

四频差动激光陀螺综述

汪之国 龙兴武* 王飞

(国防科学技术大学光电科学与工程学院光电工程系, 湖南长沙 410073)

摘要 介绍了国外四频差动激光陀螺(FMDLG)的发展历程和应用现状。通过对 FMDLG 相关研究资料的调研, 归纳了提高 FMDLG 性能的关键, 包括基础理论的研究、基础工艺的提高、腔体的优化设计、电子系统设计和误差补偿技术。概述了国内的 FMDLG 研制历史和现状, 结合自身研制经历, 给出了 FMDLG 需要解决的若干问题。

关键词 激光技术; 四频差动激光陀螺; 光学偏频; 零漂; 异面腔

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040005

Overview of Four-Mode Differential Laser Gyros

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei

(Department of Opto-Electronic Engineering, College of Opto-Electronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The development history, key techniques and applications of four-mode differential laser gyros (FMDLGs) are summarized so as to provide some reference for domestic development of FMDLG. The keys to improve the performance of FMDLG are concluded according to investigation on materials related to FMDLG, including fundamental research, technical improvement, optimization design for cavity, electronic system design and error compensation technique. In order to fully realize the potentials of FMDLG, each key aspect should be taken into account elaborately.

Key words laser technique; four-mode differential laser gyro; optical biasing; zero drift; nonplanar cavity

OCIS codes 140.3370; 140.3560; 120.4640

1 引言

四频差动激光陀螺(FMDLG)采用光学恒定偏频完美地解决了闭锁问题, 从理论上讲优于已应用得非常成功的二频机械抖动激光陀螺(MDRLG), 主要表现在如下 4 个方面^[1~7]: 1) 不存在机械抖动, 因而不用担心对系统中其他传感器和陀螺产生机械干扰; 2) 工作时不过锁区, 因此消除了过锁区对随机游走和比例因子的影响; 3) 输出信号为纯净的正弦波, 信号处理简单、延时小, 而且采用分辨率增强技术可获得优于 0.001'' 的角分辨率; 4) FMDLG 的灵敏度比同等尺寸的 MDRLG 要高 1 倍。光学陀螺的三大评价指标是零漂、随机游走和比例因子。由于原理优势, FMDLG 的随机游走和比例因子在研制中比较容易达到要求。然而由于含有腔内元件、使用圆偏振光、行波模数目加倍、行波模之间偏频恒定等原因, 零漂是 FMDLG 研制中的一大难题, 表现为启动重复性较差、温度和磁场敏感性较大。在美国, 从 1964 年提出原理到 1991 年试飞成功, FMDLG 的研制集 Raytheon 公司、Litton 公司、Arizona 大学光学研究所等单位之力, 研制周期却比 MDRLG 长得多, 反映了 FMDLG 研制难度之大, 但最近的某些应用也反映了 FMDLG 确有其特殊的优势。本文对 FMDLG 的研制以及应用情况进行介绍, 讨论了 FMDLG 与 MDRLG 的不同之处。

2 基本原理

FMDLG 的构想是在同一谐振腔内运行两个二频单陀螺, 采用光学偏频消除四个模式之间的耦合, 如

收稿日期: 2011-09-02; 收到修改稿日期: 2011-11-16; 网络出版日期: 2012-02-23

作者简介: 汪之国(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光与光电子技术方面的研究。E-mail: maxborn@163.com

* 通信联系人。E-mail: xwlong110@sina.com

图 1 所示^[1]。互易旋光器的作用是抑制线偏振模并在两个单陀螺之间建立偏频 ν_R (数百兆赫兹) 以避免单陀螺间的模竞争。非互易旋光器为每个单陀螺建立大小相等方向相反的恒定偏频 ν_N 。这里互易指的是与光波传播方向无关,非互易指与光波传播方向有关。当输入角速度 Ω 时,两个单陀螺的拍频具有大小相同、符号相反的输出差频,结果 FMDLG 的输出差频为

$$\nu_{DIF} = (\nu_N + S_F\Omega) - (\nu_N - S_F\Omega) = 2S_F\Omega,$$

式中 S_F 为比例因子。通过两个单陀螺拍频的差动,FMDLG 在输出差频中消除了非互易偏频,因而不受非互易偏频不稳定的影响,巧妙地解决了恒定偏频的困难,而且测量灵敏度还能提高 1 倍。

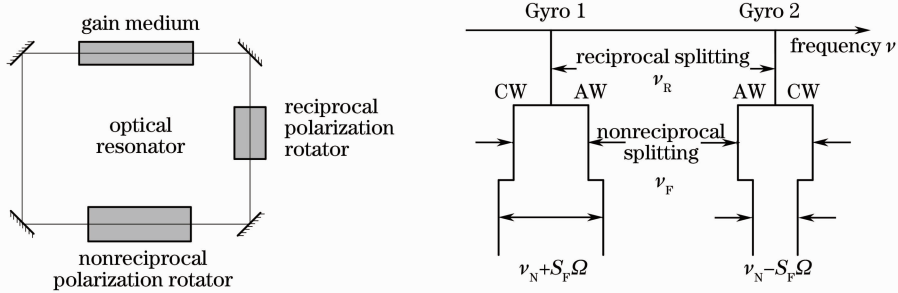


图 1 四频差动激光陀螺的构想

Fig. 1 Concept of FMDLG

3 研究历史

H. de Lang^[8]最早认识到四行波环形激光可解决双行波激光陀螺中的闭锁问题,并建议采用法拉第旋光器和相位各向异性腔构成四频激光陀螺。United Aircraft Corporation 首先对四频激光陀螺发生兴趣,他们在 1968 年申请的专利中公开了一种四频激光陀螺所需的必要装置,并称之为差动激光陀螺^[9]。在 FMDLG 中,为了产生 4 个稳定的行波模,需要采用互易偏频装置和非互易偏频装置以消除模竞争和闭锁效应。1970~1980 年间 Raytheon 公司、Litton 公司和 Arizona 大学等单位也对类似的四频方案进行了研究,包括水晶+法拉第室、水晶+增益介质的塞曼效应等方案^[10],然而这些早期的“光学偏频”方案由于性能限制而未能达到实用要求,最主要的原因就是腔内水晶导致的温度敏感问题。1980 年左右 Honeywell 公司研制的 MDRLG 取得突破,性能达到了惯性级要求,因此腔体抖动成为第一种实用的闭锁解决方案而进入批量生产。

1978 年 Raytheon 公司的 Smith 等^[11]提出用异面腔代替水晶产生互易偏频是 FMDLG 走向实用最关键的一步,消除光路中的水晶不仅减小了 FMDLG 的温度敏感性,而且也减小了损耗从而降低了随机游走。这种异面腔 FMDLG 的非互易偏频至少有 3 种选择:增益介质的塞曼分裂、极向克尔效应磁镜以及法拉第室^[12]。异面腔+塞曼效应的组合可消除光路内所有元件,似乎最为理想,然而它对磁场、温度和失谐频率非常敏感,超出了实际控制能力。磁镜既作偏频元件又作腔反射镜,在坚固性方面占优势,但由于磁镜偏频量的增加要以损耗和散射的增大为代价,因此直到目前还没有达到实用要求的磁镜。

Raytheon 公司最终采取的方案是异面腔+法拉第室组合。法拉第室很容易实现兆赫兹量级的偏频量,但它是一个腔内元件,不可避免地增大了损耗和散射^[13],成为异面腔 FMDLG 研制能否成功的关键。1985 年 Litton 公司购买了 Raytheon 公司的专利,开始了 FMDLG 的批量生产研发。Litton 公司在技术上实现的突破是法拉第玻璃片表面极低损耗(小于 10^{-4})增透膜的成功研制,这也表明消除腔内元件所带来的问题至为重要。Litton 公司所生产的 FMDLG 注册商标为 Zero-lock[®] laser gyro,简称 ZLG[®],从 1991 年正式开始批量生产。

Litton 公司公开报道的 ZLG 有 5 种,其中 3 种为单轴,腔长分别为 18.4、25、40 cm,另两种为三轴,腔长分别为 11 cm 和 9 cm。18.4 cm 的单轴 ZLG 应用最为广泛,陀螺仪型号为 S18-4,大量生产的 LN-100 系列、LN-120 G 和 LTN-101 惯导都采用 S18-4。40 cm 的单轴 ZLG 具有最好的性能,随机游走小于 0.0002 ($^{\circ}$)/h^{1/2},比例因子稳定性优于 4×10^{-9} ,有战略应用潜力^[3],一种惯导型号为 LN-95^[1](另一文献^[14]给出一种供弹道导弹制导用的恒星/惯导系统,型号为 LN-195,可能是同一种)。

根据 Litton 公司的公开报道将 S18-4 的各种性能指标典型值归纳于表 1。从这些指标看,它集比例因

子精确、随机游走小、失准角小、动态范围大、分辨率高、无机械干扰等优点于一身,综合性能优异,除了可用于导航和制导外,在定位、定向、稳定、跟踪等应用中优势非常明显。

表 1 S18-4 典型性能

Table 1 Typical performance of S18-4

Parameter	Value	Notes
Bias stability /[(°)/h]	0.003	0.001 (°)/h can be selected
Bias repeatability /[(°)/h]	0.002	for 15 min off time; 0.0067 (°)/h for 6 months off time
Temperature sensitivity /[(°)/(h·°C)]	0.0001	-20 °C~40 °C, temperature rate no more than 2 °C/h
Magnetic field sensitivity /[(°)/(h·mT)]	0.01	±0.3 mT
Angle random walk /[(°)/h ^{1/2}]	0.0015	0.0006 (°)/h ^{1/2} can be selected
Scale factor error	<1×10 ⁻⁶	6 months maximum off time
Dynamic range /[(°)/s]	>±400	can be extended to ±720 (°)/s
Angle resolution /(")	<0.001	can reach 0.0003"
Misalignment /(")	<2	6 months maximum off time
Volume /mm	Φ100×52	Including magnetic shielding box
Weight /g	680	Including magnetic shielding box
Power /W	1.5	

4 关键技术

根据异面腔 FMDLG 的原理与结构介绍为何它的研制难度远大于 MDRLG,以及为克服这些问题需要的关键技术:

1) 加工技术。与平面腔相比,异面腔的加工难度增大,如果偏离理论值,轻则导致光路偏离毛细管,从而引起增益、朗缪尔流、腔损等的变化,重则根本无法出光。法拉第腔片的两个表面要高度平滑,少许瑕疵都会导致散射、损耗等问题,而 MDRLG 完全没有腔内元件加工的问题。

2) 镀膜技术。首先看腔镜的镀膜,由于反射各向异性,圆偏振光的反射损耗比线偏振光的反射损耗大;其次,法拉第玻璃两个表面的损耗要小于 1×10^{-4} ,否则损耗太大导致量子噪声等误差较大,根本无法达到高精度。FMDLG 的光路中多了两个表面,散射较 MDRLG 大,因此尽管 FMDLG 采用恒定偏频不过锁区、理论上圆偏振光锁区小,但背向散射仍然对零漂有较大的影响^[15]。

3) 安装技术。由于环路内增加了一个高折射率元件,异面腔 FMDLG 的调腔难度要大于 MDRLG,即使调腔完毕之后光路对外界干扰的敏感性也较 MDRLG 的大,通过朗缪尔流、损耗等参量的变化导致零漂。

4) 程长控制。频率牵引和推斥效应是行波模频率相对增益曲线中心的函数,抖动偏频的两个行波模平均频率几乎相同,而恒定偏频的两个行波模的频率间隔是固定的(由于零偏在零输入下定义,所以不考虑旋转作用)。即使考虑到差动作用,恒定偏频对腔长变化的敏感性也较抖动偏频的大,因此 FMDLG 对腔长控制提出了更高的要求。为了减小频率牵引和推斥效应的影响,Ferrar^[16]提出了“色散平衡”技术,使 FMDLG 对腔长变化的敏感性大大降低,即采用色散平衡之后 FMDLG 对腔长的敏感性才与抖动陀螺相当。

5) 磁敏感性。由于增益介质的塞曼效应,圆偏振激光陀螺的磁敏感性远较线偏振激光陀螺大,即使差动之后还有较大的残余,如果仅靠磁屏蔽来解决就会大大增加系统的体积、重量和价格。为了解决这一问题,在腔长控制上要采用偏置技术^[1],即 FMDLG 不是工作在左、右旋陀螺光强相等的工作点上,而是左、右旋陀螺的比例因子修正或者说频率牵引相抵消的工作点上。

6) 读出技术。FMDLG 的合光组件要处理 4 个模式的光波,比 MDRLG 多 1 倍,早期所用的读出装置包括合光棱镜、偏振片等多个光学元件,各元件用胶粘合,给合光带来极大不便。为了简化合光组件,FMDLG 采用了一种电子读出技术^[17~19],从而在合光元件和电子信号处理的复杂性上与 MDRLG 相当。

7) 分辨率增强技术。FMDLG 的特有优势允许采用分辨率增强技术将其分辨率从 1"数量级提高到 0.001"以上,在定向定位等特殊场合有较高价值^[1]。

8) 温度补偿技术。由于含有腔内元件,FMDLG 温度敏感性比 MDRLG 大,因此在补偿上要做较多的

工作。

综上所述,为使零漂达到与同等尺寸的 MDRLG 相当的水平,FMDLG 对加工、安装等工艺和电子控制、磁屏蔽、温度补偿等技术的要求高于 MDRLG,而且由于有 4 个行波模,误差因素比 MDRLG 多,理论分析难度也较大。

5 应用现状

在采用 ZLG 的惯导中,应用数量较多的是 LN-100G 和 LTN-101,较能表现独特优势的是 LN-100S 和 LN-120G。

LN-100G 和 LTN-101 都可提供精确的定向和导航能力,前者面向军用,后者面向商用。目前有超过 4800 套 LN-100G 用于各种飞机、导弹、无人机、发射运载器、水下无人运动载体等。LTN-101 采用了独特的 Autonomous Integrity Monitored Extrapolation 技术,提供任何地点 0.3 n mile/h(1 n mile=1.852 km)的精度,已售出 5000 多套^[20]。

LN-100S 是为高性能定向而设计的,可满足当今长期太空任务对可靠性和寿命的苛刻要求,既可为低/高椭圆和地球同步轨道上的航天器提供姿态控制,也可为航天器上装载的精密仪器(如光学和红外成像系统)提供精确的定向能力。1997 年 Litton 赢得了为天基红外系统提供陀螺参考组件的合同^[21],所研制的惯性参考单元即 LN-100S,它为导弹预警卫星上的红外传感器提供精确的定向功能,从而使卫星能够精确跟踪运动中的导弹或火箭。据项目负责人称,“陀螺安静地工作对系统的成功运行非常重要”,因此 ZLG 是“唯一可满足该系统要求的激光陀螺”。

Litton 公司早在 1992 年就开始研制采用 ZLG 的恒星/惯性导航系统以代替采用机械陀螺的 LN20,选择 ZLG 而非 MDRLG 或速率偏频激光陀螺用于恒星/惯性组合的主要原因有^[5]: MDRLG 激发的振动和速率偏频激光陀螺的旋转都会降低恒星跟踪器的性能,而 ZLG 不会给恒星跟踪器带来任何不利影响;ZLG 精确的比例因子允许恒星/惯性组件快速精确旋转以进行地面校准、发射后快速精确定向到新星;ZLG 的低随机游走允许快速地面寻北,降低反应时间;ZLG 不存在抖动振动,避免或者最小化加速度计零偏对角振动敏感导致的系统误差。后来该系统又集成了全球定位系统(GPS),即为 LN-120G 恒星/惯性/GPS 组合导航系统。它采用恒星位置信息修正惯性导航系统的定位信息,重复此过程能使 LN-120G 提供精确到 20"的航向信息,是有报道可查的世界最高精度。2005 年,Northrop Grumman 公司获得了为美国空军 RC-135 侦察机提供 31 套 LN-120G 系统的合同。LN-120G 在该任务中的作用是提供高精度的位置信息,使 RC-135 探测到的敌方目标能被准确定位并传送给联合监视目标攻击雷达系统,并最终传送给战斗机^[22]。LN-120G 还满足 B-52、B-2 等飞机以及洲际弹道导弹的要求。

6 国内研究现状与有待解决的关键问题

国内对 FMDLG 的研究始于 1976 年前后,研制单位主要有清华大学(与中国计量院、苏州第一光学仪器厂合作)和国防科学技术大学,采用的是水晶+法拉第室的外腔及准内腔结构。1981 年前后的样机在实验室条件下可达到 0.1 (°)/h 的零偏稳定性^[23]。到 1994 年,国防科学技术大学研制的全内腔式水晶+法拉第室结构的平面腔 FMDLG 取得重大突破,随后进入到批量生产工艺研制和规模化生产阶段,为增强国防实力做出了重要贡献。

为了提高平面腔 FMDLG 的性能,清华大学和国防科学技术大学等单位做了一些研究。文献[24,25]研究了反射镜各向异性以及水晶片双折射的影响,指出它们影响腔模的偏振度,导致差分损耗。文献[26,27]研究了稳频精度局限所导致的零漂。文献[28,29]对温度敏感机理做了一些探讨,并提出了和频补偿的方法^[30]。

目前国内批量生产的性能较好的平面腔 FMDLG 能达到下列指标^[31]:零偏稳定性 0.05 (°)/h,零偏温度灵敏度典型值 0.1 (°)/(h·°C)(-40 °C~60 °C),不加任何磁屏蔽时磁灵敏度典型值 100 °/(h·mT),比例因子误差优于 1×10^{-6} ,随机游走 0.001 (°)/h^{1/2}。这些数据表明平面腔 FMDLG 的比例因子和随机游走已

完全满足惯性级要求,但实际应用中最重要的零偏温度灵敏度距惯性级要求仍差 3~4 个数量级,导致它无法满足众多高端装备的需求,而在中低端应用领域中又面临其他光学陀螺的竞争,因此迫切需要对其进行技术改进。作者所在的国防科学技术大学光电工程系几十年的生产研究实践以及国外相关的研制经验表明,中小型尺寸(腔长小于 30 cm)的平面腔 FMDLG 难以达到惯性级要求,所以本系在 2000 年前后着手异面腔 FMDLG 的研制。除本单位外,国内从事异面腔 FMDLG 研制工作的还有西安飞行自动控制研究所及其合作单位。

近年来,随着国内激光陀螺水平的进步以及应用需求的增加,一股激光陀螺研究热潮逐渐形成,异面腔 FMDLG 相关文献也逐渐增加。在异面腔理论方面,文献[32]研究了腔镜微扰对光轴的影响,文献[33]讨论了异面腔中的模式性质,文献[34]研究了异面腔的像散以及光阑设计,文献[35]研究了腔各向异性导致的差分损耗,文献[36]研究了偏振特性,这些研究对提高腔的抗干扰性以及优化腔参数具有一定的意义。在 FMDLG 组装方面,文献[37]研制了腔损耗测量仪,用来提高调腔精度。由于法拉第室位于激光振荡环路中,它的好坏对异面腔 FMDLG 的性能有着极其重要的影响。文献[38,39]仿真了不同结构磁环的磁场来优化磁环,文献[40,41]测量了法拉第腔片的若干特性,为腔片的选材和加工提供了参考。电子系统是陀螺的一个重要组成部分,文献[42,43]深入分析了多种稳频方式的优缺点以及对磁敏感性^[44,45]的影响,采取色散平衡技术^[46]来降低稳频误差;文献[47,48]研究了异面腔 FMDLG 的温度特性以及温度补偿技术;文献[49,50]研制了高精度计数电路,在高精度测角和姿态控制系统应用中具有较高价值。上述研究对弄清异面腔 FMDLG 的误差机理、提高其性能具有重要的参考价值。随着 FMDLG 技术的不断进步,应用领域正在拓展,如目前已用于双轴旋转惯导系统^[51]、旋转式寻北仪^[52]、平台罗经^[53]等,均取得了较好的效果。到 2010 年时,本单位实验室条件下异面腔 FMDLG 达到的精度如表 2 所示^[42]。

表 2 实验所用 FMDLG 的零偏相关指标*

Table 2 Performance related to bias for the experimental FMDLG*

Parameters	Value	Notes
Bias stability after turn-on /[(°)/h]	0.005	-40 °C~60 °C
Bias repeatability after turn-on /[(°)/h]	0.005	-40 °C~60 °C
Peak-to-peak value after compensation /[(°)/h]	0.03	-40 °C~60 °C, temperature rate less than 3.3 °C/h
Standard deviation after compensation /[(°)/h]	0.009	
Peak-to-peak value after compensation /[(°)/h]	0.115	-40 °C~60 °C, temperature rate 1 °C/min
Standard deviation after compensation /[(°)/h]	0.015	
Peak-to-peak value after compensation /[(°)/h]	0.153	-40 °C~60 °C, stochastic temperature rate (1~5) °C/min
Standard deviation after compensation /[(°)/h]	0.028	
Magnetic field sensitivity /[(°)/(h·mT)]	1.0	Room temperature and without any magnetic shielding
Angle random walk /[(°)/h ^{1/2}]	3.9×10^{-4}	3.2×10^{-4} (°)/h ^{1/2} for another FMDLG
Resolution /(")	~0.001	related to countering circuit

* There is space for improvement with better electronic control system and thermal control system.

从表 2 的数据可以看到,异面腔 FMDLG 与平面腔 FMDLG 相比已有了长足进步,尤其是随机游走已经显著优于 S18-4 的水平,表明我们已经具备非常好的光学工艺,但仍有若干问题制约着 FMDLG 用于高端场合:

1) 温度敏感性仍是制约 FMDLG 应用的一大难题,主要表现在温度敏感性大、零偏与温度变化历程有明显的相关性。在缓慢变温的条件下具有较好的补偿效果,但在随机变温时补偿效果变差。为了减小外界温度的影响,首先应从理论上探究温度敏感性的根源,在此基础上对陀螺本体进行优化设计,从而降低 FMDLG 自身的温度敏感性,并采取温度补偿算法来进一步减小温度的影响。

2) 与 MDRLG 相比,FMDLG 的磁场敏感性大了 1~2 个数量级。尽管采用磁屏蔽可将外界磁场的影响降至无屏蔽时的 0.1% 以内^[54],但增大了系统的体积和重量,因此 FMDLG 本体的磁敏感性仍然需要降低,这也是未来研制中一个重要的子课题。

3) 异面腔 FMDLG 的随机游走已经显著降低,但与 MDRLG 相比还没有优势^[55]。在某些应用场合,如

旋转式激光陀螺惯性导航系统^[56]中,长期精度很大程度上由随机游走决定,因此降低随机游走仍是一个值得研究的课题。

4) 异面腔 FMDLG 采用了较为复杂的电子控制技术,为了便于工程应用,有必要提高控制系统的智能化水平。

在异面腔 FMDLG 的精度达到实用要求后,为了扩展其应用范围,还可以在三轴集成化、与其他导航组件如星敏感器或 GPS 的系统集成以及强辐射条件下陀螺性能的变化等方面做一些工作。

7 结 论

FMDLG 不存在机械干扰,在恒星组合导航、卫星姿态控制等要求低噪声的场合具有特殊的优势,因此 FMDLG 的研制对提高我国的工业现代化水平具有较大的意义。由于 FMDLG 的误差种类较多,为了研制出高精度的 FMDLG,需要在基础理论、基础工艺、腔体设计、电子系统设计和误差补偿技术方面做较多的研究工作。目前国内的 FMDLG 已经获得了不少应用,积累了不少工程经验,下一步的重点是降低其温度敏感性和磁场敏感性,相信不久就能达到惯性级的实用要求。

参 考 文 献

- 1 C. H. Volk, S. C. Gillespie, J. G. Mark *et al.*. Multioscillator ring laser gyroscopes and their Applications [C]. Optical Gyros and Their Application. RTO AGARDograph 339, 1999, 4.1~4.26
- 2 G. J. Martin, S. C. Gillespie, C. H. Volk. Small ZLG[®] triax technology [C]. AIAA Guidance Navigation and Control Conference, 1996, 1~9
- 3 C. Volk, S. Gillespie, D. Patel. Application of the ZLG to strategic missions [C]. ION AM, 1993, 543~550
- 4 M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock[™] laser gyro [C]. Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 1989, 235~241
- 5 N. Kondo. Application of zero-lock laser gyro technology to high accuracy stellar-inertial systems [C]. ION NTM, 1992, 253~262
- 6 C. Lennon, T. Richmond. LN100S; common optical payload and bus gyro reference assembly [C]. Guidance and Control, 2001, 425~440
- 7 Inertial Sensor Assembly [EB/OL]. <http://www.nsd.es.northropgrumman.com/html/inertial-sensor/characteristics.htm>
- 8 H. de Lang. Eigenstates of polarization in lasers [J]. *Phillips Res. Rept.*, 1964, **19**: 429~440
- 9 G. B. Yntema, D. C. Grant, R. T. Warner. Differential Laser Gyro System [P]. US Patent 3,862,803, 1975-01-28
- 10 K. Andringa. Laser Gyroscope [P]. US Patent 3,741,657, 1973-06-26
- 11 I. W. Smith, T. A. Dorschner. Electromagnetic Wave Ring Resonator [P]. US Patent 4,110,045, 1978-08-29
- 12 I. W. Smith, T. A. Dorschner. Biassing the Raytheon four frequency ring laser gyroscope [C]. *SPIE*, 1978, **157**: 21~29
- 13 G. J. Martin. Ring Laser Gyro Principles and Techniques [R]. N90-29532, 1990
- 14 M. Murphy, S. Armacost, R. Barnes *et al.*. Ballistic Missile Guidance System Test in an Aircraft Pod [R]. AIAA 2000-4387, 2000
- 15 G. J. Martin. Multioscillator Ring Laser Gyro Using Compensated Optical Wedge [P]. US Patent, 5,907,402, 1999-05-25
- 16 C. M. Ferrar. Dispersion Compensated Laser Gyro [P]. US Patent 3,973,851, 1976-08-10
- 17 S. T. Hendow, G. J. Martin. Apparatus and Method for Detecting Rotation Rate and Direction of Rotation and Providing Cavity Length Control in Multioscillator Ring Laser Gyroscopes [P]. US Patent 4,836,675, 1989-06-06
- 18 R. A. Mitchell, D. B. Hall, K. W. Shafer. Ring Laser Gyroscope Output Optics Detection System [P]. US Patent 5,116,132, 1992-05-26
- 19 J. G. Mark, D. A. Tazartes, T. W. Hahn. Multioscillator Ring Laser Gyroscope Local Oscillator-Based Output Optics Detection System [P]. US Patent 5,189,487, 1993-02-23
- 20 Northrop Grumman Selected for U. S. Air Force CNS/ATM I Catalog [EB/OL]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_release.html? =95632
- 21 Litton Receives \$ 22 Million Contract to Develop and Supply Gyro Reference Assemblies for New U. S. Air Force Missile Warning Satellites [EB/OL]. <http://www.allbusiness.com/government/government-bodies-offices-government/6975110-1.html>.

- 22 Northrop Grumman Delivers First Production Stellar Navigation System to U. S. Air Force [EB/OL]. http://www.spacedaily.com/reports/Northrop_Grumman_Delivers_First_Production_Stellar_Navigation_System_To_US_Air_Force_999.html
- 23 Gao Bolong. Development situation and future of laser gyros [J]. *J. National University of Defense Technology*, 1979, (1): 1~18
高伯龙. 激光陀螺的现状与展望 [J]. 国防科学技术大学学报, 1979, (1): 1~18
- 24 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1255~1260
杨在富, 袁晓东, 张斌等. 四频差动激光陀螺中的 S-P 各向异性效应 [J]. 光学学报, 1998, **18**(9): 1255~1260
- 25 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The loss difference in differential laser gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1): 39~42
杨在富, 袁晓东, 张斌等. 四频差动激光陀螺中差分损耗的探讨 [J]. 中国激光, 1999, **A26**(1): 39~42
- 26 Yuan Jie, Huang Yun, Han Shengjie *et al.*. The null shift of the differential laser gyro caused by the asymmetry of the left and right gyro's SFC [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 22~24
袁杰, 黄云, 韩生节等. 四频差动激光陀螺由于稳频精度局限等引入的零漂 [J]. 激光杂志, 2002, **23**(3): 22~24
- 27 Luo Hui, Guo Shaojun. High precision frequency stability measurement for ring laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(S): 63~66
罗晖, 郭少军. 环形激光器频率稳定度的高精度测量 [J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(S): 63~66
- 28 Yuan Jie, Huang Yun, Jiang Anguo. The thermo effect of the laser gyro and the measuring of its temperature [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(4): 46~48
袁杰, 黄云, 蒋安国. 四频差动激光陀螺的热效应浅述与温度分布的测试 [J]. 激光杂志, 2000, **21**(4): 46~48
- 29 Wu Guoyong, Gu Qitai. Thermal bias mechanism of four mode multi-oscillation ring laser gyro [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2002, **10**(4): 44~48
吴国勇, 顾启泰. 四频差动激光陀螺热致零漂机理研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2002, **10**(4): 44~48
- 30 Wu Guoyong, Gu Qitai. Research on the relation of frequency sum to temperature in the four frequency RLG [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(6): 508~512
吴国勇, 顾启泰. 四频激光陀螺和频与温度关系的研究 [J]. 光学技术, 2002, **28**(6): 508~512
- 31 国防科学技术大学光电工程系. 110 型四频差动激光陀螺技术及型号应用 [R]. 长沙, 2009
- 32 Yuan Jie, Long Xingwu. Optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1204~1210
- 33 Jie Yuan, Xingwu Long, Linmei Liang *et al.*. Nonplanar ring resonator modes: generalized Gaussian beams [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2980~2989
- 34 Hu Qiang, Yan Jizhong, Chen Linfeng. Study on the complex astigmatism in nonplanar cavity ring and design of the diaphragm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 375
胡强, 严吉中, 陈林峰. 非共面腔激光陀螺复杂像散研究及其光阑设计 [J]. 光子学报, 2011, **40**(3): 375
- 35 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The loss differential in out-of-plane cavity laser gyros [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(3): 138~141
杨在富, 袁晓东, 张斌等. 异面腔激光陀螺中差分损耗的探讨 [J]. 激光技术, 1999, **23**(3): 138~141
- 36 Dandan Wen, Dong Li, Jianlin Zhao. Analysis on the polarization property of the eigenmodes in a nonplanar ring resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(18): 3057~3063
- 37 Song Yuan. Research on a Loss Instrument of Out-of-Plane Ring Resonator [D]. Xi'an; School of Telecommunications Engineering of Xidian University, 2009
宋媛. 异面环形谐振腔损耗仪的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009
- 38 Di Nan, Zhao Jianlin, Wang Zhibing. Analysis on magnetic field homogeneity of dual-ring permanent magnets [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2290~2294
底楠, 赵建林, 王志兵. 永磁体双磁环结构的磁场均匀性分析 [J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2290~2294
- 39 Han Wenfa. Optimization of Faraday Cell Design in the Four Mode Differential Laser Gyroscope [D]. Changsha; National University of Defense Technology, 2005
韩文法. 四频差动激光陀螺法拉第室的优化设计 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- 40 Di Nan, Zhao Jianlin, Jiang Yajun *et al.*. Experiment research on temperature response of Faraday effect in paramagnetic terbium glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1645~1648

- 底楠, 赵建林, 姜亚军等. 顺磁性铽玻璃法拉第效应温度特性实验研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(11): 1645~1648
- 41 Chen Xinwei, Qiu Fusheng, Liu Tiegeng. A method for measuring completely the Faraday effects and losses in optical mirror coated [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2937~2941
- 陈信伟, 邱复生, 刘铁根. 一种完整测量膜片法拉第效应和损耗的方法 [J]. 光子学报, 2009, **38**(11): 2937~2941
- 42 Wang Zhiguo. Bias Characteristics of Four-Mode Differential Laser Gyroscope with Nonplanar Cavity and Its Electronic System Design [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010
- 汪之国. 异面腔四频差动激光陀螺的零偏特性与电子系统设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010
- 43 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Path length control for nonplanar four-mode differential laser gyro with hill-climbing method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3233~3238
- 汪之国, 龙兴武, 王飞等. 异面腔四频差动激光陀螺的小抖动稳频 [J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3233~3238
- 44 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Experimental investigations on magnetic sensitivity in four-frequency differential laser gyros [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 713~717
- 汪之国, 龙兴武, 王飞等. 四频差动激光陀螺磁灵敏度特性的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 713~717
- 45 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Effect of magnetic field on light intensity and bias in four-frequency differential laser gyros [J]. *Optical Technology*, 2010, **36**(4): 540~545
- 汪之国, 龙兴武, 王飞等. 磁场对四频差动激光陀螺光强和零偏的影响[J]. 光学技术, 2010, **36**(4): 540~545
- 46 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyroscope with non-planar resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2892~2897
- 汪之国, 龙兴武, 王飞. 异面腔四频差动激光陀螺的色散平衡 [J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2892~2897
- 47 Wang Guochen, Yang Jianqiang. Correlation of differential laser gyro's performance and room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1058~1061
- 王国臣, 杨建强. 四频激光陀螺性能与室温的相关性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1058~1061
- 48 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Temperature compensation for four-frequency differential laser gyro with nonplanar cavity [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2010, **23**(9): 1236~1241
- 汪之国, 龙兴武, 王飞. 非平面腔频差动激光陀螺的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2010, **23**(9): 1236~1241
- 49 Huang Zongsheng, Qin Shiqiao, Wang Xingshu *et al.*. Pulse subdivision technique for differential ring laser gyro [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(3): 33~34
- 黄宗升, 秦石乔, 王省书等. 四频激光陀螺脉冲细分技术 [J]. 激光杂志, 2007, **28**(3): 33~34
- 50 Wang Zhiguo, Wang Fei, Hu Shaomin. High resolution countering circuit for differential laser gyros based on FPGA [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 30~31
- 汪之国, 王飞, 胡绍民. 基于FPGA的四频激光陀螺高分辨率计数电路[J]. 激光杂志, 2009, **30**(1): 30~31
- 51 Yuan Baolun. Research on Rotating Inertial Navigation System with Four-Frequency Differential Laser Gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007
- 袁保伦. 四频激光陀螺旋转式惯导系统研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- 52 Huang Zongsheng. Research on Rotary North Finder Based on Ring Laser Gyro [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007
- 黄宗升. 旋转式激光陀螺寻北仪的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- 53 Jia Hongjin. Research on Key Technology of Platform Gyrocompass with Four-Frequency Differential Laser Gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009
- 贾宏进. 四频激光陀螺平台罗经关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009
- 54 Zhang Yali. Magnetic Field Shielding Technology for Laser Gyros [D]. Xi'an: North Western Polytechnical University, 2006
- 张雅丽. 激光陀螺磁屏蔽技术的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006
- 55 Song Rui, Tang Jianxun, Zhou Jian. Research on how current affects the angle random walk of dithered laser gyroscope [J]. *Laser Journal*, 2010, **31**(2): 36~38
- 宋锐, 汤建勋, 周健. 工作电流对二频机抖激光陀螺角随机游走影响的研究[J]. 激光杂志, 2010, **31**(2): 36~38
- 56 Long Xingwu, Yu Xudong, Zhang Pengfei *et al.*. Single-rotating inertial navigation system with ring laser gyroscope [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(2): 149~153
- 龙兴武, 于旭东, 张鹏飞等. 激光陀螺单轴旋转惯性导航系统 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, **18**(2): 149~153