

# 一种新型外差光纤陀螺

彭纲定 黄上元 林宗琦  
(上海交通大学电子工程系)

## 提 要

本文提出了一种采用电光移频器和高双折射光纤构成的新型外差检测方式的光纤陀螺方案。它既能改善通常外差光纤陀螺中存在的光路非互易性且无需使用声光器件,又能避免采用高双折射光纤的直接检测光纤陀螺中电子线路直流漂移的影响。初步实验的结果显示出该系统具有良好的定标因子线性度。

关键词: 光纤陀螺。

## 一、引 言

外差型光纤陀螺之所以受到重视,是由于它在大动态范围下具有良好定标因子线性度以及信号处理的简便性。已有报道的几种外差光纤陀螺方案中<sup>[1,2]</sup>,存在一定的光路非互易性,并需要使用声光移频器件,这都给系统带来一些问题。Jackson等人<sup>[3]</sup>提出了一种采用高双折射光纤实现偏振模式选择方式的光纤陀螺结构,可改善光路的互易性,但它是一种直接信号检测系统,容易受系统中电子线路直流漂移的影响,且不能象外差系统那样便于信号处理及获得很高的灵敏度。此外,其定标因子的线性度也不理想。

本文运用光外差干涉系统中通常采用的旋转波片技术<sup>[4~7]</sup>于高双折射光纤的系统,构成一种新型外差光纤陀螺。这种结构利用了高双折射光纤的保偏特性以使系统在旋转波片技术要求的偏振模式选择方式下有稳定的输出特性。它使光路系统具有良好的互易性,且免除了声光移频器件。而外差检测方式则消除了电子系统中直流漂移的影响。

考虑到旋转波片方式带来对系统的机械扰动,且不利于系统的小型化、固态化。根据Kaminov等人<sup>[8]</sup>和Buhner等人<sup>[9]</sup>提出的原理,设计具有三重轴对称性的晶体LiNbO<sub>3</sub>晶体用它做成的电光移频器在外加旋转电场下能等效地构成机械旋转波片。

## 二、采用旋转波片技术的外差光纤陀螺

利用旋转波片技术可将文献[3]报道的直接检测光纤陀螺构造为一种新型外差光纤陀螺,如图1所示。图中虚线以上的光路与文献[3]同,而虚线以下的部分,则是新结构所要引入的。我们采用了电光移频器等效旋转波片以实现偏振模式选择方式下的外差检测。从激光源输出的光经过起偏方向与水平成45°角的起偏器P<sub>1</sub>,被偏振分光棱镜PBS分为水平和垂直方向上的相互正交的偏振光,分别从高双折射光纤的两端头耦合入纤。光纤的A端和B端有相对90°的扭转,以使从两端入纤的两正交线偏振光只激发光纤的同一个偏振本

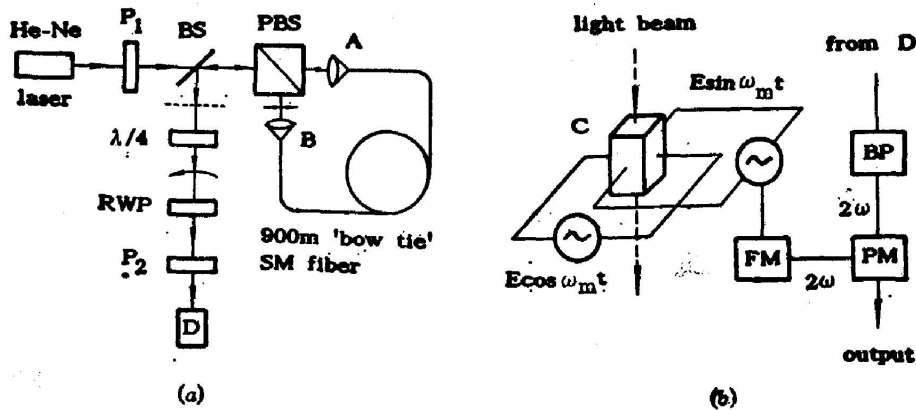


Fig. 1 Schematic diagrams of the gyroscope configuration

- (a) Using a rotating wave plate as its frequency shifter. BS, beam splitter; PBS, polarization selective beam splitter; \$P\_1\$, polarizer; \$P\_2\$, analyzer; D, detector;  
 (b) Using a LiNbO<sub>3</sub> crystal C as its frequency shifter instead of the RWP in Fig. 1(a). FM, frequency multiplier; BP, bandpass filter; PM, phasemeter

征模式, 这就是利用高双折射光纤偏振保持特性的偏振模式选择方式, 它使从 A 端入纤的顺时针方向 (CW) 波成为水平方向偏振光从 B 端输出, 经分光镜 BS 进入虚线下面的光路。同样, 从 B 端入纤的逆时针 (CCW) 波成为垂直方向偏振光从 A 端输出, 经 BS 进入虚线下面的光路。显然, 进入虚线以下光路的顺时针方向波和逆时针方向波分别保持为水平和垂直方向的线偏振光, 在光路互易条件下, 它们之间的相位差由 Sagnac 效应决定。当这两线偏振光经与水平成 45° 角放置的 \$\lambda/4\$ 波片变换为左、右圆偏振光, 再通过一相位延迟差为 \$\delta\$ 的波片后, 可分别表达为

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{ea} \\ V_{ey} \end{bmatrix} &= \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} e^{i(\omega_m t + \alpha)}, \\ \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{ry} \end{bmatrix} &= \frac{b}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega_m t}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 \$V\_{ea}\$、\$V\_{ey}\$ 和 \$V\_{ra}\$、\$V\_{ry}\$ 分别为左、右圆偏振光的场分量; \$\varphi\$ 为波片的瞬时方位角; \$\alpha\$ 为两波之间的相位差也即 Sagnac 相位; \$a\$、\$b\$ 为两光波的振幅。

由式 (1) 表达的两光波通过方位角为 \$\psi\$ 的检偏器 \$P\_2\$ 后, 到达探测器 D 的光强可表为

$$I = |(V_{ea} + V_{ra}) \cos \psi + (V_{ey} + V_{ry}) \sin \psi|^2. \quad (2)$$

直接对上两式进行推导并化简, 可得

$$\left. \begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3, \\ I_1 &= \frac{1}{2} [a^2 + b^2 - ab(1 + \cos \delta) \sin(\alpha - 2\psi)], \\ I_2 &= \frac{1}{2} (a^2 - b^2) \sin \delta \sin(2\varphi - 2\psi), \\ I_3 &= \frac{1}{2} ab(1 - \cos \delta) \sin(4\varphi - \alpha - 2\psi). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当波片以 \$(\omega\_m/2)\$ 的角频率旋转, 即 \$2\varphi = \omega\_m t\$ 时, (3) 式中 \$I\_1\$ 对应光强中直流分量; 而 \$I\_2\$ 和 \$I\_3\$ 对应光强中交流分量, 分别为频率 \$\omega\_m\$ 的基频和倍频项。根据 (3) 式待测相位差 \$\alpha\$ 已

从光频相位转移到低频的  $2\omega_m$  项之中, 可由对倍频项的相位测量得到, 从而确定陀螺的转动速度。相位测量与幅度无关, 因此只要使  $I_s$  幅度足够大, 对  $\delta$  的取值并无特殊要求。

### 三、电光移频器(电光频率调制器)

本文采用电光移频器取代机械旋转波片可完全避免诸多复杂传动机构等一系列问题。参照文献 [9] 的分析, 我们让光沿  $\text{LiNbO}_3$  晶体的三重轴(即  $z$  轴)传播。由晶体对称性可知, 未加外电场时晶体的折射率椭球在垂直三重轴的截面上为圆, 即沿三重轴方向晶体无本征双折射。在垂直三重轴的方向(即  $X, Y$  方向)上加电场  $E_x = E_m \sin \omega_m t$  和  $E_y = E_m \sin \omega_m t$ , 则折射率椭球垂直于三重轴的切面成为椭圆, 且可证明此椭圆以角频率  $(\omega_m/2)$  沿与外加电场旋转相反的方向旋转。这种情况说明  $\text{LiNbO}_3$  晶体在旋转外电场作用下可以起到一个机械旋转波片的作用。由电光效应有关公式, 此种电光晶体等效旋转波片的相位延迟差  $\delta$  可推得为

$$\delta = 2\pi l \bar{r} E_m n_0^3 / \lambda, \quad \bar{r} = \sqrt{r_{11}^2 + r_{22}^2}, \quad (4)$$

式中  $l$  为晶体厚度;  $r_{11}$ 、 $r_{22}$  为晶体的电光系数; 对  $\text{LiNbO}_3$  晶体,  $r_{11} = 0$ , 因此  $\bar{r} = r_{22}$ 。如图 1(b) 所示, 我们在用作移频器的  $\text{LiNbO}_3$  晶体上放置了两对相互正交的电极, 因此可同时加上横向电场  $E_x$  和纵向电场  $E_y$ 。在采用了这样的电光移频器取代机械旋转波片之后, 我们就构成一个全电子器件外差光纤陀螺。

### 四、实验及结果分析

至今, 尚未见到用电光移频器用来测量光频相位的报道, 我们的实验分两步进行。

首先, 为了检验采用电光移频器于外差干涉系统中测量左、右圆偏振光之间相位差的精确度, 实验安排如图 2 所示, 图中激光输出的线偏振光可通过改变  $(\lambda/2)$  波片的方位来改变偏振方向。由偏振光的性质可知, 线偏振光可认为是幅度相等, 但有一定位相差的左、右圆偏振光的合成, 一定的线偏振光方位角改变对应于两圆偏振光之间一定的相位差改变。因此, 通过改变  $(\lambda/2)$

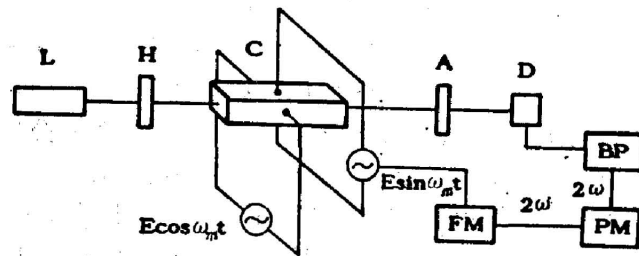


Fig. 2 Experimental set-up of the  $\text{LiNbO}_3$  electro-optic frequency shifter. L, He-Ne laser; H, halfwave plate; C,  $\text{LiNbO}_3$  crystal; A, analyzer; D, detector; BP, bandpass filter; FM, frequency multiplier; PM, phasemeter

波片方位可得到两圆偏振光之间的任意大小相位差。在实验中, 外加电场频率为  $1\text{kHz}$ 。由 (3) 式可知, 待测相位包含在信号光强度  $I_s$  项中, 此时  $4\varphi = 2\omega_m t$ , 即  $I_s$  为  $2\text{kHz}$  频率项。这里要指出,  $(\lambda/2)$  波片方位角改变  $1^\circ$  将对应两圆偏振光之间相位差改变  $4^\circ$ 。图 3 是  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器用于外差干涉系统位相测量的实验结果, 图中给出了系统相位测量值与

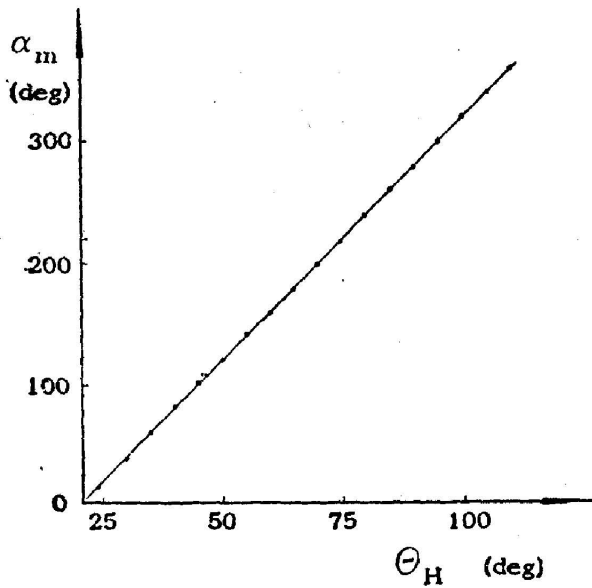


Fig. 3 Relation between the azimuth reading  $\Theta_H$  of the halfwave plate  $H$  and the phase  $\alpha_m$  measured by the phasemeter

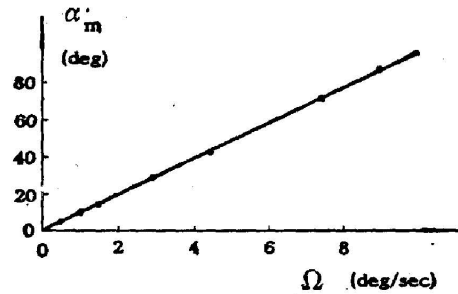


Fig. 4 Measured phase value  $\alpha_m$  versus the rotating rate  $\Omega$  of the gyroscope. The solid line denotes the ideal line, the dots indicate measured values

( $\lambda/2$ )波片方位角之间的关系曲线。实验值表明采用  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器可达到很好的相位测量精度和线性度。此实验结果精度已为 ( $\lambda/2$ ) 波片方位角读数精度所限制。

然后, 我们对  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器实际用于第二节提出的外差陀螺系统进行了实验。实验装置见如图 1, 图 1(a) 为基本光路, 但其中机械旋转波片用图 1(b) 中所示的  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器代替, 系统中信号检测部分包括在图 1(b) 中。加到  $\text{LiNbO}_3$  晶体上的两横向电场, 同上面的实验一样, 保持  $90^\circ$  的相位差和相等的幅度。光探测器  $D$  的输出经带通滤波器  $BP$  取出  $2\text{kHz}$  分量到相位计  $PM$  进行信号相位测量。倍频器  $FM$  用来倍频信号源输出的调制信号, 以送入  $PM$  作为相位测量参考。图 4 给出了我们所提出的外差光纤陀螺系统中 Sagnac 相位测量值与陀螺转动速率之间关系。实验结果显示出系统具有良好的定标因子线性度。在此初步实验中, 我们尚未引入用以保证系统严格光路互易性的空间滤波器。进一步实验我们考虑加入空间滤波器和采用微光学器体, 以降低零漂和使系统小型化。

## 五、结 论

(1) 本文提出了应用旋转技术到采用高双折射光纤的直流检测光纤陀螺系统, 构造一种新型外差光纤陀螺。此种方案较之通常的外差光纤陀螺系统, 可改善光路互易性, 且避免了声光移频器件的使用。此外, 本系统的外差检测方式避免了电子线路直流漂移对系统的影响, 并且在大动态范围下具有良好的线性定标。

(2) 考虑旋转波片技术本身的机械复杂性及机械噪声等带来的一系列问题, 我们设计了  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器, 用来代替上面提出方案中的机械旋转波片, 构成一全固态和全

电子器件的外差陀螺系统。

(3) 实验结果显示了采用电光移频器的外差干涉系统可获得良好的相位测量精度。在应用  $\text{LiNbO}_3$  晶体电光移频器到本文提出的外差光纤陀螺的实验中, 显示出系统有良好的定标因子线性度。

### 参 考 文 献

- [1] B. Culshaw, I. P. Giles, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 690.
- [2] K. Hotate *et al.*; *Opt Lett.*, 1982, **7**, No. 7 (Jul), 331.
- [3] D. A. Jackson *et al.*; *Electron. Lett.*, 1984, **20**, No. 10 (May), 399.
- [4] R. Crane; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, 538.
- [5] G. E. Sommargren; *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**, 960.
- [6] R. N. Shagam, J. C. Wyant; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 3034.
- [7] H. Z. Hu; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 12 (Dec), 2052.
- [8] I. P. Kaminov, E. H. Turner; *Appl. Opt.* 1966, **5**, No. 10 (Oct), 73.
- [9] C. F. Buhner *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1962, **1**, No. 1, 46.
- [10] G. L. Rogers; *«Noncoherent Optical Processing»*, (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977).

## A new kind of heterodyne fiber-optic gyroscope

PENG GANGDING, HUANG SHANGYUAN AND LIN ZONGQI

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University)

(Received 9 October 1986)

### Abstract

In this paper, a novel fiber-optic heterodyne detection technique of rotation rate is described. Using electro-optic frequency shifter and highly birefringent single-mode fiber, the heterodyne fiber-optic gyroscope system no more needs the use of acousto-optic devices and is free from the direct-current drift in the electronics. In addition, the reciprocity of the optical path in the system is improved. Preliminary experiments have shown a good linearity of the scale factor.

**Key Words:** Fiber-optic gyroscope.