、電歪特性を測定した応用について報告する。

2. 測角干渉光学系

サインバーの両端の位置の差を光波干渉測定する測角干渉計は、測角干渉光学系、干渉位相測定、および干渉位相の表示の3部分に分けられる。

測角干渉光学系に、直角2枚合せ鏡をサインバーの両端に取り付けた系⁶⁾を用い、ヘテロダイン干渉法で位相差を測定する測角干渉計 **Fig. 1** を試作した。

光源は He-Ne 周波数安定化横ゼーマンレーザー STZL である。このレーザーは、レーザー管に加えられた横磁場の方向に振動する π 成分と、これに直角な方向に振動する σ 成分を発振する。

いま、これらの振動方向は、紙面に対し、平行と垂直であるとする。これらの成分光は実際には少し楕円化している。そこでまず、光を方位 45° のソレイユバビネ補償子 SBC に通して成分光の楕円状態を補償し、紙面に

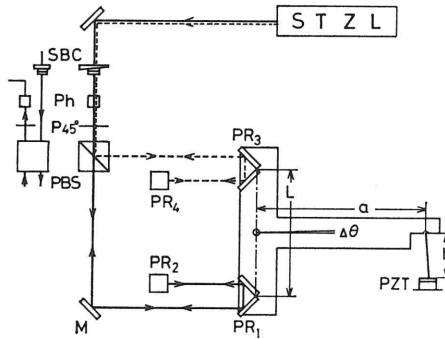


Fig. 1 Schematic diagram of a heterodyne interferometer for angle measurement.

平行・垂直の直線偏光にする。

平行振動成分は偏光ビームスプリッター PBS を通って第1の光路に入り、反射鏡 M で90°折曲げられてサインバーの一端に取り付けられた直角2枚合せ反射器 PR₁で反射され、横にずれて逆行し、稜線を紙面に平行に固定された直角内面反射プリズム PR₂で反射されて下にずれて逆行する。再び PR₁で反射された後は入射光の真下を進み、PBSを通り、45°直線偏光子 P_{45°}を通じて p-i-n フォトダイオード Ph に入る。

垂直振動成分は PBS で反射されて第2の光路に入り、第1の光路と同様に、サインバーのもう一方の端に取り付けられた直角2枚合せ反射器 PR₃を経て固定直角プリズム PR₄で反射され、入射光の真下を逆行して P_{45°}を通り、Ph に入る。

この測角光学系におけるサインバーの長さは、二つの直角2枚合せ鏡の垂直稜線の間隔である。この長さを L とすると、サインバーが垂直軸のまわりに、入射光と直角の基準方向から θ 回転したときの光路長差の変化は、サインバーの回転中心が PR₁の稜線から d の距離にあるとし、光路が折り返されていることを考えて、(1)式のように求まる。

$$\begin{aligned} 4nd \sin \theta + 4n(L-d) \sin \theta \\ = 4nL \sin \theta = N\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、n は空気の屈折率、λ は波長、N は干渉位相の変化(含端数)である。すなわち、サインバー回転中心が二つの反射器の稜線を結ぶ直線上にあれば、サインバーの回転によって生じる光路長差の変化は回転中心の位置によらない。

Fig. 1 の光学系の特徴は、サインバーが回転しても Ph に入る戻り光路がまったく動かないことである。すなわちサインバーが回転すると、PR₁と PR₂ および PR₃と PR₄を往復する光路は横にずれるが、帰路、

PR₁ および PR₃ で二度目に反射された後の光路は、入射光路の真下の位置に戻って動かない。したがって二つの戻り光路の相対横ずれも、受光器に対する位置ずれもない。測角範囲は、入射光線束が反射器に入っているかどうか、だけによってきまり、試作装置では ±20°であった。入射角がこの範囲で変化するので、サインバーに取り付けられた反射器は、PR₁, PR₃ という記号にかかわらず、内面反射プリズムでなく、直角2枚合せ鏡になっている。

PR₁・PR₃の反射偏角に差があっても、これは他の素子、PR₂・PR₄・M・PBS等の傾角調整で補償できる。しかし PR₂と PR₄の反射偏角差による二つの戻り光の伏角の差は、他素子の傾角調整では補償できない。したがって、PR₂と PR₄には角度差の小さいものを対として用いなければならない。試作装置におけるこの偏角差は10秒角以下になっている。

3. STZL によるヘテロダイン干渉位相差の測定

干渉計の二つの光路を通った光は、それぞれ(2)式のように書くことができる。

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 \cos 2\pi(\nu_1 t - n l_1 / \lambda_1) \\ A_2 &= a_2 \cos 2\pi(\nu_2 t - n l_2 / \lambda_2) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、a は振幅、ν は光周波数、λ は波長、n は空気の屈折率、l は光路の長さで、脚字は、これらの量が脚字で示された光路1または2を通る光の量であることを示す。光路1を通る光は紙面に平行な直線偏光、光路2を通る光は紙面に垂直な直線偏光である。

受光面で得られる干渉強度は、A₁と A₂の45°方向成分の和の絶対値の二乗の時間平均をとり、(3)式のように求められる。

$$\begin{aligned} I &= (1/2) \langle (|A_1 + A_2|)^2 \rangle \\ &= (1/4) \langle (a_1^2 + a_2^2) \\ &\quad + 2a_1 a_2 \cos 2\pi \{ (\nu_2 + \nu_1)t - n(l_2/\lambda_2 + l_1/\lambda_1) \} \\ &\quad + 2a_1 a_2 \cos 2\pi \{ (\nu_2 - \nu_1)t - n(l_2/\lambda_2 - l_1/\lambda_1) \} \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

第1項は定常項、第2項は二つの干渉光の光周波数の和の周波数成分、第3項は光周波数の差の成分である。(3)式における時間平均の長さは、光振動に対しては十分長い注目している変化に対しては短い長さ、と考えられているから、第2項は消え、第3項は残って、結局干渉強度の交番成分は(4)式ようになる。

$$I = (1/4) [(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos (2\pi f_b t - \delta)] \quad (4)$$

ただし、 $f_b = \nu_2 - \nu_1$ 、 $\delta = 2\pi n(l_2/\lambda_2 - l_1/\lambda_1)$ である。

すなわち干渉強度変化は、STZLの二つの光成分の光周波数の差 f_b を周波数とする余弦変化で、二つの光路に含まれる波数に違いがあると、この余弦変化の位相が δ だけずれる。すなわち、光学的な干渉位相の変化が、電気信号の位相の変化に置き換えられる。

λ_2 と λ_1 の差 $\Delta\lambda$ はきわめて小さい。すなわち、平均波長を λ 、光周波数を ν とすれば、 $f_b = \nu\Delta\lambda/\lambda$ となる。

実際の He-Ne 赤色光の STZL の値、 $\nu \approx 5 \times 10^{14}$ Hz、 $f_b = 100 \sim 1,000$ kHz に対して $\Delta\lambda/\lambda$ はたかだか 1×10^{-8} にすぎない。したがって、ほとんどの場合、(3)、(4) 式の λ_1 と λ_2 に平均の値 λ を用いてよい。

4. 干渉位相の極座標表示

干渉計の二つの光路に Δl の長さの違いがあって生じる干渉位相の変化 δ は、電気的な交番信号の位相を位相計で測定して求められる。ところが電気的な位相計は、位相角の測定範囲が $0^\circ \sim 360^\circ$ または $-180^\circ \sim 180^\circ$ に限られているために、信号の位相角が 360° 以上にわたって変化するときには、 360° ごとに指示が跳ぶ。試作した測角干渉計では信号の位相変化を、変化が 360° 以下のときは普通の電気位相計で、変化がさらに大きい場合も読み取りたい場合には、信号の位相をオシロスコープのスクリーンに表わされた回転指針の方位角で読む改良型の極座標表示方法²⁾で測定した。

干渉強度の変化分は、(4)式を展開して(5)式のように書くことができる。

$$I_a = a[\cos 2\pi f_b t \cdot \cos \delta + \sin 2\pi f_b t \cdot \sin \delta] \quad (5)$$

すなわち、位相が δ ずれた周波数 f_b の信号は、 $\cos 2\pi f_b t$ の信号を $\cos \delta$ 、 $\sin 2\pi f_b t$ の信号を $\sin \delta$ 加えたものとなっている。いま、信号 I_a を $\cos 2\pi f_b t$ が正の期間だけ取り込み、ローパスフィルターに通すと、 \cos 位相の信号は平均化されて $\cos \delta$ に比例した値になり、 \sin 位相の第2項はゼロとなる。一方、 I_a を

$\sin 2\pi f_b t$ が正の期間だけ取り込み平均化すると、第1項はゼロとなり、第2項が $\sin \delta$ に比例した値になる。 $\cos \delta$ と $\sin \delta$ が求めれば、これらの値をオシロスコープの x 軸と y 軸に加え、輝点の方位角で δ を表示できるであろう。この考えに基づく極座標表示系を Fig. 2 に示す。

STZL は、発振光を通して得られる二つの発振成分の光ビート周波数 f_b を一定に保つよう制御されている。したがって、 $\cos 2\pi f_b t$ の位相基準信号は、STZL の制御回路から取り出す。

位相基準信号を増幅し、ゼロを切る時点を検出し、COMP で TTL レベルの方形波に変換する。この方形波の周波数を、位相同期ループ $\times 4 \cdot \text{PLL}$ を用いて4倍する。この4倍周波数方形波で遅延型フリップフロップ DFF の同期をとり、4倍周波数方形波の1周期だけ位相がずれた、基本周波数の二つの方形波をつくる。位相が4倍周波数方形波の1周期ずれているということは、基本周波数について考えれば $1/4$ 周期位相がずれている、ということになる。すなわち、この1組の方形波は、 \cos 位相と \sin 位相の基準方形波である。

干渉計から得られる信号は、自動利得調整増幅器 AGC-AMP で一定振幅に増幅し、基準方形波で開閉されるゲイトを通して積算する。(5)式を \cos 位相方形波で開閉されるゲイト C-GATE で積算すると $(1/\pi)\cos \delta$ 、 \sin 位相で開閉されるゲイト S-GATE で積算すると $(1/\pi)\sin \delta$ となるから、これらと、別に用意した三角波発振器 $\Delta\text{-OSC}$ の出力とを掛算して最大値が $\cos \delta$ と $\sin \delta$ に比例した三角波をつくり、第1の三角波をオシロスコープの x 偏向端子に、第2の三角波を y 偏向端子に加えて輝線を呈示する。この輝線指針の方位が、干渉の位相角 δ となる。

この輝線指針の写真を Fig. 3 に示す。

(a) が輝線指針、(b) が蓄積型のオシロスコープを用いて輝線指針の動きを蓄積表示した結果である。輝線指

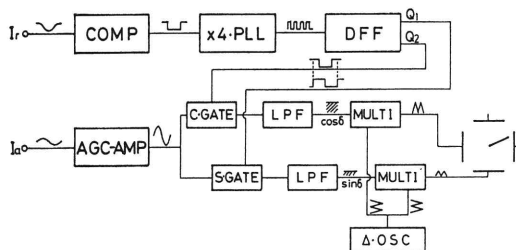


Fig. 2 Block-diagram of the digital system which displays the phase angle of an optical interference by the azimuthal angle of a radial arm.

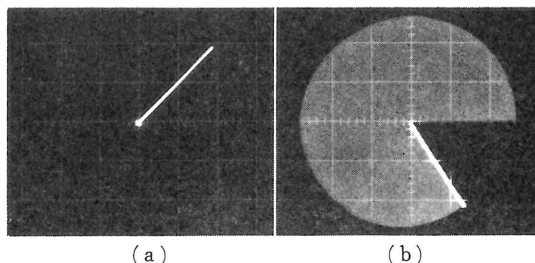


Fig. 3 The radial arm displayed on an oscilloscope screen (a), and its trace (b).

針が回転した跡がきれいな円になっていることから、干渉信号増幅器の自動利得制御がよく働いていることが知られる。

ソレイユ・バビネ補償子を用いて直交偏光成分に安定な位相差を与えて極座標表示の精度を検定したところ、一波長にわたる指示の直線関係からの偏差は $\pm 2^\circ$ 程度、同一位相差の繰返し表示のばらつきは、角度で 0.1° 程度であった。繰返し示のばらつきは与えた位相差のばらつきで、極座標表示そのものはより安定であった。

5. デジタル化による極座標表示の性能改善

われわれは先に、位相の直交した一組の位相基準信号対を、RC回路で位相をずらしてつくった一組の位相直交基準信号を用いて、信号の方位角を極座標表示する方法について発表している¹⁾。しかしこの方法は調整が微妙で、 f_b 周波数が変わると回路の再調整が必要であった。これに対し、ここに報告した方法は、調整が簡単で、 f_b 周波数が変わっても再調整を必要としない。これは、デジタル回路を採用することによって、基準信号対の位相直交関係が正確に固定され、 f_b 周波数によって変化しないからである。

直交方形波対は、4倍周波数方形波で遅延型フリップフロップを制御することにより作られている。Fig. 4は位相同期周波数4倍回路のブロック図である。電圧制御発振器 VCO の発振周波数をフリップフロップ回路

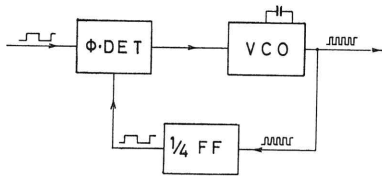


Fig. 4 Block diagram of a frequency multiplier by the use of a phase locked loop.

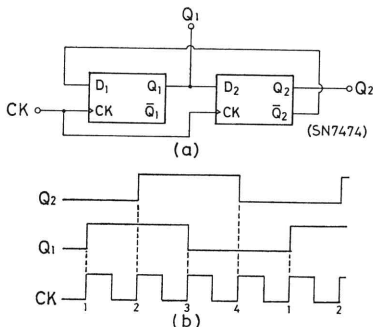


Fig. 5 Block diagram of composition (a) and operation (b) of a delayed flip flop circuit.

(1/4)・FF で4分周し、位相比較器 $\phi \cdot \text{DET}$ で入力方形波の位相と比べ、位相同期が保たれるよう VCO の制御電圧を調整する。このループが閉じているとき、VCO の発振方形波は、周波数が入力方形波の4倍で位相が同期している。

この関係は入力方形波周波数が1~3の比で変化しても保たれる。方形波発振周波数は、VCO用IC外付キャパシターによって変更でき、これを200~600 kHzに選んでおけば、ほぼ、どの STZL をもってきても f_b を正確に4倍にできる。

Fig. 5は遅延型フリップフロップの回路と動作図である。IC SN 7474は、CKが0から1に立ち上がるときDに入っている状態をQに出力し、そのNOTを \bar{Q} に出力する4端子素子を2個内蔵し、これらが(a)のように結ばれている。

第2の素子の入力端子 D_2 は第1の素子の出力端子 Q_1 に接続されているから、何かの状態変化が Q_1 に生じれば、次にCKが立ち上がる時、 Q_2 には同じ変化が生じる。一方、第1の素子の入力端子は第2の素子の出力端子 \bar{Q}_2 に接続されているから、 Q_2 にある変化があった後は、次にCKが立ち上がったとき、 Q_1 に逆の変化が生じる。

したがって、 Q_1 も Q_2 もゼロのときから始まってCKに4倍周波数方形波が加えられるとすれば、 D_1 は \bar{Q}_2 に接続されて1になっているから、CKが最初に立ち上がると Q_1 が1になり、2回目にCKが立ち上がると Q_2 が同じ変化をして0から1になり、CKが3回目に立ち上がると Q_1 が Q_2 と逆に1から0となり、4回目にCKが立ち上がると Q_2 が Q_1 の変化をならって1から0になる。この変化を繰り返して、 Q_2 の出力は Q_1 の変化を4倍周波数方形波の1周期、すなわち基本周波数方形波を1/4周期遅らせたものとなる。この1/4周期の位相ずれは、位相基準方形波の周波数4倍化さえ確実にできていれば、 f_b 周波数にかかわらず正確に保たれる。これがデジタル化によって極座標表示の動作が確実になり精度が改善された理由である。

6. 電歪磁器の特性測定

サインバーに取り付けられた腕の先端を、押し棒を介して電歪磁器で押し、電歪特性を測定した。

腕の長さを a 、電歪磁界の伸びを Δh とし、(1)式の $\sin \theta$ に $\Delta h/a$ を代入して(6)式を得る。

$$\Delta h = (\lambda a / 4nL) N \tag{6}$$

干渉位相の変化1波長当りの歪量を与える係数は、要

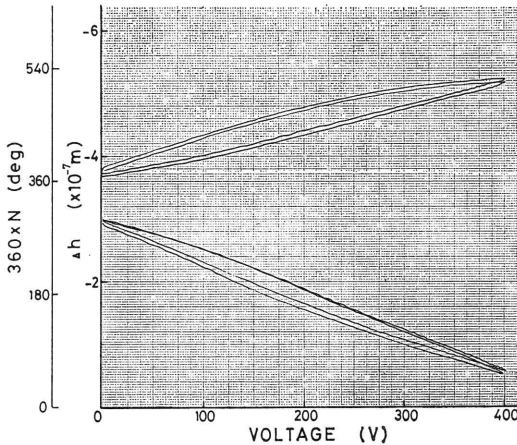


Fig. 6 Electro-striction characteristics of a PZT unit made of material M.

素の寸法を測定して求められるが、腕の先端に既知の変位を与え、数波長にわたって N を測定し、装置定数として求めるほうが正確である。極座標表示を用いてこの較正を行ない、電歪特性を測定した。

Fig. 6, 7 はメーカーで S・M と仕分けられた材料で作られた試料の測定結果で、どちらも上へ縮み、下へ伸びを示す。S材は電歪量は大きいがヒステリシスも大きく、また、伸びと縮みの特性が異なる。M材は、電歪歪の直線性がよく、ヒステリシスが少なく、伸びと縮みの特性差も小さい。電歪量はS材と大差ない。

7. 結 び

Fig. 1 の測角干渉光学系は戻り光路の横ずれがないということのほか、固定プリズムを加えて光路の折返し回数を増すことができるという利点をもっている。また、反射に対する入射面が水平または垂直で斜めに傾いていないから、成分光の直線偏光状態が損なわれない。これは、ヘテロダイン干渉に二周波直交偏光を利用するときには、非常に有利な条件となる。

応用例は、 $\sin \theta = \theta$ とみなせる角度範囲の測定にとどまっている。これは、零点（光学的サインバーが入射光線に対して直角になる方向）の決定が、光波干渉を導入して得られた高い角度分解能を活用するに十分な精度で

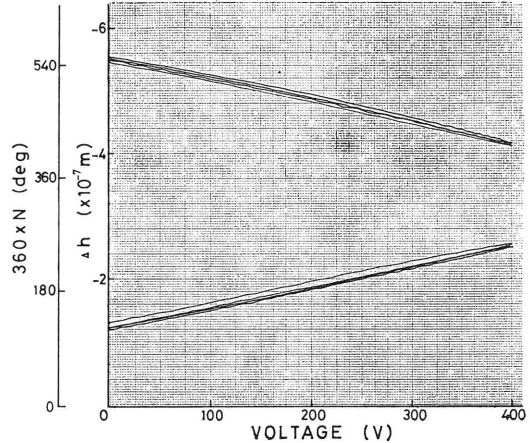


Fig. 7 Electro-striction characteristics of a PZT unit made of material S.

は行なっていないためである。光学的サインバーの性能を極限まで活用するためには、この零点の決定方法についてさらに検討する必要がある。微小測角計とみたとき、この装置の測角感度は、Fig. 6, 7 に示した電歪特性測定の場合、1干渉次数当り約0.2秒角になっており、0.02秒角の変化でも極座標表示によって時計文字盤上で5分以上の変化になるので、容易に目視で読み取ることができる。

応用例は、直線変位を光波干渉で測定するとき、測定感度を適当に調整する例ともなっている。この測定の直線性は、サインバーを直線変位で回転させるのに、Fig. 1 のように腕の長さを一定に保った sin 型の変換機構を用いれば、広い角度範囲にわたって保たれる。

文 献

- 1) N. Umeda and H. Takasaki: Appl. Opt., **20** (1981) 723.
- 2) N. Umeda, H. Shirai and H. Takasaki: Rev. Sci. Instrum., **55** (1984) 158.
- 3) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: Appl. Opt., **19** (1980) 442.
- 4) 高崎 宏, 梅田倫弘: レーザー研究, **9** (1981) 11.
- 5) H. Takasaki, N. Umeda and M. Tsukiji: Appl. Opt., **19** (1980) 435.
- 6) 胡 国璜: 全国角度計量測試技術學術討論會, 九江 (1981).