综述与评论

光纤陀螺仪的发展现状

周海波 , 刘建业 , 赖际舟 , 李荣冰
(南京航空航天大学 导航研究中心 ,江苏 南京 210016)

摘　要: 根据光纤陀螺仪的工作原理和特点 ,光纤陀螺仪具有不同的分类。介绍了国外光纤陀螺仪的现状 ,预测了近期和长远的发展趋势 ,旨在对我国的光纤陀螺技术的发展能有所帮助。

关键词: 光纤陀螺仪; 萨格纳效应; 干涉型; 谐振式; 布里渊式
中图分类号: TN2, TP2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000 - 9787(2005)06 - 0001 - 03

Development status of fiber-optic gyroscopes

ZHOU Hai-bo, LIU Jian-ye, LAI Ji-zhou, LI Rong-bing
(Navigation Res Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The fiber-optic gyroscope (FOG) is classified into different types according to its principle and characteristic. The international status of FOG is introduced and the short-term and long-term trend of FOG is forecast. It will be benefit to the course of our FOG.

Key words: FOG(fiber-optic gyroscope); Sagnac effect; interferometric; resonant; Brillouin

0 引　言

光纤陀螺仪属于第四代陀螺仪——光学陀螺仪的一种 ,其基本工作原理基于萨格纳效应 ,即在同一闭合光路中从同一光源发出两束特征相同的光 ,沿相反的方向进行传播 ,汇合到同一探测点 ,产生干涉。若存在绕垂直于闭合光路所在平面的轴线相对惯性空间转动的角速度 ,则沿正、反方向传播的光束产生光程差 ,该差值与角速度成正比。通过光程差与相应的相位差的关系 ,可通过检测相位差 ,计算角速度。它一般由光纤传感线圈、集成光学芯片、宽带光源和光电探测器组成。与传统的机械陀螺仪相比 ,具有无运动部件、耐冲击、结构简单、启动时间短、灵敏度高、动态范围宽、寿命长等优点。与另一种光学陀螺仪——环形激光陀螺仪相比 ,光纤陀螺仪不需要光学镜的高精度加工、光腔的严格密封和机械偏置技术 ,能够有效地克服了激光陀螺的闭锁现象 ,易于制造。

本文从光纤陀螺仪的原理和优点出发 ,着重对光纤陀螺仪的分类、国外研究现状及其发展趋势做了详细的介绍 ,希望对我国的光纤陀螺的研制和发展有所裨益。

1　光纤陀螺仪的分类

光纤陀螺仪按照不同的分类标准 ,有不同的分类结果。按结构可分为单轴和多轴光纤陀螺 ,光纤陀螺的多轴化正是其发展方向之一。按其回路类型可分为开环光纤陀螺和闭环光纤陀螺两类 ,开环光纤陀螺不带反馈 ,直接检测光输出 ,省去许多复杂的光学和电路结构 ,具有结构简单、价格便宜、可靠性高、消耗功率低等优点 ,缺点是靠增加单模光纤的长度来提高陀螺的灵敏度 ,输入 -输出线性度差、动态范围小 ,主要用作角度传感器[1]。闭环光纤陀螺包含闭环环节 ,大大降低光源漂移的影响 ,扩大了光纤陀螺的动态范围 ,对光源强度变化和元件增益变化不敏感 ,陀螺漂移非常小 ,输出线性度和稳定性只与相位变换器有关[2] ,主要应用于中等精度的惯导系统 ,对光纤陀螺的小型化和稳定性有重要作用 ,是高精度光纤陀螺研究的主要趋势。

按照光学系统的构成可分为全光纤型和集成光学器件型。全光纤陀螺成本较低 ,但实现高精度的技术难度较大 ,大多用于精度要求不高和低成本的场合。集成光学器件光纤陀螺在信号处理中可以采用数字闭环技术 ,易于实现高精度和高稳定性 ,是目前最常用的光纤陀螺构成模式。

按照性能和应用的角度可分为速率级、战术级和惯性级等 3个级别[3]。速率级光纤陀螺已经产业化 ,主要应用于机器人、地下建造隧道、管道路径勘测装置和汽车导航等对精度要求不高的场合。日本、法国等国家研制、生产的这种精度的陀螺仪 ,已大批量应用到民用领域。战术级光纤陀螺具有寿命长、可靠性高和成本低等优点 ,主要用于战术导弹、近程 /中程导弹和商用飞机的姿态对准参考系统中。惯性级光纤陀螺主要是用于空间定位和潜艇导航 ,其开发和研制正逐步走向成熟 ,美国有关公司和研究机构是研制、生产该级别光纤陀螺的佼佼者 ,如 Honeywell, Northrop等公司。

收稿日期: 2004 - 11 - 20

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

按工作原理可分为干涉式光纤陀螺、谐振式光纤陀螺和布里渊式光纤陀螺。其中,干涉型光纤陀螺是这 3种陀螺中发展最早、最为成熟、应用最广泛的,其惯性级产品的研制与开发也正日趋成熟。但是,由于一些随机性、非互易性因素的影响,大大限制了其性能的提高[4]。

谐振式光纤陀螺与环形激光陀螺仪相似,利用循环的环形谐振腔来增强旋转引起的 Sagnac效应。与干涉型光纤陀螺相比,可靠性高、结构简化、温度分布漂移小、动态范围大。但是,对光源要求比较苛刻,这一点影响到它的发展。

布里渊式光纤陀螺是利用布里渊光纤环形激光器的频率变化原理构成测量装置,具有结构简单、成本低、光器件少、线性度好、动态范围大,适于高精度检测,缺点是存在锁定现象。

2 国外研究状况

从 1976年美国 Utah大学的 Vali和 Shorthill首次提出了光纤陀螺的概念至今,光纤陀螺以其显著的优点、灵活的结构和诱人的前景,受到世界许多国家的大学和科研机构的重视,取得很大的进展。但是,光纤陀螺在各国的发展状况、研究情况不尽相同,具有各自的特点。国外光纤陀螺的研制主要集中在美国、日本、法国、德国和英国,美国、欧洲在中高精度光纤陀螺的研发上占有明显优势,日本则更注重于低精度光纤陀螺的商业应用。

2.1 美国的研究状况

美国是最早研制与应用光纤陀螺的国家。早在 20世纪 80年代,美国就开始对光纤陀螺仪进行全面的研究。Northrop, Honeywell等公司和斯坦福大学等都是赫赫有名的研究机构。它们研究的光纤陀螺受到国家和基金支持,主要应用在军事上。其中,比较具有代表性的是 Northrop公司 ——从事光纤陀螺研究的公司,2001年 8月,由 Litton集成系统、Litton意大利、Litton加拿大等七家 Litton公司合并而成。其光纤陀螺技术在低中精度应用领域已经成熟,并已经产品化,主要客户是美国陆军、空军、海军和波音、空客等主要的航空公司。1988年,该公司研制出实验惯性装置,所用到的惯件器件是光纤陀螺和硅加速度计。1989年,研制并论证了系统飞行试验装置。1991年、1992年,研制出用于导弹和姿态与航向参考系统的惯性测量系统。1992年,研制出全球定位系统与惯导系统组合的导航系统。如今,其生产的光纤陀螺产品有 FOG200, 600, 1 000, 2 500等系列,分为导航类、战术类、民用航空类和太空类,应用在陆地、海洋、太空等领域,精度为 1 °/h～0.001 °/h,既有单轴结构,也有双轴、三轴结构。该公司生产用于太空用途的光纤陀螺抵抗辐射能力强,达到使用 15年可靠性超过 99.6 %的优异性能。

美国 Honeywell公司一直致力于发展用于空间定位和潜艇导航应用的精确级光纤陀螺。其研制的第一代高性能的干涉型光纤陀螺采用的是 Ti内扩散集成光学相位调制器、0.83μm宽带光源、光电探测器/前置放大器模块、保偏光纤偏振器等。第二代高性能干涉型光纤陀螺采用了集成光学多功能芯片技术以及全数字闭环电路。几年前,Honeywel公司使用 4 000m光纤,5.5 in(1 in = 25.4 mm)保偏光纤环和掺铒光纤光源,进行了稳定温度条件下的闭环漂移测试,角度随机游走 (ARW)精度为 0.000 19 °/$\sqrt{h}$,偏置稳定性优于 0.000 3 °/h[5],相当于漂移率为一个半世纪旋转一周。现已应用在高性能惯性参考系统中,能够改变光纤线圈大小和光纤的长度,以满足具体任务的要求。

2.2 日本研究状况

日本是紧随美国开展光纤陀螺研究和应用的国家,其主要的研究机构有东京大学尖端技术室和日立、住友电工、三菱、日本航空电子工业 (JAE)等公司。

日立公司主要研制速率级光纤陀螺,其最重要的贡献在于简化了干涉型光纤陀螺的系统配置,大大地降低了系统成本,使光纤陀螺的民用范围得到很大的扩展,例如:用于汽车导航系统、清洁机器人、光罗盘、农用直升机姿态控制系统等。到 1996年,已经具备每月生产 5 000只光纤陀螺的能力[6],在光纤陀螺的商业领域占据一定的市场份额。另外,该公司在一些高级凌志轿车上安装了基于光纤陀螺的导航系统。

日本航空电子工业公司研制的开环干涉型光纤陀螺,其主要技术是使用 0.83μm弱相关光源、单根消偏 1.3μm光纤 (电信用光纤),以达到低成本,主要应用于商业领域。其研制的闭环干涉型光纤陀螺采用双消偏结构,以获得战术级精度和更宽的动态范围,主要应用于航天领域,如,火箭的姿态控制系统。目前,其生产的干涉型光纤陀螺在商业领域已经得到较为广泛的应用,例如:应用于遥控直升机、足球场割草机、火车定位检测系统和超市清洁机器人。

2.3 欧洲研究状况

法国 Ixsea SAS公司的前身是 Photonetics公司的导航分部,从事光纤陀螺的研发有 16年,拥有多项关键专利,应用领域涉及海上、水下应用和太空等。从 20世纪 90年代开始,在法国、欧洲航天局的支持下,开发控制卫星姿态用光纤陀螺。这类的光纤陀螺曾应用在巴西 Micro卫星 (FBM)上[7]。2001年,发布了当今最小的、基于光纤陀螺的惯导系统,该系统为全球定位系统、多普勒测速器、声纳定位系统预留接口。它生产的 MU120使用的光纤陀螺偏置稳定性达到 0.003 °/h,精度最高的光纤陀螺随机游走精度达到 0.000 15 °/$\sqrt{h}$,是 Octans(1998年开发的能够敏感运动的寻北仪)精度的 200倍[7]。

德国 LITEF公司成立于 1961年,从 2001年开始,隶属于美国 Northrop公司电子系统分部,研制的方向集中在惯性传感器、惯性参照和导航系统,75 %的飞行导航、陆地、海中导航产品用于出口,已有超过 20 000只光纤陀螺在当今世界使用,产品应用领域涵盖太空、空中、陆地和水中和

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

军用、民用范围。从 2003年到 2007年,该公司将向德国和荷兰军方提供 577套组合导航系统,为军用侦察车提供位置、航向和姿态信息[8]。

Fizoptika公司是俄罗斯的一家生产光纤陀螺的公司,成立于 1989年,是一家相对较为年轻的公司,发明了用于微型光纤陀螺的技术,它将所有的光学元件并列放置,元件之间没有光学的连接,用这种技术生产的光纤陀螺尺寸小、功耗低,能够降低成本,提高可靠性[9],在俄罗斯国内外颇有市场。其主要种类有 VG910, VG941, VG951;动态范围达到 ≤500 °/s;零偏稳定性可达 0.3 °/h～1.0 °/h;最小重量仅 40 g。

3 展　望

回顾光纤陀螺仪的发展历程,光纤陀螺取得巨大发展的原因除了自身固有的优点外,光纤通信技术和光纤传感技术的发展,光纤陀螺成本降低和体积减小,外部辅助技术(如,多普勒、星光跟踪器、全球定位系统等技术)的发展都对光纤陀螺的发展起到十分重要的推动作用。当对光纤陀螺的应用前景进行展望时,这些外部因素仍然是不可忽视的。

借鉴国外文献和数据[10],从近期看,改进的光纤陀螺将取代许多系统中使用的激光陀螺和机械陀螺,精度最高将会达到 0.000 15 °/h,应用主要集中在 0.000 15 °/h～15 °/h的范围内。光纤陀螺精度和成本由于受到光纤通信技术、集成光学技术和光纤传感技术发展的限制,主要应用在战术级和速率级。当基本需求极大时,光纤陀螺系统成本降到 15 000～20 000美元之间,在光纤陀螺上的物理技术突破将可以满足未来任何小型化的战略系统的要求。从长远看,随着光纤通信技术、集成光学技术和光纤传感技术的发展,更多先进的成果将应用在光纤陀螺中,使得光纤陀螺的性能得以整体提高,应用范围更加广泛,干涉型光纤陀螺的应用领域将集中在惯性级上,精度范围为 0.001 5 °/h～0.000 015 °/h,有望取代静电悬浮陀螺。

光纤陀螺发展的方向:一是向更高精度、更高可靠性的方向发展,为航天、航空、航海提供高精度的惯性元件;二是向体积小、高度集成、价格便宜、结构更牢固的超小型化方向发展,为战术级应用提供坚固、廉价的惯性传感器;三是朝多轴化方向发展。

4 结束语

近几年,国内光纤陀螺发展很快,研制水平已达到中低精度要求,但是,发展速度仍然跟不上市场需求,主要问题是与光纤陀螺相关的光电子器件在技术和数量上满足不了陀螺总体的设计要求,市场的布局不够合理。因此,我国光纤陀螺在发展的过程中,应注意形成多层次、多方位的研究和生产体系,在不断提高精度的同时,注重商业应用市场的开拓,将不同性能、不同成本的光纤、光源、光电集成芯片等器件应用到光纤陀螺当中,生产不同价格、不同精度的产品,以适应不同市场的需要。另外,光纤陀螺小型化也是面临的一个新课题。如何进一步改进敏感元件的制作工艺及结构、探索新的敏感机理,如何充分发挥微处理技术和计算机软件功能,以改善和补偿光纤传感器的性能已经成为当务之急。

总之,光纤陀螺仪经过将近 30年的发展,其应用范围不断拓展。在军用方面,光纤陀螺仪广泛装备在导弹系统、飞机和舰艇的导航系统以及军用卫星与地形跟踪匹配等系统中;在民用方面,光纤陀螺仪可用于飞机导航和石油勘察、钻井导向,特别是在工业上具有极大应用的潜力。随着光纤技术和集成光路技术的不断发展,光纤陀螺仪将拥有越来越广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 金　杰,王玉琴. 光纤陀螺研究综述[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003, (6): 4 - 7.

[2] Armenise M N, Ciminelli C, Leonardis F De. Gyroscope technologies for space applications[R]. Italy: Optoelectronics Laboratory, Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica, Politecnico di Bari-Via Orabona, 2004.

[3] Lefèvre H C. 光纤陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 30 - 33.

[4] 刘小川. 国外光纤陀螺仪的发展现状[J/OL]. http://www.space.cetin.net.cn/docs/htdt99/htdt0116.htm#c, 2001 - 06 - 13.

[5] Tebo A. High-quality fiber-optic gyros no longer just a dream[DB/OL]. OE REPORT. http://www.spie.org/app/Publications/magazines/oerarchive/february/feb97/tebo.html, 2004 - 02 - 11.

[6] Tebo A. High-performance fiber-optic gyros and their future[DB/OL]. OE REPORT. http://www.spie.org/web/oer/march/mar97/tebo.html, 2004 - 03 - 22.

[7] Ixsea公司. IMU 120 Inertial Measurement Unit and OCTANS gyro compass and full motion sensor[DB/OL]. http://www.ixsea-oceano.com/php/contenu/en/p-imu120.php. http://www.ixsea-oceano.com/php/contenu/en/p-octans.php. 2004 - 11 - 15.

[8] Litef公司. Land Navigation Products-Hybrid Land Navigation Products[DB/OL]. http://www.litef.com/prods_01.htm, 2004 - 09 - 28.

[9] Loukianov D P. Laser and fiber-optic gyros: the status and tendencies of development[J]. 国外惯性技术信息, 2004, (1): 17 - 35.

[10] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, (4): 332 - 339.

作者简介:

周海波(1972 -),男,湖南邵东人,工程师,南京航空航天大学导航研究中心博士研究生。现从事惯性技术与组合导航系统的研究。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net