

四频差动激光陀螺的研制与进展

曾 明

(国防科技大学应用物理系, 长沙, 410073)

摘要: 四频差动激光陀螺原理先进, 特别是在消除低转速时的闭锁效应方面具有独特的优点, 因而具有强大的生命力, 现已成为美国两个主要陀螺公司之一的利顿公司的第二代激光陀螺。在国内, 四频差动激光陀螺的研制已经成功地走过了原理样机和实验室样机两个阶段, 目前正在进行工程化攻关。本文从四频差动激光陀螺的原理和特点出发, 简要介绍近年来国内外四频差动激光陀螺的研制动态, 对四频差动陀螺的各种新方案和新进展进行了分析

The study and progress in four-mode differential ring laser gyro

Zeng Ming

(Dept. of Applied Physics, National University of Technology)

Abstract: The Four-mode Differential Ring Laser Gyro (FDRLG) has advanced principles and a special advantage of eliminating the lock-in effect which occurs at low rotation rates. As a result of its great vitality, FDRLG has become the coming generation laser gyroscope of Litton System Inc., one of the main companies of gyroscope in USA. The study and manufacture of FDRLG, conforming to the conditions of our country, have successfully gone through two stages of principle and experimental specimen machines, and now have got into engineering stage. The practical FDRLG will be made by us in the near future. Proceed from the principle and characteristic of FDRLG, this paper introduces the study and progress of FDRLG at home and abroad. Many of new schemes and new advances of FDRLG are especially analysed.

发 展 和 近 况

激光陀螺的原理可追溯到古老的Sagnac效应——闭合的环形光路具有敏感角度旋转的能力。只是到了激光出现以后, 人们利用光学谐振腔和测量拍频的现代电子技术, 才促成了作为惯性导航的理想器件——激光陀螺的诞生。然而, 即使是在发达国家里, 激光陀螺的研制也经历了相当艰难曲折的过程, 原因就在于激光陀螺存在多种误差因素。其中最主要的拦

路虎，乃是所谓的“闭锁效应”——当陀螺随物体的转动速率低到某一个范围以下时，其输出的拍频闭锁为零，因而再也无法得到关于物体的转动信息（见图1）。

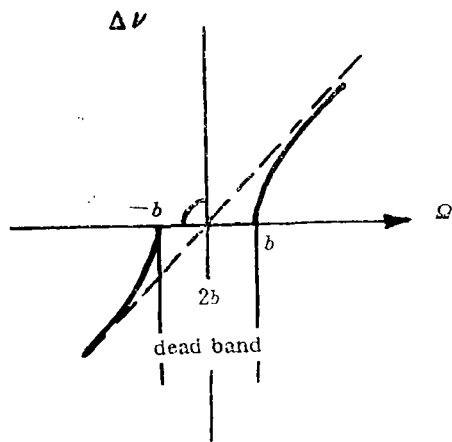


Fig.1 Beat note vs input rotation rate in a ring laser gyro

The dashed line shows the ideal case. The solid line shows the real case with frequency locking

陀螺偏频方案的探求。比如，用交变的磁光效应产生等效的交变角速度来偏频，可以代替机械抖动偏频，这就是目前还在研制中的磁光交变偏频激光陀螺。与其类似的另一条途径是，人们提出用光学元件的非互易效应替代恒定机械转动来实现恒定偏频。其中最典型的方案就是法拉弟室。但是很可惜，磁场和温度的影响使得这种偏频量比恒定机械转动更难保证其高度稳定性。在这种情况下，一种叫做四频差动激光陀螺（以下简称FDRLG—Four-mode Differential Ring Laser Gyro）的方案就应运而生了。它是设想在一个陀螺腔体内同时运行两个单陀螺总共四个频率的光束，每个单陀螺都从同一个法拉弟室获得相同的恒定偏频量，然后再利用差动法将两个单陀螺的拍频输出信号相减，从而消去了偏频量（这样，偏频量的稳定性就不那么紧要了），得到纯粹反映陀螺随飞行物体的转动信息。经多年探索，最后利用在谐振腔里产生圆偏振光的技术获得了成功。

很显然，FDRLG的突出优点是它对闭锁效应处理得很好。从原理上来说，由于使用圆偏振光，在同样均匀性的反射片条件下，FDRLG比单陀螺的锁区要小得多（小1~2个数量级）。从本质上来说，FDRLG是一种恒定偏频陀螺，工作时远离锁区，所以比例因子恒定性和线性度都非常好。在技术上，FDRLG是利用光学效应来实现恒定偏频的，其内部绝无活动部件之虑。它又是一种双陀螺，采用差动原理将恒定偏频量从陀螺输出信号中消去，因此它不象单陀螺那样对偏频量的稳定性有极苛刻的要求。

另外，与机械抖动偏频单陀螺相比，FDRLG的电路简单得多，除供电电源外无需复杂的外部电路，因为它不要外部解调，只需要定时可逆计数，将信号直接输给导航计算机。

FDRLG的缺点主要是在工艺上，比如腔内置有光学元件，增加了损耗，还存在安装结

人们对引起闭锁效应的物理机制已经作了深入的研究，并且提出了各种缩小闭锁区的措施，但是毕竟不可能完全消除它。目前普遍采取频率偏置（简称偏频）的辅助措施来使陀螺避开锁区，并尽可能工作在线性区域。正是由于偏频方案的不同，才发展出多种类型的激光陀螺，比如机械抖动偏频陀螺，恒定机械转动偏频陀螺，磁光交变偏频陀螺，以及四频差动陀螺等等，并且至今还在不断发展与革新之中。

机械抖动偏频陀螺是第一种进入实用的激光陀螺，恒定机械转动偏频陀螺是目前精度最高的激光陀螺。它们自然各有自己的特点。而其共同的缺点是他们都包含机械活动部件，因而都不能称之为真正的全固态光学陀螺仪。很久以来，人们为了彻底丢掉活动部件，进一步提高激光陀螺抗冲击、振动以及其它方面的性能，一直没有停止过对新的

构的稳定性问题，有些FDRLG方案还需要采取严格的纵向磁屏蔽工艺等等。在一段时期里，这些缺点被看得很严重，加上美国几家搞FDRLG的陀螺公司在早期的竞争中失利而先后下了马。这种令人沮丧的局面不能不影响到FDRLG的研制和发展。在一些国家里，FDRLG方案一度无人问津，有人散布说FDRLG没有成功的希望。直到1986年，美国两家最大的陀螺公司之一的Litton公司在它的年度报告中宣布，它们的FDRLG实验室样机研制成功，为内腔型，性能优于 $0.01^\circ/h$ 的机械抖动偏频陀螺，现已成为该公司的第二代激光陀螺。这才促使一些人们开始重新认识和评价FDRLG，一些陀螺公司恢复了对FDRLG的研究，有关FDRLG的新方案和新进展也时有专利报道。

在我国，国防科技大学高伯龙教授最早对FDRLG进行了深入的有独创性的理论研究和实践探索。在他的指导下，FDRLG已经成功地走过了原理样机和实验室样机两个研制阶段，目前正在进行工程化攻关。FDRLG必将以其独特的优点和良好的性能，日益受到广大用户的关注和欢迎。

FDRLG的几种方案

前已述及，FDRLG是在一个陀螺腔体里运行着两对逆顺方向的光束，每一对逆顺光束组成一个二频单陀螺（分别记为A陀螺，B陀螺）。对它们施加相同的偏频量 $\Omega_{偏}$ 后，当有输入转速 $\Omega_{转}$ 时，若A陀螺的信号相当于总有效转速 $(\Omega_{偏} + \Omega_{转})$ ，则B陀螺信号为 $(\Omega_{偏} - \Omega_{转})$ 。然后，A，B两陀螺信号进行差动，可以将 $\Omega_{偏}$ 消除，即：

$$\Delta\nu_{拍,A} = s \cdot (\Omega_{偏} + \Omega_{转})$$

$$\Delta\nu_{拍,B} = s \cdot (\Omega_{偏} - \Omega_{转})$$

$$\begin{aligned} \Delta\nu_{拍} &= \Delta\nu_{拍,A} - \Delta\nu_{拍,B} \\ &= 2s \cdot \Omega_{转} \end{aligned}$$

式中， s 为单陀螺的比例因子。可见FDRLG的比例因子为单陀螺的两倍，即灵敏度比单陀螺提高了一倍。

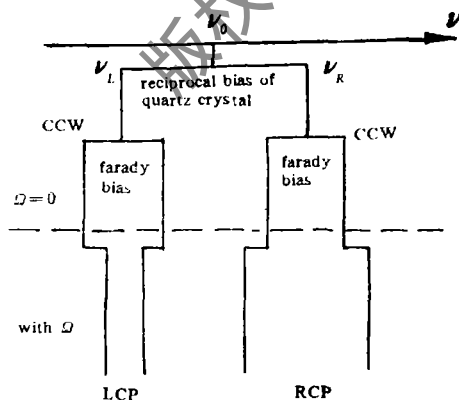


Fig.2 Mode spectrum of a FDRLG

实现上述FDRLG的方案有很多种，近年来还不断有人在进行新的探索。目前国内外公认能够达到高精度的一种基本方案是左右旋法拉弟陀螺。这种陀螺的结构是：在由四个反射片组成的谐振腔内放置两个光学元件：一是水晶片，利用水晶的旋光效应产生具有一定频率间隔的左旋对模和右旋对模，即形成左右旋两个单陀螺；二是法拉弟室，利用加纵向磁场的法拉弟磁光效应为每个单陀螺提供相同的恒定偏频量。两个光学效应的联合作用的结果，得到如图2的模频谱图。

这种FDRLG一出世就具有较好的精度，是因为它的原理先进，人们对它的研究和探讨也比较深入，其前景远大。它的难点在于腔内

元件较多, 还有磁屏蔽问题, 缩小体积的问题等等。

为了减少腔内元件, 近年来有两个方面的研究特别引人注目。一是发展非平面型谐振腔用以取代水晶片。这方面的研制进展很快。据报道, Litton公司的第二代激光陀螺LG2432就是采用非平面四边形光路。其中一种可能的结构如图3所示。它是将微晶玻璃腔体加工成斜菱四方体, 相当于将平行四边形沿对角线折过某个角度形成一个二面角。然后在其四个顶角上安装反射镜片, 各镜片的法平面将互成一定角度, 它们将造成在其间传播的左右旋圆偏振光的频率分裂, 形成左旋单陀螺和右旋单陀螺。

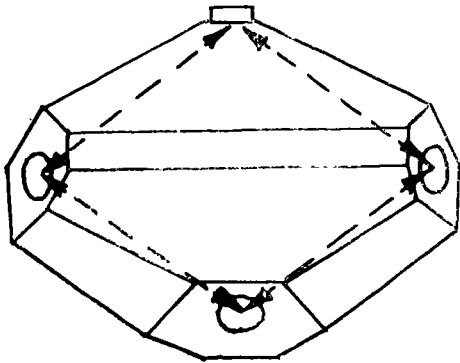


Fig. 3 The isometric view of a out-of-plane embodiment

在光路外绕上线圈, 对腔内增益介质施加纵向磁场, 形成法拉弟偏频。不过这种左右旋塞曼陀螺方案在原理上存在多种影响零漂的误差因素。而且由Zeeman效应产生的偏频量对于激光陀螺的某些应用是不够的。

有人针对上述左右旋塞曼陀螺的缺点, 发明了一种正负旋塞曼陀螺。它是加纵向磁场于腔内增益介质, 利用不同 q 的相邻纵模产生正负旋陀螺。然后利用水晶片产生左右旋偏裂作为恒定偏频量。其频谱图如图4所示。

还有一种称为“光学自偏频”(Optical Self-Biased)的FDRLG方案, 乃是利用多模非线性耦合效应, 也能达到减弱以至完全消除闭锁现象的目的。为此, 对环形激光器采取高激发度, 使谐振腔内除了运行一对强的线偏振模之外, 还产生一对弱的线偏振模。其中一对强模作为陀螺信号, 而另一对弱模则作为“光学抖动”信号。这时, 陀螺输出拍频信号表示式可推导为:

$$\Delta\nu_{拍} = s\Omega - b_s \cos\beta_s \sin\varphi_s - c \sin(\omega_d t + \varphi_N) \quad (2)$$

此式类似于前面的机抖偏频陀螺的输出拍频表示式(1), 其中的 $c \sin(\omega_d t + \varphi_N)$ 便是

比如, 当镜片的法平面间互成 15° 角度时, 理论计算和实验结果都表明, 在其间行进的左右旋圆偏振光的频率分裂约为70MHz。一般FDRLG的左右旋圆偏振光频率裂量在100~1000MHz之间, 再加上法拉弟室约1MHz的偏频量(视实际需要而定), 将能够圆满地解决闭锁效应问题。

非平面型FDRLG的腔体加工比较复杂, 其光路对准也较困难。但它省去了重要的腔内元件——水晶片, 这对提高FDRLG的精度, 以及实现工程化大有益处。

另一方面研究方案则是去掉法拉弟室, 采用Zeeman效应实现恒定偏频, 即直接

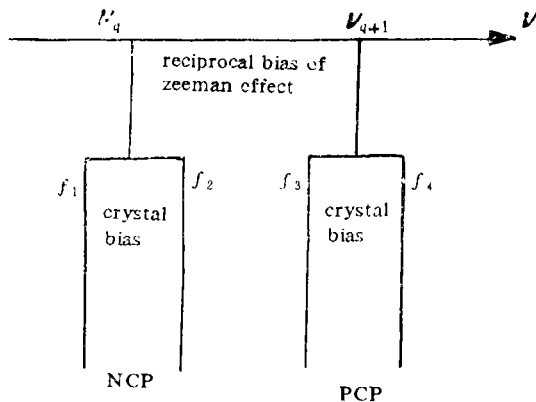


Fig. 4 Mode spectrum of a Zeeman laser gyro with PCP and NCP

“光学抖动项”，式中， c 是振幅因子， ω_d 是一对弱模间的频裂量， φ_N 是与陀螺几何尺寸有关的位相因子，不过它不是由外部机械振荡部件引起的，而是谐振腔内多模耦合形成的光学自偏频。

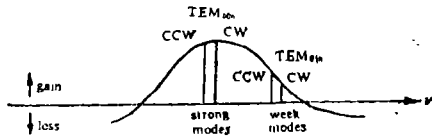


Fig.5 The mode spectrum of a self-biased laser gyro

有关多模耦合自偏频的物理机制迄今还没有完全揭示清楚。但是可以预言，一旦将它的复杂理论研究透彻之后，将引出一种前所未有的，最简单可行的光学自偏频型FDRLG，它具有十分诱人的应用前景——既不含机械活动部件，也没有任何腔内元件，并且不用外加磁场，还不需要复杂的非平面谐振腔结构。

FDRLG的关键技术

近年来，除了探索FDRLG的新方案以外，人们还同时围绕FDRLG的各个关键技术进行攻关研究。

在众多的关键技术中，镀膜技术首当其冲。不论对哪一种陀螺方案都如此。根据国内外激光陀螺研制数十年的经验教训，得出的共识是：依靠商品膜片是作不成可用的激光陀螺的。国外的陀螺公司无不拥有它们自己最保密的镀膜车间，并且都在花大气力发展最先进的镀膜技术。比如离子溅射和离子辅镀技术，低压反应离子镀技术，以及各种实时监控和测试手段。当今高精度激光陀螺用的膜片性能已达到吸收损耗小于40ppm，散射损耗小于10ppm，并且能够稳定地经受各种等离子体辉光和x射线等照射。

为了减小激光陀螺的锁区，人们对控制和削弱谐振腔内后向散射（Backscatter）问题进行了多方面的研究。一种途径是尽量改善反射镜片和腔内光学元件的表面散射性能，这就发展出一种超级光学表面抛光技术。目前最高水平的超光滑表面粗糙度为1Å左右。

其次，在确有后向散射存在的情况下，采取减小后向散射同主波信号之间的耦合的技术措施。比如，有人在设计非平面FDRLG腔体时，除了要求四个反射镜片两两距离严格相等之外，法拉第室的安装角度同两相邻反射镜片的法向夹角之间还须满足如下关系式：

$$\frac{\theta_{1F}}{\theta_{12}} = \frac{L_{1F}}{L_{12}} \quad (3)$$

式中， θ_{1F} 为镜1的法线与法拉第室法线间的夹角， θ_{12} 为镜1和镜2两法线间的夹角， L_{1F} 是法拉第室到镜1间的距离， L_{12} 为镜1和镜2间的距离。

这样，腔内六个反射面产生的后向散射在左旋圆偏振光和右旋圆偏振光中都完全对称，将形成共模抑制。

还有人提出了一种调相法减小锁区的方法——称为后向散射波调制法。它是采用两个反

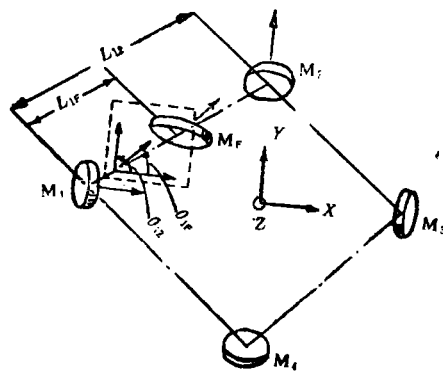


Fig.6 Set-up of a folding rhombus FDRLG

相振动的平面反射镜,同时实现散射调制和稳频。经调制后的反向散射波与主波信号频率相差甚远,两者就难以产生耦合。

在FDRLG中,法拉第室的偏频稳定性虽不像在单陀螺中那样要求苛刻,但磁场和温度的非均匀变化导致法拉第偏频稳定性的改变,仍是影响FDRLG零漂性能的重要因素。因此,近年来有人研制了新型的法拉第室结构,旨在减小以至消除磁场和温度的非均匀性变化。一方面,他们采用高维德系数的稀土玻璃,使得法拉第室玻璃厚度减到0.5mm左右。另一方面,他们改进磁环结构,使整个法拉第室内的磁场十分均匀,变化梯度非常小。见图7。

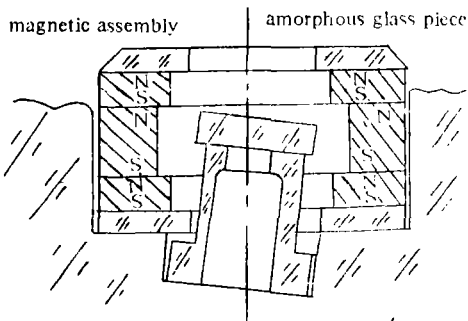


Fig. 7 A cross-sectional view of the preferred embodiment of the Farady magnet assembly

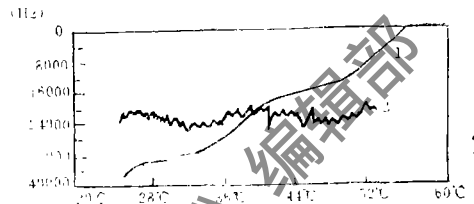


Fig. 8 Hot effect curve

1—Conventional Farady rotator
2—Low gradient Farady rotator

采用这种法拉第室的FDRLG,其偏频特性具有极小的热效应变化。图8是普通法拉第室与上述新型法拉第室的热效应比较实验曲线。

FDRLG的电路技术发展也很快。特别是在稳频技术方面,FDRLG采用光强差稳频,本来就比二频单陀螺的小抖动稳频技术先进。近些年来稳频技术的进步主要体现在稳频电路向集成化,数字化和智能化方向发展。控制执行元件压电陶瓷向多维工作模式发展,这样可以克服压电陶瓷歪扭带来的陀螺光路变形误差。由于篇幅所限,本文不再详述。

参 考 文 献

- [1] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedretti L M *et al.* Rev Mod Phys, 1985; 57(1): 61~104
- [2] Chow W W, Hamblen J B, Hutchings T J *et al.* IEEE J Q E, 1980; QE-16(9): 918~934
- [3] 高伯龙,李树棠.激光陀螺.长沙:国防科技大学出版社,1984
- [4] U.S.P.No.4,548,501,1985;4,652,132,1987;4,687,331,1987;4,836,675,1989;4,962,506,1990;4,969,743,1990
- [5] Kalb A, Mildebrath M, Sanders V. J Vac Sci Tech, 1986; A 4(3)
- [6] 王京献.激光技术,1991;15(6):359~354
- [7] 任敬心,黄奇.航空精密制造技术,1992;(1):11~13,47
- [8] 秦石桥.原苏联KRL-40激光陀螺性能的分析与对比.中国惯性技术学会学术会议(贵阳),1992

*

*

*

作者简介:曾明,男,1947年8月出生。副教授。现从事激光陀螺的研究。

收稿日期:1992年9月28日。

收到修改稿日期:1993年1月28日。