

T

heory and Technology
on Signal Processing and Denoising
of Fiber Optic Gyroscope

光纤陀螺的信号分析 及滤波理论与技术

党淑雯 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

014009496

TN965
24

光纤陀螺的信号分析 及滤波理论与技术

Theory and Technology on Signal
Processing and Denoising of Fiber
Optic Gyroscope

党淑雯 著



国防工业出版社

·北京·

TN965

24



北航

C1698127

内 容 简 介

本书具有重视基础性、讲究科学性及前瞻性、并注重应用性等特点。根据我国光纤陀螺信号处理领域的研究现状及需求,系统分析了光纤陀螺的信号特征,并全面描述了分形理论、小波分析、神经网络及多模态分解等方法在干涉式光纤陀螺系统的信号分析与滤波研究中的应用及实现。

本书可以作为高等院校导航与制导、测量仪器与技术、以及信号分析或处理等相关专业师生的教学参考资料,也可作为惯性导航相关科研人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

光纤陀螺的信号分析及滤波理论与技术/党淑雯著. —北京:国防工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-118-09060-4

I. ①光... II. ①党... III. ①光学陀螺仪—信号分析②光学陀螺仪—滤波理论③光学陀螺仪—滤波技术 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 216206 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 9 字数 154 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

惯性导航系统已广泛应用于国防及航空航天等各个领域。随着惯性技术的发展,惯性导航系统主要发展为以新型光学陀螺代替传统的机械陀螺,以捷联惯导系统代替平台惯导系统。随着光电技术的发展,在惯性系统中,光学传感器成为新一代的惯性测量元件。尤其是光纤陀螺(Fiber Optic Gyroscope, FOG),凭借体积小、质量轻、易维护和良好的性价比等优势,成为中低精度惯性导航系统的首选惯性测量元件。

导航系统的精度是其应用的关键,如何在已有的硬件设备的基础上提高导航的精度是我国现有航天技术研究领域中急需解决且难度很大的研究之一。在从硬件角度提高精度的同时,采用软件方法可以降低系统成本,缩短研发周期,且更具备灵活性。通常的解决方法是采用滤波方法,即对测量传感器的输出信号进行信号滤波,对导航系统的状态进行状态滤波。由于光纤陀螺随机噪声具有一定的特殊性,采用传统的滤波方法无法解决,因此,本书的任务之一就是采用新的非线性滤波方法对光纤陀螺的输出信号进行信号分析和噪声滤除以提高光纤陀螺的精度,进而提高导航系统的精度。

在已有的光纤陀螺信号处理方法研究中,关于光纤陀螺仪信号分析及滤波技术的研究尚处初步探索阶段。因此,本书是根据我国航天领域相关技术的研究现状提出和开展的,具有十分重要的现实意义和理论研究价值。

本书以干涉型光纤陀螺仪(Interferometer Fiber Optical Gyroscope, IFOG)为研究对象,通过对光纤陀螺建模与仿真以及对实测数据的分析,在研究其噪声特性的基础上,结合分形理论、小波分析、提升小波变换以及经验模态分解方法来分析滤除包含分形噪声在内的光纤陀螺随机噪声。书中内容主要围绕以下几个方面展开阐述:

1. 光纤陀螺随机噪声特性分析及仿真建模方法

在介绍光纤陀螺的工作原理和结构的基础上,分析了干涉型光纤陀螺随机噪声的组成及特性,建立了数字闭环光纤陀螺的动态模型和随机模型,并针对不同精度等级的光纤陀螺进行了噪声对比分析。

2. 分形理论在光纤陀螺中参数估计的应用研究

针对中高精度光纤陀螺随机噪声中所包含的白噪声以及分形噪声,将小波分析与分形理论相结合,利用极大似然估计方法进行噪声参数估计,给出了小波变换域极大似然估计方法的推导、流程以及算法的检验。该噪声参数估计方法有助于对 FOG 的性能评估,从理论上指导提高 FOG 的精度。通过对参数估计结果与实际光学陀螺的性能进行比较,验证了这种方法的有效性。同时,根据光纤陀螺的结构组成,通过随机噪声参数从器件组成上给出了提高其精度的途径。

3. 基于小波分析的光纤陀螺信号处理方法研究

在简述小波变换基本理论的基础上,讨论了小波滤波方法的基本步骤。仿真验证了小波分解和重构的 Mallat 算法、小波软阈值滤波算法、不同阈值选取方法的传统小波滤波方法以及利用传统小波分析滤除光纤陀螺噪声的方法。

4. 自适应提升小波光纤陀螺信号处理方法研究

为解决小波滤波方法的缺陷——去噪效果欠佳以及无法满足信号多样性需求,提出自适应提升小波滤波方法。首先简述了提升小波变换方法基础理论,在小波滤波策略的基础上,从自适应提升方法中的预测算法和更新算法出发,提出 Harr 小波基及 DB4 小波基自适应提升小波滤波方法,并应用于光纤陀螺噪声滤除。

5. 基于经验模态分解的混合型光纤陀螺信号处理方法研究

为克服经验模态分析方法自身的缺陷——高频分辨率低及端点边界效应,将提升小波分解方法以及径向基函数神经网络引入到经验模态分析方法中,提出了一种改进的混合型经验模态分析方法,并通过仿真实验对其进行了有效的验证。

感谢上海理工大学田蔚风教授、上海交通大学金志华教授和钱峰教授为本书提供了众多宝贵意见。同时,本书参考了国内外许多同行的论文、著作,引用了其中的观点、数据与结论,在此一并表示谢忱。此外,本书由上海工程技术大学校基金学术著作出版专项项目资助出版。希望本书的研究工作可为我国惯性技术领域光纤陀螺信号处理研究工作提供参考与借鉴。

由于作者学识有限,书中难免存在疏漏或不足之处,恳请专家和读者给予批评指正。

作者

2013年7月

缩略语说明

(按首字母顺序排列):

缩写	英文全称	中文全称
ARMA	Auto Regressive Moving Average	自回归滑动平均
ARW	Angle Random Walk	角度随机游走
BI	Bias Instability	零偏不稳定
BS	Bias Stability	偏置稳定性
CCW	Counter Clock Wise	逆时针
CW	Clock Wise	顺时针
CWT	Continuous Wavelet Transform	连续小波变换
DWT	Discrete Wavelet Transform	离散小波变换
EMD	Empirical Mode Decomposition	经验模态分解
FBM	Fractional Brownian Motion	分形布朗运动
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
FOG	Fiber Optic Gyroscope	光纤陀螺
FT	Fourier Transform	傅里叶变换
HHT	Hilbert-Huang Transform	希尔伯特—黄变换
IFOG	Interferometer Fiber Optic Gyroscope	干涉型光纤陀螺
IMF	Intrinsic Mode Function	本征模态函数
INS	Inertial Navigation System	惯性导航系统
LMS	Least Mean Square	最小均方
LWT	Lifting Wavelet Transform	提升小波变换
MMST	Minimax Threshold & Soft Threshold	极大极小软阈值
MRA	Multi-Resolution Analysis	多分辨率分析
MSE	Mean Squared Error	均方根误差

MTHT	Minimax Threshold & Hard Threshold	极大极小硬阈值
OWT	Orthorhombic Wavelet Transform	正交小波变换
QN	Quantization Noise	量化噪声
RBF	Radial Basis Function	径向基函数
RR	Rate Ramp	速率斜坡噪声
RRW	Rate Random Walk	速率随机游走
RSHT	Rigorous Sure & Hard Threshold	无偏似然硬阈值
RSST	Rigorous Sure & Soft Threshold	无偏似然软阈值
SINS	Strap-down Inertial Navigation System	捷联惯性导航系统
STFT	Short-time Fourier Transform	短时傅里叶变换
SINS	Strap-down Inertial Navigation System	捷联惯导系统
SURE	Stein's Unbiased Risk Estimator	Stein 无偏似然估计
UTHT	Universal Threshold & Hard Threshold	全局硬阈值
UTST	Universal Threshold & Soft Threshold	全局软阈值
WT	Wavelet Transform	小波变换

目 录

第1章 绪论	1
1.1 惯导及陀螺仪的发展动态	2
1.1.1 惯性导航系统的发展及现状	2
1.1.2 光纤陀螺的发展及现状	2
1.2 光纤陀螺误差分析及信号处理研究概况	6
1.2.1 傅里叶变换	6
1.2.2 小波变换	7
1.2.3 提升小波变换	9
1.2.4 希尔伯特-黄变换	10
1.2.5 分形理论及 $1/f^\alpha$ 分形噪声	11
1.3 本书内容安排	13
参考文献	15
第2章 光纤陀螺的噪声建模及误差分析	20
2.1 光纤陀螺的原理及特点	21
2.1.1 光纤陀螺的特点	21
2.1.2 萨格奈克效应	22
2.1.3 开环光纤陀螺的基本原理	23
2.1.4 闭环光纤陀螺的基本原理	25
2.2 激光陀螺的原理及特点	27
2.2.1 激光陀螺的基本原理	28
2.2.2 激光陀螺的特点	28
2.2.3 激光陀螺的结构	29
2.3 光纤陀螺的噪声分类及性能指标	29
2.3.1 光纤陀螺的噪声分类	29
2.3.2 光纤陀螺的主要性能指标	32
2.4 激光陀螺中的噪声分类	33

2.5	光纤陀螺信号特征	33
2.6	光纤陀螺系统建模与仿真	34
2.6.1	光纤陀螺动态建模与仿真	35
2.6.2	光纤陀螺随机建模与仿真	39
2.7	光纤陀螺的噪声特性及测试	45
2.8	本章小结	48
	参考文献	48
第3章	分形理论的基础知识	50
3.1	分形理论的应用前景	50
3.2	引入分形理论的意义	51
3.3	分形信号的定义及性质	53
3.3.1	分形信号的定义	53
3.3.2	分形信号的性质	53
3.3.3	分形信号的小波域模型及特征	54
3.3.4	分形布朗运动	56
3.4	本章小结	57
	参考文献	57
第4章	小波分析理论的基础知识	59
4.1	小波分析的基本理论	60
4.1.1	连续小波的定义	60
4.1.2	连续小波的性质	61
4.1.3	离散小波变换	62
4.2	多分辨分析和 Mallat 算法	63
4.2.1	正交多分辨分析	63
4.2.2	正交小波的构造	64
4.3	本章小结	66
	参考文献	66
第5章	提升小波理论的基础知识	67
5.1	提升小波分析的优势	67
5.2	提升小波分析的实现	68
5.3	小波分解与重构的多相位表示	70
5.4	多相位矩阵的因子分解	72
5.5	本章小结	73

参考文献	74
第 6 章 经验模态分解方法的基础知识	75
6.1 瞬时频率和本征模态函数	75
6.2 经验模态分解方法	76
6.3 本章小结	79
参考文献	82
第 7 章 基于分形理论的光纤陀螺信号处理	83
7.1 极大似然估计的基本思想	83
7.2 极大似然估计的重要性质	85
7.3 小波变换域的极大似然估计	85
7.4 小波变换域极大似然估计算法的检验	89
7.5 本章小结	91
参考文献	91
第 8 章 基于小波分析的光纤陀螺信号处理	93
8.1 Mallat 算法	93
8.2 Mallat 算法的校验	94
8.3 小波滤波算法	95
8.4 小波滤波算法的策略	96
8.5 小波软阈值滤波算法	97
8.5.1 小波滤波算法的应用	98
8.5.2 小波滤波算法的过程	100
8.6 仿真实验及分析	101
8.7 本章小结	105
参考文献	105
第 9 章 基于自适应提升小波分析的光纤陀螺信号处理	107
9.1 自适应提升小波分析方法	107
9.1.1 更新滤波器设计	108
9.1.2 预测滤波器设计	108
9.2 Harr 自适应提升小波滤波方法	110
9.2.1 Harr 提升小波变换	110
9.2.2 仿真实验与分析	111
9.3 DB4 自适应提升小波滤波方法	116
9.3.1 DB4 提升小波变换	116

9.3.2 仿真实验与分析	118
9.4 本章小结	121
参考文献	121
第 10 章 基于混合型经验模态分解的光纤陀螺信号处理	122
10.1 经验模态分解滤波方法	122
10.2 经验模态分解方法的缺陷	123
10.2.1 端点效应处理	123
10.2.2 高频信号处理	125
10.3 混合型经验模态分解滤波策略	126
10.4 仿真实验及分析	127
10.5 本章小结	129
参考文献	129
第 11 章 总结与展望	131

第 1 章 绪 论

本章关键词

惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS)

干涉型光纤陀螺仪 (Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG)

小波变换 (Wavelet Transform, WT)

提升小波变换 (Lifting Wavelet Transform, LWT)

经验模态分解理论 (Empirical Mode Decomposition, EMD)

希尔伯特—黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT)

陀螺仪和加速度计等传感器的精度在很大程度上影响惯性导航系统的精度,因此提高惯性仪表的精度对于提高惯性导航与制导系统的精度是十分重要的。对于采用光学敏感元件的捷联惯导系统,短周期误差主要来源于光学陀螺的随机漂移。光纤陀螺由于其敏感 Sagnac 相移的传感元件光纤线圈对各种物理量极为敏感,会产生陀螺噪声。

“光纤陀螺的信号分析及滤波理论与技术”是根据我国航天领域相关技术研究现状提出和开展的,是我国现有航天技术研究领域中急需解决且难度很大的研究之一。

本书以干涉型光纤陀螺仪 (Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG) 为研究对象,通过对光纤陀螺建模与仿真以及实测数据分析,研究各类噪声参数的变化规律和影响光纤陀螺精度的关键因子,寻求这些噪声参数与不同精度等级光纤陀螺之间的规律,并结合分形理论提出基于传统小波变换 (Wavelet Transform, WT) 理论、提升小波变换 (Lifting Wavelet Transform, LWT) 理论的滤波方法,以消除分形噪声及高斯白噪声对光纤陀螺的影响。此外,还提出了一种基于提升小波及经验模态分解理论 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 的混合滤波方法来滤除光纤陀螺随机噪声。在已有的有关光纤陀螺信号处理及随机噪声滤除方法研究中,关于不同精度光纤陀螺仪的噪声源分析以及消噪对比方法研究方面,国内外还没有较为完整的研究报道,故此开展这个方向的

研究具有重大意义。

1.1 惯导及陀螺仪的发展动态

1.1.1 惯性导航系统的发展及现状

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)的发展史是基于不同动态检测技术之上的系统设计稳步发展的历史。1906年前后,德国安休兹博士发明了陀螺罗盘;20世纪30年代,工程师与科学家们开始思考开发实用型的导航自适应系统,用于惯性空间内太空飞行器的制导、导航和控制。从20世纪90年代至今,导航技术一直以特定精度下系统体积、质量和功耗的极小化为目标,并不断取得进展。当前INS已广泛应用于各类军用飞机、潜艇、船舶、导弹、地面车辆、机器人以及商业航空方面。随着现代微电子技术、计算机技术、现代控制论的发展及其最新成果在惯导技术领域内的应用,惯导技术正经历着一场变革。随着光电技术的发展,在惯性系统中,光纤陀螺凭借其体积小、质量轻、易维护和良好的性能价格比等特点,成为中高精度惯性导航系统的新一代首选惯性测量元件。

惯性导航系统主要分为平台惯导系统和捷联惯导系统。捷联惯导系统(Strap-down Inertial Navigation System, SINS)是一种先进的惯性导航技术,是近年来惯性技术的一个发展方向。它是将惯性传感器(陀螺仪和加速度计)直接安装在载体上,利用惯性传感器基准方向及最初的位置信息来确定载体的姿态、方位、位置和速度的自主式推算导航系统。它以数学平台代替常规惯导系统的物理平台,用计算机来完成导航平台的功能,因而带来了许多优点:整个系统的体积和成本大大降低;惯性仪表便于安装、维护和更换;惯性敏感器可以直接给出线加速度、线速度、角速度等信息;惯性仪表便于采用冗余配置,提高系统的性能和可靠性。

从导航系统的发展来看,主要是以新型光学陀螺代替传统的机械陀螺,其中光纤陀螺具有更广泛的发展和前景;以捷联惯导系统逐渐代替平台惯导系统;以组合导航系统代替纯惯性导航系统。

导航系统的精度是其应用的关键,如何在已有的导航系统硬件设备的基础上提高导航的精度是一个难点。在导航系统原有硬件的基础上,采用软件滤波方法可以降低系统的成本,提高系统的精度。通常的解决方法是滤波方法,即对测量传感器的输出信号进行信号滤波,对导航系统的状态进行状态滤波。

1.1.2 光纤陀螺的发展及现状

历经了20多年的研制,光纤陀螺在惯性技术领域的地位已经确立,目前人

们已经将其作为一项优先的技术用于惯性制导和控制中。1913年,萨格奈克(G. Sagnac)论证了无运动部件的光学系统可以检测相对惯性空间的旋转^[1]。他使用一个环形干涉仪,证实了在两个相反传输的光路中,旋转将会产生相位差。1925年,Michelson和Gale使用一个周长大约为2km的环形干涉仪测量出了地球的旋转。尽管这个奇特的现象早已被人们发现,但由于没能使其小型化来达到实用化,所以很少受到研究人员的关注。直至20世纪70年代低损耗光纤的发展以及由此引发的对于电信相关的器件(如半导体光源和探测器)的深入研究,才使得用多匝光纤线圈通过多次循环来增加萨格奈克效应成为可能。Picher和Hepper早在1967年就已经提出光纤陀螺的概念,后由V. Vali和R. Shorthill^[2]于1976年经过试验验证,从此光纤陀螺正式登上了历史的舞台。

陀螺仪是用于自主测量载体相对于惯性空间旋转运动的元件,以陀螺仪为核心的惯性测量系统在飞行器控制与制导,空中、海上和陆上导航/定位中都起着至关重要的作用。随着惯性技术的飞速发展,新型光纤陀螺正在逐步取代传统机械陀螺的位置。目前,干涉式光纤陀螺技术完全成熟,在现代武器装备及许多工业领域已呈现出日益增长的应用需求。表1-1给出了国外专家对近期陀螺仪市场的预测,它表明光纤陀螺已成为21世纪惯性测量与制导领域的主流仪表之一^[3]。

从首次提出了光纤陀螺的概念至今,光纤陀螺仪的突出特点使其在航天航空、机载系统和军事技术上的应用十分理想,因此受到用户特别是军队的高度重视,以美、日、法为主体的光纤陀螺仪研究工作已取得很大的进展。光纤陀螺仪研究工作大部分集中在干涉式,只有少数公司仍在研究谐振式光纤陀螺。光纤陀螺的商品化是在20世纪90年代初才陆续展开,中低精度的光纤陀螺(特别是干涉式光纤陀螺)已经商品化,并在多领域内应用;高精度光纤陀螺仪的开发和研制正走向成熟阶段。

表1-1 陀螺市场的近期需求与应用

近期导航应用	陀螺零偏稳定性要求 ($1/\sigma$)/($^{\circ}/h$)	采用的典型陀螺类型
巡航导弹和飞机导航系统	0.01 ~ 0.1	光纤陀螺或激光陀螺
战术导弹	0.1 ~ 10	光纤陀螺/硅微机械陀螺
飞行控制,“灵巧”武器	> 10	硅微机械陀螺

1.1.2.1 国外的研究状况

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^[4]、Honeywell^[5]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,该公司于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, 1000, 2500 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 $1^{\circ}/h \sim 0.001^{\circ}/h$,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集成光学相位调制器、 $0.83\mu\text{m}$ 宽带光源、光电探测器、前置放大器模块、保偏光纤偏振器等器件。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, Honeywell 公司使用4000m 光纤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 (Angle Random Walk, ARW) 精度为 $0.00019^{\circ}/h$, 偏置稳定性 (Bias Stability, BS) 优于 $0.0003^{\circ}/h$, 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。

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、全友电工、三菱、日本航空电子工业等公司。日立公司^[6]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,大大降低了系统成本,使光纤陀螺的民用范围得到很大的扩展,如用于汽车导航系统、清洁机器人、农用直升机姿态控制系统等。到1996年,日立公司已经具备每月生产5000只光纤陀螺的能力,在光纤陀螺的商业领域占据一定的市场份额。另外,该公司在一些高级雷克萨斯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^[7],其主要技术是使用 $0.83\mu\text{m}$ 弱相关光源、单根消偏 $1.3\mu\text{m}$ 光纤,以降低成本,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,该干涉型光纤陀螺在商业领域已经得到较为广泛的应用,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。

法国 Ixsea SAS 公司^[8]的前身是 Photonetics 公司的导航分部,从事光纤陀螺的研发 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。这类光纤陀螺曾应用在巴西 Micro 卫星 (PBM) 上。2001 年,该公司发布了当今最小的、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 IMU120 使用的光纤陀螺偏置稳定性达到 $0.003^\circ/\text{h}$, 精度最高的光纤陀螺随机游走精度达到 $0.00015^\circ/\text{h}$, 是 Octans (1998 年开发的能够敏感运动的寻北仪) 精度的 200 倍。

德国 LITEF 公司^[9]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 20000 只光纤陀螺在当今世界使用,产品应用领域涵盖太空、空中、陆地和水中和军用、民用范围。2003—2007 年,该公司将向德国和荷兰军方提供了 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。

Fizoptika 公司^[10]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,在俄罗斯国内外颇有市场。其主要种类有 VG910, VG941, VG951; 动态范围 $\leq 500^\circ/\text{s}$; 零偏稳定性可达 $0.3^\circ/\text{h} \sim 1.0^\circ/\text{h}$; 最小质量仅 40g。

1.1.2.2 国内的研究状况

我国也非常重视光纤陀螺技术的研究,20 世纪 80 年代后,许多大学和研究所以相继启动光纤陀螺的研发项目,如航天工业总公司所属 13 所和上海 803 所、北京航空航天大学、国防科技大学、清华大学、浙江大学等,也取得了一定的成绩。国内的光纤陀螺研制水平虽然与国际水平有一定距离,但已具备中、低精度要求,并在近年来开始尝试产业化。

我国该领域发展速度与国外相关领域的成果差距依然是存在的,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。另外,光纤陀螺小型化也是面临的一个主要难题。如何进一步改进第三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的计算机软件功能,以发送和补偿光纤传感器的性能,已经成为当务之急。

回顾光纤陀螺的发展历程,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,外部辅助技术的发展都对光纤发展起到了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,从近期看,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。目前,国外光纤陀螺的研究工作主要集中在下列一些新的研究动向^[11-19]。

(1) 光纤陀螺的小型化技术(包括光路小型化及电路小型化),采用三轴测量代替单轴,研发多功能集成光学芯片、保偏技术等。

(2) 光纤陀螺的多路复用技术,通常共用一个激光光源和/或一个探测器,可以较大程度地降低陀螺成本和减少体积。

(3) 深入开发中低精度光纤陀螺的应用,特别是民用惯性导航技术。

(4) 加强精密级光纤陀螺的技术与应用研究,开发新型的光纤陀螺。

1.2 光纤陀螺误差分析及信号处理研究概况

在陀螺仪误差分析及噪声滤除领域中,相关的信号处理方法有很多种。其中傅里叶变换、小波变换以及希尔伯特-黄变换都有广泛应用。另外,针对光纤陀螺中分形噪声特性,分形理论的应用及分形参数的估计方法也层出不穷。

1.2.1 傅里叶变换

傅里叶变换(Fourier Transformation, FT)是早期信号特征提取的主要手段,称为经典信号分析方法。基于 FT 的信号分析发展缓慢,主要原因是其计算量大,直到 1965 年 Cooley 和 Tukey 提出快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)之后,经典信号分析方法才得到迅速发展,并在设备状态监测和信号处理中发挥出巨大的作用。FT 分析方法实际上就是状态信息特征的提取方法,即提取能量在不同频段上的分布情况,并以此作为表征寿命特征频率的依据。运用 FFT 可以进行相关分析、包络分析和频谱分析等。直至今日,经典信号分析方法仍然是信号分析的主要方法之一^[20]。然而,FT 分析方法存在若干难以克服的缺陷,主要是其频率成分的分辨率不高、谱图有畸变、随机起伏明显、不光滑、不适用于短数据^[21]。

最为直观的方法是根据噪声能量一般集中于高频,而有效信号频谱分布于一个有限频率的特点,采用 FT 方法,将含噪信号变换到频域,通过低通滤波器进行滤波,从而达到消除高频噪声信号的目的。这种方法在有效信号和噪声信号的频带相互分离的时候能够获得比较好的去噪效果,但是当有效信号和噪声