

## 高精度光纤陀螺发展现状及对策

吴衍记

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:** Draper 试验室的 Barbour 和 Schmidt 对 2000~2020 惯性器件发展的预测图自发表以来引起了惯性领域的广泛关注并被大量引用。通过对国内外光纤陀螺发展现状的分析发现, 该图比较准确地预测到了 2000~2010 年光纤陀螺的发展, 但是对 2020 年光纤陀螺发展的预测则过于乐观, 存在一定的偏差, 其主要原因是解决多物理场作用下陀螺精度保持问题的困难估计不足。

**关键词:** 光纤陀螺; 光纤传感器; 惯性器件

**中图分类号:** V241.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2015)04-0053-05

### The Current Situation and Countermeasures of High Precision Fiber Optic Gyro

WU Yan-ji

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The 2000 ~ 2020 inertial sensors development forecast figures announced by Barbour and Schmidt in Draper laboratory has received the widespread attention and citations. Through the analysis of domestic and foreign development status of Fiber Optic Gyro (FOG), this paper found that the figures accurately predict the development of FOG from 2000 to 2010 but in 2020, but the forecast of the development of FOG is too optimistic, there is a certain deviation, the main reason is that solving the problem of accuracy under the action of physical fields would be more difficult.

**Key words:** FOG; Optical fiber sensor; Inertial device

#### 0 引言

自 20 世纪 90 年代中后期以来, 以美国、法国等国家为代表的光纤陀螺应用日益普及, 正迅速成为惯性导航和战略应用领域的主要仪表。尤其是 Draper 试验室的 Barbour 和 Schmidt 对 2000~2020 惯性器件发展的预测图 (见图 1) 公布以来<sup>[1]</sup>, 在很大程度上受到了国内外专家学者的认同, 并被广泛引用到多种学术会议和刊物, 引起了广泛的重视, 光纤陀螺则是本预测图中最有发展前途的惯性器件之一。

十几年来, 国内外光纤陀螺都取得了迅速的发展, 广泛应用于海、陆、空、天等领域, 其性能和可靠性得到了充分的验证和认同, 进入了光纤陀螺的高速发展期, 已经成为我国  $0.015(^{\circ})/h \sim 0.01(^{\circ})/s$  应用领域的首选角速度测量元件, 在我国正在不断掀起光纤陀螺的研制高潮, 传统的惯性技术研制单位和新兴的民用产业对光纤陀螺及其相关技术都表现出强烈的兴趣。

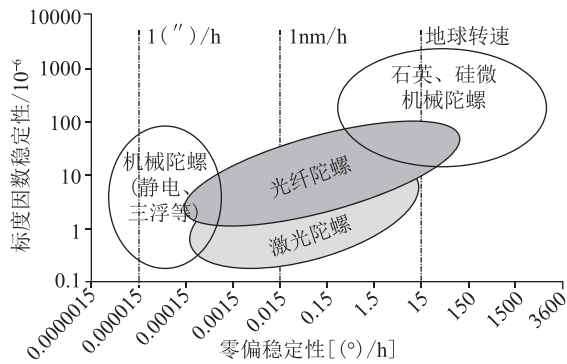
2010 年已经过去, 2020 年也即将到来, Draper 试验室对光纤陀螺发展预测 (如图 1 所示)

收稿日期: 2015 - 06 - 15; 修订日期: 2015 - 06 - 28。

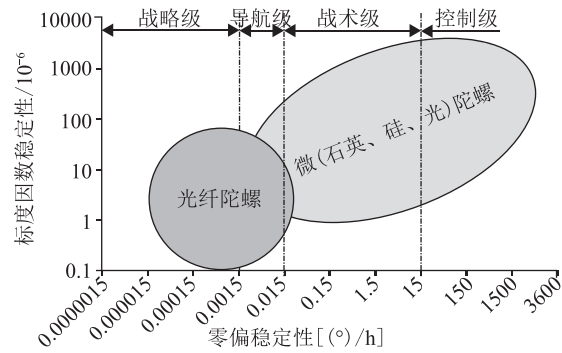
作者简介: 吴衍记 (1966-), 男, 研究员, 主要从事光纤陀螺技术方面的研究。

E-mail: 33wyj@vip.sina.com

的准确度到底怎样，光纤陀螺是否真的像其预测的那样退出战术级领域，一统高精度应用领域？本文将通过分析国内外光纤陀螺的发展趋势，对上述问题给出自己的看法。



(a) drapper试验室2010年陀螺发展趋势预测图



(b) drapper试验室2020年陀螺发展趋势预测图

图 1 Barbour 和 Schmidt 对 2010 年和 2020 年惯性器件发展预测图

Fig. 1 The inertial sensors' development forecast in 2010 and 2020 by Barbour and Schmidt

### 1 国内外光纤陀螺的发展现状

按照图 1 (b) 对惯性仪表精度等级的分类方法，光纤陀螺可划分为战术级、导航级和战略级三个等级<sup>[1]</sup>，其中战术级光纤陀螺采用波长为 850nm (或 1310nm) 的超发光二极管 (SLD) 光源，而导航级和战略级光纤陀螺普遍采用波长为 1550nm 的掺铒光纤光源。下面重点讨论这三类光纤陀螺的国内外技术现状和发展趋势。

#### 1.1 战术级光纤陀螺发展现状

LN-200 是战术级光纤陀螺的典型代表，自 1992 年批量生产以来，LN-200 已广泛应用于导弹、鱼雷、卫星、无人机等多种场合，累计交付了 40000 余套，表现出很强的生命力。图 2 是 LN-200 系列化产品示意图<sup>[2]</sup>。在 Northrop Grumman 公司，战术级光纤陀螺的关键技术问题、批量生产工艺问题、可靠性和寿命问题已经全部得到解决，已进入规模生产状态，其主要目标是不断扩大其应用领域。

此外，美国的 KVH 公司的 DSP-3000、DSP-1500<sup>[3]</sup>，以色列 Cielo 公司的 FOG-200、FOG-52，俄罗斯光联公司的 SRS-500、FIZOPTIC 的开环光纤陀螺等战术级产品也表现出越来越强大的竞争力，展现出很好的市场前景。

国内战术级光纤陀螺也日臻成熟，已经形成具有完全自主知识产权的战术级光纤陀螺及其配套元器件技术，战术级光纤陀螺产品已经成为该应用领域的首选角速度测量传感器，2014 年全国年产各类光纤陀螺 15000 轴左右，广泛应用于各种军民领域。



图 2 Northrop Grumman 公司系列化光纤陀螺产品

Fig. 2 Fiber optic gyro products in Northrop Grumman company

可以看到,战术级光纤陀螺已经非常成熟,其应用领域极广,需求态势增长很快,具有不断自我完善的能力,已经成为该领域的统治者,可以预见在未来很长时间内,光纤陀螺在战术级的高端领域( $0.015\sim 0.1$  ( $^{\circ}$ )/h)仍将扮演着不可替代的角色,在我国可能要保持 $10\sim 15$ 年时间,甚至更长。

所以,Draper 试验室对2010年光纤陀螺在战术级领域发展的预测是比较准确的。

在2020年左右光纤陀螺在战术级的低端(大于 $1$  ( $^{\circ}$ )/h)应用领域可能逐渐被其他陀螺占据,两者并存的局面会持续存在,但是在 $0.015\sim 0.1$  ( $^{\circ}$ )/h的高端领域仍将广泛使用光纤陀螺,所以,Draper 试验室对2020年光纤陀螺将退出战术级市场的预测不够全面。

### 1.2 导航级光纤陀螺

1997年4月,诺思罗普-格鲁曼公司赢得了美国国防部高级研究计划署(DARPA)资助,研发适用于地面、海上和空间载体包括飞机、军用攻击武器、战车及各种导弹的制导系统,支持美国国防部陆、海、空平台和各类打击武器,由此形成了后来的LN-251、LN-260(如图3所示)和LN-270系列光纤陀螺导航系统产品,其导航精度优于 $1\text{nm}/\text{h}$ <sup>[2]</sup>。

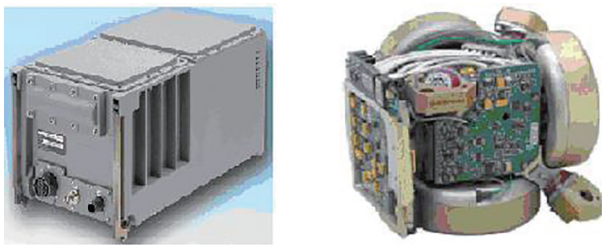


图3 LN-260先进嵌入式INS/GPS

Fig. 3 LN - 260 advanced embedded INS/GPS

2003年,法国IXSEA公司推出光纤惯性导航系统PHINS,并陆续应用于荷兰、法国海军装备中,随后相继推出MARINS和LANDINS系列化产品,并取得了较好的应用,在2014年欧洲海军装备展上,IXSEA公司展出了MARINS系列化产品<sup>[4]</sup>,其中M5型定位精度达到 $1\text{nm}/24\text{h}$ ,满足水面舰艇的需求,M7型定位精度达到 $1\text{nm}/72\text{h}$ ,已

经用于英国海军Astute级核攻击潜艇。

所以,光纤陀螺系统在惯性级领域的应用正处于上升期,Draper 试验室对2010年光纤陀螺在导航级领域发展的预测是比较准确的。但是,与激光陀螺相比,光纤陀螺的长期稳定性和环境适应性并没有表现出明显的优势,“两光”陀螺共同占领该市场领域的局面可能还要持续较长的时间。所以,Draper 试验室对2020年光纤陀螺将取代其他陀螺全面占领该领域的预测显然是不够全面的。可以预见,在未来相当长时间内光纤陀螺会与激光陀螺一起共同占领导航级领域。

### 1.3 战略级光纤陀螺

战略级光纤陀螺具有很好的稳定性和极低的噪声,2008年前后,法国IXSEA公司为Pleiades卫星研制的精密级光纤陀螺Astrix200<sup>[5]</sup>的零偏稳定性 $<0.0007$  ( $^{\circ}$ )/h ( $1\sigma$ ),非线性度 $<3.5\times 10^{-6}$  ( $1\sigma$ ),测量范围: $\pm 10$  ( $^{\circ}$ )/s,但是,其工作温度范围仅为 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

美国Honeywell公司为三叉戟导弹的导航系统(MK6-LE)研制的高精度光纤陀螺的零偏稳定性达到 $0.0003$  ( $^{\circ}$ )/h ( $1\sigma$ ),线性度 $0.5\times 10^{-6}$  ( $1\sigma$ )<sup>[6]</sup>,该陀螺对光纤环圈进行了温度控制,以减小其非互易性噪声,这项工作尚未结束。

精密级光纤陀螺及其应用尚处于起步阶段,距离取代该领域的传统惯性器件还有一定的距离。但其应用前景已经得到了国外专家和相关机构的充分认可,相关技术的研究将是未来相当长时间内惯性技术的主要研究方向之一。

所以,Draper 试验室对战略级光纤陀螺的预测与实际情况具有一定偏差,光纤陀螺在该领域的应用远远没有达到原来预测的水平。

是什么原因导致战略级光纤陀螺的发展没有实现预期成果呢?

## 2 战略级光纤陀螺发展存在的主要问题

Litton公司从1987年开始开发战术级光纤陀螺组合LN-200,到1992年实现工程应用用了5年时间;1995年开始开发LN-251到2000年左右投入工程应用,大约也用了5年左右的时间。所以,在当时国际光纤陀螺的发展基本上是按照原理样机每5年精度提高一个数量级,产品每10

年提高一个数量级的速度高速发展,可能正是由于这一原因,Draper 实验室大胆的做出了图 1 所示的预测。但是,随着陀螺精度的提高,很多深层次的技术问题开始暴露出来,使得光纤陀螺的发展没能实现预期结果,其主要原因是多物理场(温度、磁场、应力等)作用下,陀螺精度的保持问题。

### 2.1 多物理场作用下陀螺的“零偏”重复性、稳定性长期保持问题

采用偏振保持光纤绕成的光纤传感环圈是光纤陀螺的核心,但是,温度、磁场、应力等环境因素不可避免地对光在光纤中的传输产生影响,这种影响必然导致光纤环圈的互易性降低,从而使得陀螺的“零偏”发生变化,影响陀螺精度,如何抑制由此产生的误差是光纤陀螺研究的永恒主题。

为了使光纤陀螺达到“战略级”精度,光纤长度通常在 3~5km,光纤长度的增加必然导致环圈的有效尺寸增加,提高其互易性的难度相应增大,当外界环境因素发生变化时由此产生的“零偏”变化明显增大,如何抑制这种噪声是困扰光纤陀螺的一大难题,也是导致光纤陀螺没有实现预期效果的关键。

### 2.2 多物理场作用下陀螺的“标度因数”重复性、稳定性长期保持问题

在多物理场作用下,光源的光谱、 $\text{Linbo}_3$  调制器性能、光纤环圈等器件参数变化等因素都在不同程度上引起标度因数的变化,从而使光纤陀螺标度因数的稳定性降低并保持到  $1 \times 10^{-6}$  以下成为困难,这也影响了光纤陀螺在该领域的使用。

## 3 高精度光纤陀螺发展对策

为了解决多物理场(温度、磁场、应力等)作用下,陀螺精度(“零偏”和标度因数)的保持问题,二十多年来科技工作者采取了很多卓有成效的措施,如多极对称缠绕(四极、八极或十六极等)、无骨架光纤环圈、 $2\pi$  相位跟踪控制、掺铒光纤光源、强度噪声抑制、“四态”随机过调制、温度建模补偿、温度控制、旋转调制等手段,使上述问题得到了很大程度的改善,基本实现了

2010 年的预测目标,如何得到“能用、好用”的“战略级”光纤陀螺,是全世界致力该领域研究的热点,作者仅就我国战略级光纤陀螺的发展提几点个人意见。

### 3.1 着眼未来,固本强基

“战略级”光纤陀螺的研究和应用是一项技术难度大、市场领域小、战略意义远大于经济效益的长期持久工作,要做好这项工作,必须着眼未来做好顶层谋划。

#### (1) 固化成熟技术

固化“惯性级”光纤陀螺的成熟技术,解决存在的问题,提升基础元件和工艺设备的基本性能,为“战略级”光纤陀螺的研究提供一定的技术支撑,战略级光纤陀螺的研究必须由惯性级光纤陀螺的研究支撑。

#### (2) 加强技术基础研究

针对多物理场作用下,战略级光纤陀螺精度的保持问题,要加强技术基础研究,注重理论创新,探索解决问题的新思路、新方法,理论创新是“战略级”光纤陀螺真正实现 Draper 实验室对 2020 年光纤陀螺预测前景的重要途径。可以预见,在现有惯性级光纤陀螺基础上进行一定的“修修补补”不可能得到“能用、好用”的“战略级”光纤陀螺。

#### (3) 形成基础元件保障体系

通过技术基础研究,建立适于战略级光纤陀螺需求的光学元件技术指标体系,通过新材料、新方法、新工艺的研究和应用,研制出满足“战略级”光纤陀螺应用需求的配套光学元件,为“战略级”光纤陀螺的发展奠定坚实基础。

### 3.2 需求牵引,研用并重

为了解决多物理场作用下光纤陀螺精度的保持问题,很多科研机构在陀螺应用技术上进行了很多行之有效的尝试,如温度控制、磁屏蔽、减震、旋转调制、建模补偿等技术,很好地改善了光纤陀螺的工作环境,在一定程度上解决了其精度保持问题,为开展相应的应用技术研究提供了很好的保证,对推动战略级光纤陀螺的发展发挥了重要的作用。



## 4 结论

Draper 试验室对 2000~2020 惯性器件发展的预测图被广泛引用, 本文研究了该图对光纤陀螺预测的准确性, 通过研究分析发现: 该图比较准确的预测到了 2000~2010 年光纤陀螺的发展, 但是对 2010~2020 年光纤陀螺发展的预测则过于乐观, 存在较大的偏差, 其主要原因是为解决多物理场作用下陀螺精度的保持问题的困难估计不足。

### 参考文献

- [1] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1 (4): 332-339.
- [2] George A Pavlath. Fiber optic gyros: the vision realized [C] // Proc. Of SPIE Vol. 6314 6314 0G-2-10.
- [3] A Steven Emge, Thomas Monte, et al. Advances in open-loop FOG sensors [C] // OSA/OFS 2006, 18<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, P156-158.
- [4] 第 24 届欧洲海军装备展.
- [5] Thomas Buret, D Ramecourt. Fiber optic gyroscopes for space application [C] // OSA/OFS 2006, 18<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, P102-104.
- [6] Sudhakar P Divakaruni, Ph D, Steve J Sanders, Ph D. Fiber optic gyros-a compelling choice for high precision applications [C] // OSA/OFS 2006, 18<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, P50-55.
- [7] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 国防工业出版社, 2008.