

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

恒速偏频激光陀螺寻北系统精度 与快速性影响因素与机理研究

Research on Influencing Factors
and Their Mechanism of Accuracy and Rapidity for Constant-Rate
Biased Ring Laser Gyroscope North-Finding System

于化鹏 吴文启 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学恒速偏频激光陀螺寻北系统优秀博士学位论文丛书

恒速偏频激光陀螺寻北系统精度与 快速性影响因素与机理研究

Research on Influencing Factors and Their Mechanism of
Accuracy and Rapidity for Constant - Rate Biased Ring
Laser Gyroscope North - Finding System

于化鹏 吴文启 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

恒速偏频激光陀螺寻北系统精度与快速性影响因素与机理研究/于化鹏,吴文启著. —北京:国防工业出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-118-10265-9

I. ①恒… II. ①于… ②吴… III. ①激光陀螺仪—研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024623 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 9½ 字数 165 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 50.00 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

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流(北京航空航天大学)
陈家斌(北京理工大学)
李四海(西北工业大学)
徐晓苏(东南大学)
蔡体菁(东南大学)
刘建业(南京航空航天大学)
赵 琳(哈尔滨工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
王跃钢(火箭军工程大学)
吴文启(国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道,在明明德,在亲民,在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性导航技术实验室,长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩,先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪,在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性,服务于空中、地面、水面和水下等各种平台,有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中,实验室一直致力于教育教学和人才培养工作,注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才,毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线,为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是,培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士,是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文,不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料,也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来,国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量,采取了一系列措施,对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关,有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果,实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中,遴选出 23 本具代表性的优秀博士学位论文,分成五个专题,结集出版,以飨读者。这五个专题分别是:(1)激光陀螺惯导系统技术;(2)地磁导航技术;(3)嵌入式组合导航技术;(4)航空重力测量技术;(5)自主导航理论与方法。

结集出版的目有三:其一,不揣浅陋。此次以专著形式出版,是为了尽可能扩大实验室的学术影响,增加学术成果的交流范围,将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果,以一种“新”的面貌展现在同行面前,希望更多的同仁们和后来者,能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴,那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二,不宁唯是。以此次出版为契机,作者们也对原来的学位论

文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

精准的时空和方向基准是实现高精度导航的保证。实际应用中,寻北系统的反应时间往往仅为数分钟甚至更短。因此,如何快速测定方位、满足越来越高的寻北精度和快速性需求一直是导航领域的研究热点。在信息化革命牵引下,近年来惯性技术飞速发展,以惯性器件为核心、具有“自主”和“捷联”优势的惯性系统得到广泛使用。随着激光陀螺和石英挠性加速度计技术的成熟,也使得研制高精度恒速偏频激光陀螺寻北系统成为现实。

本书以提高恒速偏频激光陀螺寻北系统的实用性能为目的,研究了陀螺随机误差、旋转调制方案、系统参数误差和典型环境对连续旋转式寻北系统的寻北精度与快速性的影响机理,针对相应的实际应用问题提出了解决方案,并进行了测试验证。本书的各章节安排如下:

全书共分为5章,其中第1章为绪论,介绍研究背景及意义、寻北系统与寻北技术的国内外发展现状,阐明激光陀螺寻北系统的寻北精度与快速性的关键影响因素;第2~5章分别进行陀螺随机误差、IMU 旋转调制方案、系统参数误差和典型环境对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理分析,以自主设计的单轴恒速偏频激光陀螺寻北系统原理样机为实验平台,分别研究了恒速偏频激光陀螺角随机游走误差系数辨识方法、随机可观测性在方位连续旋转方案和多位置转停方案寻北优化设计中的应用、考虑纬度误差的寻北系统静基座 Kalman 滤波器设计、基于观测噪声自适应滤波的扰动基座快速寻北算法、基于扩张线性测量的观测模型对陀螺温度漂移的抑制算法、典型应用条件下寻北系统精度与快速性指标的分配等,得到了一些具有工程应用价值的观点。

本书在作者的博士论文基础上稍加改动完成,在作者博士研究期间,得到了吴文启教授、吴美平教授和胡小平教授的悉心指导,得到了国防科技大学机电工程与自动化学院导航技术教研室师生的大力支持和帮助,在此再次表示感谢!

本书的出版源于吴美平教授大力创导和推动,能有这样的机会让自己的研究所得付诸出版,十分感激吴老师!感谢练军想副教授的辛苦组织联络和细致工作!温馨的导航技术教研室是我们毕业学子永恒的家!

由于作者水平有限,书中难免存在纰漏和不当之处,敬请读者不吝赐教!

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 寻北系统与寻北技术发展现状	2
1.1.1 国内外惯性寻北系统的研究进展	2
1.1.2 激光陀螺寻北系统相关技术的发展现状	4
1.2 激光陀螺寻北系统的寻北精度与快速性的关键影响因素	16
1.2.1 激光陀螺随机误差	16
1.2.2 旋转调制方案	17
1.2.3 系统参数误差	18
1.2.4 典型环境	18
第 2 章 陀螺随机误差对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理分析	20
2.1 激光陀螺基本工作原理	20
2.1.1 抖动偏频激光陀螺	21
2.1.2 恒速偏频激光陀螺	21
2.2 恒速偏频激光陀螺寻北系统原理与原理样机组成	22
2.2.1 单轴速率转台主要性能参数	23
2.2.2 寻北系统中坐标系关系	23
2.3 激光陀螺角随机游走误差系数辨识	25
2.3.1 整周期采样法估计激光陀螺角随机游走误差系数	26
2.3.2 整周期采样法存在的缺陷	28
2.3.3 基于快速正交搜索算法的激光陀螺角随机游走误差 系数估计	29
2.4 恒速偏频激光陀螺寻北系统等效东向陀螺剩余误差精度分析	36

2.4.1	寻北系统静基座对准卡尔曼滤波器模型的建立	36
2.4.2	等效东向陀螺剩余误差评估方法	40
2.4.3	实验结果与分析	41
2.5	基于随机可控制性的陀螺随机噪声误差传播机理分析	44
2.5.1	随机可控制性定义	44
2.5.2	基于随机可控制性的陀螺随机噪声误差传播机理分析	44
2.5.3	实验结果与分析	46
第3章	旋转调制方案对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理分析	51
3.1	基于扩张线性测量的静基座快速对准卡尔曼滤波器模型	51
3.1.1	基于可观测性矩阵秩的分析方法	52
3.1.2	可观测性分析结果与讨论	52
3.1.3	基于扩张线性测量的观测模型	53
3.2	恒速偏频激光陀螺寻北系统的可观测度分析	54
3.2.1	随机可观测性定义	55
3.2.2	方位连续旋转式寻北系统的寻北快速性理论分析	56
3.2.3	恒速偏频激光陀螺寻北系统快速对准实验结果与分析	65
3.3	随机可观测性在多位置转停方案对准优化设计中的应用	71
3.3.1	二位置对准优化	71
3.3.2	三位置对准优化	78
第4章	系统参数误差对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理与补偿方法	83
4.1	标定参数误差对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理	83
4.1.1	标定参数误差对航向敏感误差的影响	84
4.1.2	航向敏感误差的在线补偿方法	86
4.1.3	实验验证与分析	87
4.2	纬度误差对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理	89
4.2.1	纬度误差对粗对准方位角的影响	89
4.2.2	考虑纬度误差的寻北系统静基座对准卡尔曼滤波器模型	90

4.2.3	实验结果与分析	93
第5章	典型环境对恒速偏频激光陀螺寻北系统的影响机理分析	96
5.1	基座扰动对寻北系统的影响机理	96
5.1.1	基座扰动对寻北快速性的影响	97
5.1.2	基于观测噪声自适应滤波的扰动基座快速寻北算法	99
5.1.3	实验结果与分析	101
5.2	冷启动环境对寻北系统的影响机理	105
5.2.1	冷启动环境下惯性器件的温度特性分析	105
5.2.2	惯性器件漂移对寻北系统的影响	109
5.2.3	基于扩张线性测量的观测模型对陀螺温度漂移的抑制	111
5.3	典型应用条件下寻北系统精度与快速性指标的分配	113
5.3.1	初始对准中寻北精度与快速性指标的分配	113
5.3.2	二次对准中寻北精度与快速性指标的分配	115
附录A	采用连续旋转方案时 $\Phi(t, \tau)$ 的解析表达式	119
附录B	Mathematica 软件符号计算和仿真程序	123
附录C	采用多位置转停方案时 $\Phi(t, \tau)$ 的解析表达式	126
参考文献		128

第1章 绪 论

要实现高精度导航,必须有精准的时空和方向基准作保证。随着科学技术的突飞猛进,工程实际应用对寻北装置提出了越来越高的寻北精度和快速性指标要求^[1-9]。惯性导航系统具有“自主性”这一其他导航系统难以比拟的优势,其不与外界发生任何光、电等联系,隐蔽性强,使得惯性导航系统成为不可或缺的导航手段,已在航空、航天和航海等领域中广泛使用^[3, 4, 8-15]。近年来,高精度激光陀螺技术的成熟,以及高精度石英挠性加速度计的研制取得重大进展,使得研制自主的、高精度的捷联式寻北系统成为现实。

在许多应用场合中,寻北系统的反应时间仅为5~15min。因此,如何快速、精确地测定自身的地理位置和方位成为亟待解决的问题^[16, 17]。传统摆式陀螺寻北仪一般只能在完全静止状态下使用,抗扰动性差,且功能单一^[16, 18]。

恒速偏频技术是速率偏频技术的一种特殊形式。速率偏频技术相对于抖动偏频技术过锁区次数大大减少,其理想的单周期过锁区误差和长时间测量误差更小,因此从精度指标上考虑,使用速率偏频技术可以实现比其他偏频技术精度更高的激光陀螺^[19, 20]。同时,速率偏频方案结构简单紧凑,系统鲁棒性高且具有旋转调制技术的优势。在一些对冲击振动能力要求较低的高精度应用中,如寻北、航海等,具有非常重要的应用前景。根据已公开发表的研究成果,20世纪90年代以来,美国、俄罗斯、德国等国对速率偏频激光陀螺捷联惯导系统进行了持续深入研究,已经生产出高精度舰艇导航系统成熟产品并投入使用^[19-24]。然而,国内对速率偏频激光陀螺捷联惯导系统的研究以基于理想假设的仿真研究居多,大多停留在理论分析阶段。加之国外技术封锁,国内与发达国家相比有相当大的差距。

因此,深入研究陀螺随机误差、旋转调制方案、系统参数误差以及典型环境对恒速偏频激光陀螺寻北系统的寻北精度和快速性的影响机理,着重研究寻北系统滤波状态的可观测性和可观测度、误差参数的建模与估计、典型环境中的误差抑制等问题,有望提高恒速偏频激光陀螺寻北系统的实用性能。

1.1 寻北系统与寻北技术发展现状

1.1.1 国内外惯性寻北系统的研究进展

随着科学技术的进步,寻北技术也在不断发展,目前已投入实际应用的主要有磁北法、天文观测法、陀螺寻北法等^[25]。磁北法受到地球磁偏角及磁偏角随时间变化的影响,天文观测法在矿山隧道、水下等复杂地形、复杂气候、战争环境等特殊条件下的通视性也将受到不同程度的制约,或者根本无法进行寻北,因此,二者在实际应用中都有很大的局限性^[26-28]。而陀螺寻北法具有惯性装置工作不受环境条件限制的固有优势,使其非常适用于地下和水下设施及武器装备的基准方位建立。

陀螺仪是惯性导航系统的核心部件之一,按各种类型陀螺仪出现及其理论建立的先后,可以将利用各种原理和方法的陀螺寻北系统进行归类^[14]。

陀螺寻北系统大致有两种类型:一种是基于陀螺进动效应的摆式陀螺寻北系统,另一种是基于测量地球自转角速率原理的捷联式寻北系统。

1. 摆式陀螺寻北系统

1949年,在船舶陀螺罗经的基础上,联邦德国 Clausthal 矿业学院研制成功第一台液浮式陀螺经纬仪,命名为 MW1。之后,联邦德国、美国、苏联、英国、日本等国对这种摆式陀螺定向设备开展了大量研究。经过 60 多年的研究和开发,摆式陀螺寻北系统寻北精度和反应时间都得到了极大的提高,系统重量大大减轻,其操作过程也正向自动化方向发展^[25, 26]。表 1.1 中列出了一些摆式陀螺寻北系统的代表性产品^[25-27, 29, 30]。

表 1.1 摆式陀螺寻北系统的代表性产品

名称	国家	研制单位	寻北精度	反应时间	备注
MW1	联邦德国	Clausthal 矿业学院	$\pm 20''$	1 ~ 2h	1949 年, 190 kg
GIB2	苏联	矿山测量研究院	$\pm 15''$	30min	1961 年
AAMS	美国	空军地球物理实验室	$\pm 2.1''$	80min	
DTJ-2	中国	1001 厂	$\pm 10''$	40min	1970 年, 60kg
KJD60	中国	唐山煤炭科学研究院	$\pm 20''$	30min	1972 年, 20kg
GP-1	日本	测机舍	$\pm 20''$	20min	吊丝
GI-011	匈牙利	MOM 厂	$5''(1\sigma)$	30min	吊丝

(续)

名称	国家	研制单位	寻北精度	反应时间	备注
MW77	联邦德国	WBK 矿山测量研究院	$\pm 5''$	10min	1977 年,吊丝
MARCS	美国	利尔宇航设备公司	$\pm 4''$	10min	吊丝,全自动测量
GYROMAT2000	联邦德国	WBK 矿山测量研究院	$\pm 3''$	10min	1978 年
JT15	中国	徐州光学仪器厂	$\pm 15''$	<25min	1980 年,吊丝
TDJ83	中国	航天发射技术研究院	$\pm 10''$	20min	1987 年,吊丝
IT3	乌克兰	中央设计局	$\pm 3''$	7min	磁悬浮支撑

2. 捷联式寻北系统

虽然摆式陀螺寻北系统反应时间较长、成本较高,但操作简单、寻北精度高,使其得到广泛应用。然而,随着惯性技术的发展,在精度要求较低、快速性和恶劣环境中的可靠性要求较高的场合中,捷联式寻北系统正不断涌现出来。表 1.2 列出了一些捷联式寻北系统的代表性产品和研究成果^[25, 27, 29, 31-38]。

表 1.2 捷联式寻北系统的代表性产品和研究成果

名称	国家	研制单位	寻北精度	反应时间	备注
NSK50	德国	Teldix 公司	$1'(1\sigma)$	4min	静压气浮陀螺
CFN 系列寻北仪	中国	信息产业部电子 26 所	$<18'(1\sigma)$ $<6'(1\sigma)$	<3min	挠性陀螺
AN/WSN-7B	美国	Litton 公司	$4.0'\text{sec}L(1\sigma)$		激光陀螺*
H-726MAPS	美国	Honeywell 公司	$<3.6'(1\sigma)$	<15min	激光陀螺*
APS	美国	电子设备系统公司	$<3.6'(1\sigma)$	2.5min	激光陀螺*
Sigma30	法国	通用机械电气公司	$<1.8'(1\sigma)$	<5min	激光陀螺*
Octans	法国	IXSEA 公司	动态: $\pm 12'$	4min	光纤陀螺*
寻北仪	中国	航天时代电子公司	$3.6'(1\sigma)$	5min	光纤陀螺
寻北仪	韩国	韩国海军研究院	$3.36'(1\sigma)$	5min	光纤陀螺

注: * 表示该产品是可以实现完整导航功能的捷联系统

由于不需要复杂的平台,捷联式寻北系统具有快速启动、可靠性高的优点^[5, 21, 35]。由表 1.2 可以看出,目前激光陀螺在捷联式寻北系统中占据主导地位;随着惯性技术的不断更新,捷联式寻北系统中陀螺仪的选择将愈加多样。

1.1.2 激光陀螺寻北系统相关技术的发展现状

1.1.2.1 激光陀螺器件误差特性辨识与补偿技术

惯性器件误差是惯性系统最主要的误差源,陀螺器件误差特性直接影响系统性能。对锁区阈值、漂移和随机噪声的处理是激光陀螺的关键技术,通过不断地深入解决以上问题,国内外逐步完善和发展起成熟的激光陀螺技术^[10, 12, 15, 39-43]。在激光陀螺惯性系统中,陀螺存在零偏项、标度因数误差项等非随机性误差和一定程度的随机噪声误差^[11, 44-48]。其中,存在非随机性误差是惯性器件固有的特性,每一种激光陀螺的非随机性误差均包含常值项、随温度变化项、逐次启动变化项和运行中漂移项^[44]。激光陀螺随机噪声误差源包括零偏不稳定性、角随机游走、量化误差、角速率随机游走和速率斜坡等^[44, 47-50]。

1. 锁区误差

激光陀螺实际生产应用中,减小锁区或消除锁区是发展多种偏频技术的根本推动力量^[19, 40, 42, 51]。目前,激光陀螺应用中主要采用抖动偏频模式,抖动偏频激光陀螺以高精度、高可靠性和相对的低成本刺激了捷联惯导系统的飞速发展^[10, 40, 52]。采用抖动偏频技术后,为了避免动态锁区,需要注入抖动随机分量^[20, 53, 54]。战德军^[20]和王可东^[53]等分别详细研究了随机噪声的注入原理、加噪方法、加噪效果,给出了实验验证。战德军还利用地球自转的角速率对动态锁区效应进行了实验测量,实验结果表明,动态锁区对角速率测量并未产生影响,证明了速率偏频方式下的动态锁区已经非常小。张庆华^[55]基于相关滤波技术实现了激光陀螺抖动误差信号的剔除,并用所研制的系统对某一型号的激光陀螺进行了测试,通过对采样信号和误差信号的观测得到验证结果,陀螺工作稳定,在5kHz的采样条件下,陀螺剔除后的剩余脉冲控制在 ± 1 内。

从精度指标上考虑,使用速率偏频技术可以实现比抖动偏频技术精度更高的激光陀螺^[10, 19, 20, 22, 39, 42, 54, 56-58]。1987年,Buschelberger^[22]指出激光陀螺闭锁效应致使其不能直接应用于导航系统,通过分析抖动偏频技术的缺点,进而提出速率偏频技术是克服这些不足、改进激光陀螺性能的有效手段之一。通过理论分析可知,对于同一类型激光陀螺,采用速率偏频技术相对于抖动偏频技术,精度能够提高一个量级。同时,文献[22]给出了详细的速率偏频激光陀螺制造参数。战德军^[20, 58]和韩宗虎^[56, 59]等分别针对速率偏频激光陀螺过锁区误差特性进行了理论和数值仿真分析,得出速率偏频激光陀螺过锁区误差与锁区大小成正比、与过锁区的加速度的平方根成反比的一致结论。

2. 标度因数误差和零偏

准确地辨识并补偿陀螺零偏和精确地确定标度因数,直接关系到激光陀螺的测量精度^[60-67]。

Aronowitz^[60]通过实验详细分析了标度因数与陀螺转动速率和光强的函数关系。Qin^[61]通过理论分析与实验发现,产生标度因数误差的因素主要有三项,即:平台结构引入的误差与时间无关,温度扩散不均引入的误差与时间成线性关系,而谐振腔不稳定性引入的误差与时间成指数关系。王锴^[62]对激光陀螺标度因数修正量分别进行了理论计算与实验验证,并通过调谐实验得出了腔频稳定性对标度因数修正量的影响大小。激光陀螺在速率偏频模式下,为了减少换向次数,陀螺标度因数误差在大角度旋转条件下会导致较大的等效量化误差。战德军^[63]通过理论分析、实验测试研究了速率偏频激光陀螺标度因数的正反转不对称性,详细讨论了标度因数与转动方向的关系,并提出了一种测量标度因数不对称性的实验方案,实验结果得出速率偏频激光陀螺标度因数不对称性约为 10^{-8} 量级。战德军^[20, 64]发现安装误差角直接决定标度因数的测量精度,进而提出通过将速率偏频激光陀螺倾斜安装于位置转台,分别测量其处于4种状态时激光陀螺的脉冲输出,运算得到安装误差角对标度因数进行修正的标定方法,对速率偏频激光陀螺标度因数进行了高精度测量,达到 10^{-7} 量级。张岩^[66]在速率偏频激光陀螺寻北仪中,根据标度因数缓变的特点,利用在线一阶递推估计算法对标度因数误差进行补偿,仿真与实验验证表明,速率偏频激光陀螺标度因数中存在的缓慢变化能够有效消除,进而寻北仪精度得到明显改善。战德军^[20, 63, 64]、Qin^[61]和张岩^[66]等分别从不同角度对速率偏频激光陀螺标度因数相关误差进行了分析研究。

章燕申^[67]于1994年就实际测试了某型速率偏频激光陀螺的零偏稳定特性。战德军^[20]通过实际测试,证明了在速率偏频方式下,偏频参数的改变对零偏的影响很小,零偏的变化小于随机性漂移的影响。张鹏飞^[65]根据大量的重复性高低温实验进行分析,发现光强与温度具有线性关系,并提出了利用光强对陀螺零偏进行补偿的改进方法。

3. 随机噪声误差

随着惯性系统的发展,基于激光陀螺的惯性系统在数据处理过程中,要求能够尽量抑制或消除潜在的随机噪声误差影响^[10, 39, 42, 44]。

Wang^[68]和Dorschner^[69]等分别对激光陀螺的潜在精度进行了理论分析和实验验证。战德军^[70]通过分析处理速率偏频激光陀螺随机漂移数据,发现量化噪声对陀螺精度影响较大,并提出了基于滑动平均的速率偏频激光陀螺静态角速率测量算法,理论分析和数值模拟结果表明,合理选择分组参数,滑动平均算

法可以有效降低量化噪声对静态角速率测量精度的影响。韩宗虎^[56]和顾冬晴^[71]等分别分析了偏频转台对速率偏频激光陀螺随机漂移的影响,通过理论推导和数值仿真分析了陀螺随机漂移引入的导航参数误差,为工程应用提供了重要参考。杨俊峰^[72]研究了角随机游走误差对导弹方位自瞄准精度的影响,得出降低角随机游走误差系数或延长系统自瞄准时间可以有效减小其影响。Chen^[73]和程耀强^[74]等分别利用不同结构的组合数字滤波器对激光陀螺抖动信号进行了有效滤除,降低了系统时延,极大地提高了系统的实时性,并进行了实验验证。

在对激光陀螺随机噪声的建模改进和数据分析方面,各国学者做了大量的探索和研究工作。Nejad^[46]、Lam^[47]、Ng^[49]、EI - Sheimy^[50]、Dorobantu^[51]和韦明^[75]等分别应用 Allan 方差法对激光陀螺静态输出信号中主要随机噪声进行了建模辨识,并利用辨识参数对激光陀螺相关特性进行了有效分析。郑佳华^[41]、Chen^[76]、Aranda^[77]、王跃鹏^[78]和 Lee^[79]等分别采用时间序列方法建立了抖动偏频激光陀螺的随机噪声误差模型,有效地抑制了激光陀螺的随机噪声误差,提高了激光陀螺的测量精度。并且,文献[76]将基于时间序列方法的卡尔曼滤波结果与利用时间序列神经网络方法处理结果进行了对比。结果表明,时间序列神经网络方法适用于辨识陀螺随机漂移,而基于时间序列方法的卡尔曼滤波仅适用于已知测量方差的情况。张传斌^[80]、吴一^[81]、EI - Sheimy^[82]和彭云辉^[83]等分别利用不同的小波分析的参数估计和滤波方法对随机噪声误差进行了建模和滤波去噪,实验结果证明了小波变换消除抖动偏频激光陀螺随机噪声误差影响的有效性,并且文献[81]测试表明,小波分析方法也能够有效地减小动基座的高频随机干扰影响。王雪梅^[84]提出应用一类非参数模型对抖动偏频激光陀螺随机漂移数据进行建模,并与 ARMA 模型进行了比较,实验验证了陀螺漂移存在弱非线性,建模后的残差平方和小于利用 ARMA 建模得出的残差平方和。

1.1.2.2 系统状态估计的可观测性和可观测度分析

捷联惯导系统常用卡尔曼滤波方法进行初始对准和标定等,而系统的可观测性和可观测度是评价所设计卡尔曼滤波器模型中误差状态的收敛速度和精度的重要依据,可以为改进对准方案、误差模型提供参考^[85-94]。

1. 可观测性分析

众所周知,对于线性定常系统,可以利用线性控制系统的结构分解理论进行可观测性分析^[95-104]。Bar - Itzhack^[96]和 Jiang^[97]等分别通过将系统状态分解到相应子空间,对惯导系统静基座对准误差模型状态的可观测性进行了研究。然而,二者对最佳可观测子系统的选择却给出了不同的结论,可见该定性分析方法

具有主观性^[101, 102, 105]。Lu^[95]和陈远才^[98]等分别通过可观测性结构分解,对原始对准误差模型进行了改造,有效改善了对准精度和速度。谢波^[103]、周姜滨^[104]、Lee^[106]、Hong^[107]、房建成^[108]、程向红^[109]和 Zhang^[110, 111]等分别通过计算线性系统可观测性矩阵的秩给出了所采用的对准误差模型各状态的可观测性。

而对于线性时变系统,进行可观测性分析是较为复杂的,需要积分计算 Grammian 可观测性矩阵。Goshen - Meskin^[112, 113]通过将系统分段定常化,利用线性时变系统的条带化可观测矩阵 (SOM) 取代系统总的可观测矩阵 (TOM) 进行分析,在对时变系统进行卡尔曼滤波之前即可建立相应的分段式线性定常系统 (Piece - Wise Constant System, PWCS),有效地分析系统各状态是否可观测的。PWCS 方法大大推进了线性时变系统的可观测性分析问题的研究,具有重要的工程应用价值^[93, 98, 114]。其他线性时变系统的可观测性分析方法有: Chung^[115]利用 Lyapunov 变换得到捷联惯导系统静基座对准误差模型的变换形式,进而解析地确定了误差模型状态完全可观测的充分条件;根据 КузОВКОВ 定义的可控性,可以利用行列式方法分析惯导系统的可观测性,只需判断滤波模型对偶系统的可控性^[100, 116]等。

惯导系统静基座对准滤波状态的可观测性较差,影响了卡尔曼滤波器进行状态估计的误差收敛速度及精度,同时造成了对准精度和速度之间的矛盾^[104, 109, 117]。谢波^[103]、程向红^[109]和 Fang^[117]等分别利用水平失准角估计方位误差角,提高了方位误差角的估计速度,从而加快了方位误差角的收敛速度,缩短了静基座对准时间。根据静基座对准的物理特性,周姜滨^[104]、Zhang^[110]、王立冬^[118]、熊剑^[119]、钱伟行^[120]、Yang^[121]、Acharya^[122, 123]、Kim^[124]、Johnson^[125]和 Zhang^[126]等分别利用 IMU 输出的角速度和比力信息,充分分析系统的运行特性,进而改进了卡尔曼滤波器的测量模型,有效地提高了系统滤波状态的可观测度,得到了更好的对准性能。

2. 可观测度分析

可观测性分析对系统各状态的可观测性只是给出了一个“是”或“否”的定性回答,而无法定量地给出某个系统滤波状态在不同时段的可观测程度。系统滤波状态的可观测度是系统本身的结构特性,它是真正反映系统滤波状态的收敛速度和精度的量化值^[127-129]。系统可观测度的研究通常采用两种方法:一是基于可观测矩阵的奇异值或特征值来计算系统各状态可观测度,二是利用误差协方差矩阵计算系统各状态可观测度。

在基于可观测矩阵的奇异值或特征值的分析方法相关研究中,程向红^[89]首次利用可观测性矩阵的奇异值定量地分析了系统滤波状态的可观测度,并通过