

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

# 基于机抖激光陀螺信号频域特性的SINS 动态误差分析与补偿算法研究

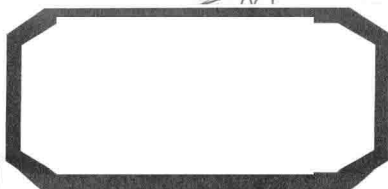
Research on SINS Dynamic  
Errors and Compensation Algorithms Based on Signal  
Frequency Domain Characteristics of Dither RLG

潘献飞 吴文启 吴美平 著 



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

国防科学技术大学



学位论文丛书

# 基于机抖激光陀螺信号频域特性的 SINS 动态误差分析与补偿算法研究

Research on SINS Dynamic Errors and Compensation  
Algorithms Based on Signal Frequency Domain  
Characteristics of Dither RLG

潘献飞 吴文启 吴美平 著



国防工业出版社

· 北京 ·

### 图书在版编目(CIP)数据

基于机抖激光陀螺信号频域特性的 SINS 动态误差分析与补偿算法研究/潘献飞,吴文启,吴美平著. —北京:国防工业出版社,2016.6

(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. 激光陀螺惯导系统技术)

ISBN 978-7-118-10173-7

I. ①基… II. ①潘… ②吴… ③吴… III. ①激光陀螺仪—动态分析—误差分析②激光陀螺仪—算法分析 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 093794 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10½ 字数 186 千字

2016 年 6 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，不宁为是。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

随着国内激光陀螺水平的不断提高,机抖激光陀螺捷联惯导系统在国内惯性技术应用领域正日益受到重视,发挥越来越重要的作用。机抖陀螺特有的机械抖动特性,在消除陀螺锁区的同时,也使捷联系统具有一系列新的更为复杂的动态误差特性,系统的优化设计与误差补偿研究具有尤其重要的理论和现实意义。本书以机抖激光陀螺捷联惯导系统为研究对象,提出了捷联系统的算法设计必须与系统的信号特性和应用环境相适应的思想,基于机抖激光陀螺在不同条件下的信号频域特性,开展了捷联惯导系统动态误差与补偿算法研究。本书主要完成了以下研究工作:

(1) 研究了激光陀螺的数字控制特性,设计了新的数字控制方法,为陀螺信号频域特性研究奠定了基础。根据陀螺的抖动偏频机理,研究了陀螺静态和动态锁区的误差特性,探讨了抖动参数与陀螺精度的关系,得到了陀螺抖动参数的选取原则;设计了一种新的不同于模拟抖动的非线性抖幅控制方法、随机注入方法和一种新的适于数字实现的直流稳频控制算法,建立了机抖激光陀螺数字控制系统。新算法大大简化了陀螺控制系统的硬件实现,提高了系统可靠性和可扩展性,改善了控制精度。

(2) 研究了机抖激光捷联系统的动态误差特性,建立了系统动态误差的优化处理原则。首先比较研究了整周期同步和数字滤波两种抖动解调方法,指出数字滤波法为提高捷联系统精度提供了更多更灵活的手段和可能性,已逐步取代前者得到了广泛应用;之后分类研究了捷联系统的动态特性,根据运动来源和运动性质的不同,对系统可能存在的圆锥和划摇运动进行了分类,建立了以减振器滤除干扰运动、以滤波器滤除干扰噪声的系统动态误差优化处理原则;最后把上述结论应用于机抖激光捷联系统,结合实际信号的频谱特点,研究了静态环境中陀螺抖动偏频和抖动耦合引入的各种动态误差及处理方法,振动环境中高频谐波振动引入的动态误差及处理方法,指出主振动的高频谐波是振动环境下影响系统精度的主要因素。

(3) 基于陀螺数字滤波的信号处理方式,提出应把陀螺信号滤波后的幅频和相频畸变作为影响捷联系统姿态解算精度的重要误差因素进行研究,指出通常的滤波器通带指标一般不能满足姿态解算的信号稳定性要求,可能严重影响捷联系统姿态解算精度。设计了一种新的能与信号频域特性相匹配的圆锥优化算法,推导了经典圆锥运动下的圆锥优化算法公式,研究了算法的误差特性,证明了该算法在任意运动形式下的普适性,并扩展了其在消除伪圆锥误差和补偿陀螺自身频率特性时的应用。优化算法不增加任何算法实现难度和计算量,优化效果与滤波器性能相关。仿真和实验研究表明,优化算法能有效补偿信号滤波引入的圆锥误差,随信号滤波条件的不同能提高数倍到数个量级的姿态解算精度。

(4) 圆锥算法受陀螺信号滤波影响,划摇算法同时受陀螺和加速度计两者的信号滤波影响。提出把陀螺和加速度计两者信号的滤波畸变作为影响捷联系统导航解算精度的重要误差因素进行研究,设计了一种新的能与信号频域特性相匹配的划摇优化算法,推导了经典划摇运动下的划摇优化算法公式,揭示了在相同的信号滤波条件下的划摇优化算法和圆锥优化算法依然满足算法的“对偶”关系,并证明了优化算法在任意运动形式下的普适性。仿真和实验表明,划摇优化算法具有与圆锥优化算法相似的误差特性,能有效补偿信号滤波引入的划摇误差,显著改善捷联系统导航精度。

(5) 针对角振动环境,设计了一种新的基于固定频率运动优化的圆锥算法。不同于标准算法误差随圆锥频率单调变化的特性,新算法在设定频点处具有误差极小点,因而能有效改善系统在特定频带上的姿态解算精度。当系统运动环境已知且运动频带较窄时,优化算法具有良好的应用效果。

最后,把基于信号频域特性的圆锥和划摇优化算法组成一套完整的优化导航算法,通过 Matlab 捷联系统仿真平台和某型机抖激光捷联系统在转台晃动、环形车载和远距离车载等动态环境中的实验,研究了信号频域特性对捷联系统导航精度的影响,验证了优化算法在不同运动环境和不同信号滤波条件下的补偿性能。



# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 研究背景及意义            | 1  |
| 1.2 国内外研究现状            | 4  |
| 1.2.1 激光陀螺控制技术研究现状     | 4  |
| 1.2.2 激光陀螺信号频域特性研究现状   | 6  |
| 1.2.3 导航算法动态误差补偿技术研究现状 | 7  |
| 1.3 本书的主要内容、组织结构及主要贡献  | 10 |
| 1.3.1 本书的主要内容与组织结构     | 10 |
| 1.3.2 本书的主要贡献          | 12 |
| 第 2 章 激光陀螺数字控制特性研究     | 14 |
| 2.1 激光陀螺基本原理           | 14 |
| 2.1.1 激光陀螺的工作原理        | 14 |
| 2.1.2 激光陀螺误差特性         | 16 |
| 2.2 激光陀螺抖动规律研究         | 17 |
| 2.2.1 抖动偏频基本原理         | 17 |
| 2.2.2 抖动偏频的误差特性研究      | 21 |
| 2.2.3 随机抖动的误差特性研究      | 22 |
| 2.3 激光陀螺数字抖动控制算法研究     | 23 |
| 2.3.1 数字抖动控制流程         | 24 |
| 2.3.2 数字抖动控制建模         | 25 |
| 2.3.3 数字抖动的抖幅控制算法      | 27 |
| 2.3.4 数字随机抖动注入的控制算法    | 28 |
| 2.4 激光陀螺数字稳频算法研究       | 30 |
| 2.4.1 稳频控制原理           | 30 |

|            |                                |           |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 2.4.2      | 数字直流稳频算法设计                     | 32        |
| 2.5        | 激光陀螺数字控制系统实现与实验验证              | 35        |
| 2.5.1      | 陀螺控制系统总体结构                     | 35        |
| 2.5.2      | 陀螺测试与实验                        | 36        |
| 2.6        | 本章小结                           | 39        |
| <b>第3章</b> | <b>基于信号频域特性的 SINS 动态误差特性研究</b> | <b>40</b> |
| 3.1        | 单个激光陀螺原始信号的频域特性                | 40        |
| 3.2        | 激光陀螺抖动解调方法研究                   | 41        |
| 3.2.1      | 激光陀螺信号的前期处理                    | 41        |
| 3.2.2      | 陀螺抖动解调方式对比研究                   | 43        |
| 3.3        | 捷联系统动态误差的分类及处理原则               | 46        |
| 3.3.1      | 捷联系统的基本结构                      | 47        |
| 3.3.2      | 捷联系统中圆锥和划摇运动的分类                | 48        |
| 3.3.3      | 不同性质的动态误差处理原则                  | 50        |
| 3.3.4      | 信号频域特性与系统动态误差的关系               | 51        |
| 3.4        | 不同环境中的捷联系统动态误差研究               | 53        |
| 3.4.1      | 捷联系统中的陀螺信号频域特性                 | 54        |
| 3.4.2      | 静态环境中的捷联系统动态误差研究               | 57        |
| 3.4.3      | 高频振动环境中的捷联系统动态误差研究             | 64        |
| 3.5        | 本章小结                           | 68        |
| <b>第4章</b> | <b>基于信号频域特性的圆锥优化算法研究</b>       | <b>69</b> |
| 4.1        | 圆锥误差机理                         | 69        |
| 4.1.1      | 圆锥漂移                           | 69        |
| 4.1.2      | 标准圆锥算法                         | 72        |
| 4.1.3      | 圆锥算法误差特性                       | 75        |
| 4.2        | 信号滤波引入的姿态解算误差研究                | 77        |
| 4.2.1      | 信号滤波引入姿态解算误差的机理                | 78        |
| 4.2.2      | 信号滤波引入的姿态解算误差特性                | 79        |
| 4.3        | 基于信号频域特性的圆锥优化算法设计              | 83        |
| 4.3.1      | 信号滤波引入误差的补偿思路                  | 83        |
| 4.3.2      | 圆锥优化算法设计                       | 84        |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3.3      | 圆锥优化算法的误差特性                | 88         |
| 4.3.4      | 圆锥优化算法的运动环境普适性证明           | 94         |
| 4.4        | 圆锥优化算法在机抖激光捷联系统中的应用        | 95         |
| 4.4.1      | 相对圆锥误差                     | 95         |
| 4.4.2      | 姿态算法漂移仿真                   | 98         |
| 4.4.3      | 系统实验验证                     | 99         |
| 4.4.4      | 圆锥优化算法的适用条件                | 100        |
| 4.5        | 圆锥优化算法的扩展应用                | 101        |
| 4.5.1      | 消除伪圆锥误差                    | 101        |
| 4.5.2      | 对陀螺自身频率特性的补偿               | 102        |
| 4.6        | 基于固定频率运动优化的圆锥算法            | 102        |
| 4.6.1      | 基于固定频率运动优化的圆锥算法设计          | 102        |
| 4.6.2      | 姿态算法漂移仿真                   | 105        |
| 4.7        | 本章小结                       | 106        |
| <b>第5章</b> | <b>基于信号频域特性的划摇优化算法研究</b>   | <b>108</b> |
| 5.1        | 划摇误差机理                     | 108        |
| 5.1.1      | 划摇漂移                       | 108        |
| 5.1.2      | 标准划摇算法                     | 110        |
| 5.1.3      | 划摇算法与圆锥算法的对偶关系             | 112        |
| 5.1.4      | 划摇算法的误差特性                  | 114        |
| 5.2        | 信号滤波引入的导航解算误差研究            | 115        |
| 5.2.1      | 信号滤波引入导航解算误差的机理            | 115        |
| 5.2.2      | 信号滤波引入的划摇算法误差特性            | 116        |
| 5.3        | 基于信号频域特性的划摇优化算法设计          | 118        |
| 5.3.1      | 划摇优化算法设计                   | 118        |
| 5.3.2      | 划摇优化算法与圆锥优化算法的对偶性          | 120        |
| 5.3.3      | 划摇优化算法的误差特性                | 121        |
| 5.3.4      | 划摇优化算法的运动环境普适性证明           | 123        |
| 5.4        | 本章小结                       | 124        |
| <b>第6章</b> | <b>机抖激光捷联系统动态误差仿真与实验研究</b> | <b>125</b> |
| 6.1        | 圆锥和划摇优化算法的综合仿真             | 125        |

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| 6.1.1       | 捷联系统仿真模型 .....     | 125        |
| 6.1.2       | 信号滤波对导航精度的影响 ..... | 128        |
| 6.1.3       | 优化导航算法的性能验证 .....  | 130        |
| 6.2         | 优化导航算法的实验验证 .....  | 131        |
| 6.2.1       | 转台晃动实验 .....       | 132        |
| 6.2.2       | 环形路线车载实验 .....     | 137        |
| 6.2.3       | 远距离车载实验 .....      | 142        |
| 6.3         | 本章小结 .....         | 146        |
| <b>第7章</b>  | <b>结论与展望</b> ..... | <b>147</b> |
| 7.1         | 全书总结 .....         | 147        |
| 7.2         | 研究展望 .....         | 149        |
| <b>参考文献</b> | .....              | <b>150</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

惯性技术是惯性敏感器、惯性稳定、惯性导航、惯性制导和惯性测量等技术的统称,是一项涉及多学科的综合技术,也是现代武器系统中的一项基本支撑技术。第二次世界大战后,随着武器系统性能的不断提高,对惯性技术的要求越来越高,惯性技术在武器系统中的应用越来越多,越来越显示出其不可替代的关键作用。

惯性导航是惯性技术的一种典型应用,惯性导航系统是一种利用陀螺和加速度计测量载体角运动和线运动,经过积分运算求出载体瞬时姿态、速度和位置的导航设备。它完全依靠自身的敏感器完成导航任务,无需依赖任何的外界信息,也不向外辐射任何能量,是一种全自主式的导航系统<sup>[1]</sup>,因此具有隐蔽性好、抗干扰、不受任何气象条件限制的优点,在军事上得到了广泛的应用。惯导系统设计理论大致经历了两个发展阶段:平台式和捷联式。在平台式惯导系统中,惯性器件安装在稳定平台上,以平台坐标系为基准测量载体的运动参数。随着计算机技术的发展,20世纪50年代末首次提出了捷联式惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)的概念,即取消复杂的机械平台装置而将惯性传感器直接固联在载体上。捷联式系统具有成本低、体积小、重量轻、可靠性高等优点,得到了快速发展和广泛应用<sup>[2-4]</sup>。

捷联系统对惯性器件的性能(如动态范围)提出了更高的要求,处理惯性传感器输出信息的难度和复杂性也大大增加。激光陀螺的出现是惯性技术的一场革命,光学陀螺与传统的机械转子陀螺的工作原理有本质的区别,后者服从解释宏观世界的牛顿力学,而前者服从解释微观世界的量子力学,是一种全新概念的惯性器件,是惯性器件研制和发展过程中具有划时代意义的产品,对现代的导航系统发展和进步起着不可替代的作用<sup>[5]</sup>。

环形激光陀螺(Ring Laser Gyroscope, RLG)具有启动快、动态范围宽、稳定性好、抗冲击振动和数字化输出等优点,这使其成为捷联式惯导系统的理想部件。20世纪60年代初期,美国开始研究RLG技术。1963年美国Sperry公司研制出了第一个RLG。1982年,美国Honeywell批量生产GG1342激光陀螺,其平

均无故障工作时间 (MTBF) 高达 90000h, 是机械陀螺无法比拟的。机械抖动激光陀螺的精度等级大致在  $10^{-2} \sim 10^{-3} \circ/\text{h}$  量级范围内, 是构造航空标准惯导的理想器件。随着激光陀螺批量制造技术的成熟, 激光捷联惯导系统 (Laser Inertial Navigation System, LINS) 在各个领域逐步取代平台式惯导系统, 特别是诸如飞机、导弹等中高精度应用领域几乎都采用激光捷联惯导系统。美国军用惯性导航系统 1984 年全部为平台式, 到 1989 年有一半改为捷联式, 1994 年捷联式已占到 90%。1996 年, 美国将 RLG-LINS 定义为军用标准精密导航仪<sup>[6]</sup>。

经过 30 多年的发展, 目前国外的激光陀螺捷联惯导系统在军用、民用方面被广泛采用<sup>[7-11]</sup>, 在中低精度捷联惯导系统中占有很大市场, 并且正在向高精度应用领域发展, 其中机械抖动激光陀螺系统应用最为成熟和广泛<sup>[12-14]</sup>。虽然科技进步将会使光纤陀螺和微机械陀螺精度越来越高, 但是, 目前已经成熟的激光陀螺捷联惯导系统在今后相当长一段时期内仍将保持其突出优势, 在各种应用领域中处于重要地位。

相对国外的成熟应用, 国内的 LINS 还处于发展阶段, 水平还存在较大差距<sup>[15]</sup>。LINS 的精度水平一方面取决于惯性器件 (主要是激光陀螺) 的性能, 另一方面取决于系统设计理论及工程实现水平。传统上, 我们更多地关注第一方面。特别是国内的激光陀螺发展初期, 陀螺水平不高, 陀螺精度是制约 LINS 整体精度的主要因素。近年来, 随着国内激光陀螺尤其是机械抖动激光陀螺水平的不断提高, 中高精度的机抖激光陀螺已逐步实现量产, 已可以满足大多数战术领域的应用要求, 系统设计理论及工程实现水平逐渐成为制约我国 LINS 整体精度水平的另一关键因素。

对于系统设计理论, 我们面临的问题是, 即使在同样的陀螺精度水平下, 我国的 LINS 整体精度与国外也有较大的差距。对于经典的捷联系统技术, 如传统的标定、对准、姿态解算及导航解算等捷联系统的主要理论算法, 经过多年的研究, 国内外发展都比较成熟, 已经形成一套经典的完善的理论体系<sup>[1]</sup>, 理论算法精度基本可以满足目前大部分的捷联系统精度要求, 算法误差应该在捷联系统误差中处于可以忽略的水平<sup>[16,17]</sup>。而在实际系统应用中, 这些高精度的算法却往往并不能达到期望的精度水平。这主要是因为这些算法一般是根据典型环境设计的通用算法, 当用在不同惯性传感器、不同系统结构、不同电气性能的捷联惯导系统时, 传感器信号往往包含各种不同的频率成分, 具有不同的频域特性, 信号的不同频域特性与通用的经典算法之间难以达到理想的匹配状态, 限制了算法性能的发挥。因此, 对于国内的 LINS 发展来说, 怎样切实提高各种理论和算法在捷联系统中的工程实用效果, 是捷联系统设计理论研究中的重要课题。

传统上, 我们习惯于在理论层面上探讨导航算法, 在器件层面上研究陀螺性能,

而简单地把高性能的陀螺和高精度的算法组合未必能得到高精度的导航结果,这是因为我们忽略了器件输出与算法输入之间的中间过程——信号采样和处理过程对导航结果的影响。在捷联惯导系统中,陀螺和加速度计的输出经计算机按一定的算法进行处理后,获得离散时间点上的航向、姿态、速度及位置导航解,所以捷联惯导系统实质上是一种数字信号处理系统<sup>[18]</sup>。陀螺和加速度计敏感系统运动后输出的信号必须经过采样和处理才能为算法所用,这就意味着,除了陀螺和加速度计本身的性能影响信号的质量之外,采样处理过程同样可能对信号的频域特性产生影响,从而影响捷联系统的解算精度。因此,要提高数字信号处理系统的性能,必须从信号的产生、采样、处理、应用整个流程分析信号与算法的关系,研究其误差特性。要提高算法在捷联系统中的工程实用精度,必须通过信号的频域特性研究不同性质的信号与算法误差的关系,把信号频域特性与算法误差特性统一分析,统一处理,使两者达到匹配状态,最大限度地发挥算法性能。

随着国内激光陀螺水平的不断提高,机抖激光陀螺捷联惯导系统在国内惯性技术应用领域正日益受到重视,发挥越来越重要的作用。机抖陀螺特有的机械抖动特性,在消除陀螺锁区的同时,也使捷联系统具有一系列新的更为复杂的动态特性。一方面,陀螺之间的抖动耦合,陀螺抖动对加速度计的影响,陀螺与系统机械结构的谐振等特性使捷联系统处于一个较为复杂的动态环境,使得陀螺输出中除了载体真实运动信息外,还包含一些其它的频谱成分,可能引入系统动态误差;另一方面,抖动偏频信号调制在陀螺输出中,必须进行抖动解调才能得到待测的载体角运动信息,抖动解调的低通滤波过程在消除抖动偏频的同时,限制了捷联系统的频带,并使载体的真实角运动频谱发生畸变,同样可能引入系统动态误差。可见,抖动使得激光捷联系统中的陀螺输出信号频谱成分变得复杂,抖动解调又使陀螺原始信号的频域特性再次发生改变。因此,激光陀螺输出信号的频域特性受抖动偏频(抖动控制方法)、抖动耦合、环境运动、抖动解调与滤波等多种因素的影响,特性比较复杂。

陀螺原始信号的频域特性是各种不同运动信息和干扰信息在捷联系统中的综合反映,抖动解调的信号处理过程将使各种不同性质的频谱成分具有不同的动态误差特性。因此,作为捷联系统算法的输入信号,陀螺信号的频域特性将直接影响捷联系统的动态误差特性,影响导航算法精度。开展基于机抖激光陀螺信号频域特性的 SINS 动态误差分析与补偿算法研究,就是从系统的工程应用角度出发,分析各种不同因素对激光陀螺信号频域特性的影响,研究不同性质的频谱成分与捷联系统动态误差的关系,探讨动态误差处理原则,并根据信号处理特性设计补偿算法。这对于完善我国机抖激光陀螺捷联惯导系统的误差补偿理论,提高系统实际精度水平具有重要的理论意义和实用价值。

## 1.2 国内外研究现状

本书主要研究激光陀螺信号的频域特性和捷联系统的动态误差之间的关系。激光陀螺信号频域特性主要与陀螺控制方法、抖动耦合与信号处理有关,捷联系统的动态误差主要包括决定姿态算法精度的圆锥误差和决定导航算法精度的划摇误差。

### 1.2.1 激光陀螺控制技术研究现状

国外的激光陀螺研究较早,理论水平较高<sup>[19-23]</sup>。激光陀螺的主要误差是闭锁误差、比例因子误差和零偏漂移误差,这些误差除了受激光陀螺光学本体工艺水平影响外,还受激光陀螺控制技术的影响,国外成熟的激光陀螺技术都是从不解决以上问题的过程中逐步完善和发展起来的<sup>[5,20,24]</sup>。

为了减小或消除锁区,激光陀螺发展过程中出现了多种偏频技术,如恒速偏频技术、交变偏频技术和四频差动技术<sup>[6]</sup>。全固态零锁区无机械运动机构的四频差动方法是一种理想的激光陀螺设计思想,但由于四频差动陀螺谐振腔内元件较多、磁光元件对磁屏蔽要求较高、器件损耗比较大等因素,使得陀螺漂移误差比较明显<sup>[25]</sup>,实现比较困难。而在目前已经实用的激光陀螺中,抖动偏频技术依然占据主导地位。

按照陀螺腔型和偏频方式,表 1.1 列给出了部分国外具有代表性的激光陀螺性能指标<sup>[26]</sup>。

表 1.1 部分激光陀螺性能指标

| 厂商           | 型号        | 范围/<br>( $^{\circ}/s$ ) | 漂移稳定性/<br>( $^{\circ}/h$ ) | 随机游走<br>( $^{\circ}/\sqrt{h}^{-1/2}$ ) | 环路光程/<br>mm | 腔型         | 线性度/<br>ppm | 偏频方式 | 应用领域   |
|--------------|-----------|-------------------------|----------------------------|--|-------------|------------|-------------|------|--------|
| 美国 Honeywell | GG1320    | $\pm 800$               | 0.03 ~ 0.1                 | 0.003 ~ 0.01                           | 150         | $\Delta$   | 30          | 抖动   | 飞机地面导航 |
| 美国 Honeywell | GG1342    | $\pm 400$               | 0.0075                     | 0.005                                  | 340         | $\Delta$   | 30          | 抖动   | 飞机导弹通用 |
| 美国 Honeywell | GG1389    |                         | 0.0003                     | 0.00004                                | 680         | $\Delta$   | 0.1         | 速率   | 科研     |
| 美国 Litton    | LG8028    | $\pm 400$               | < 0.01                     | 0.008                                  | 280         | $\square$  | 5           | 抖动   | 飞机     |
| 法国 Sextant   | PIXYZ22   |                         | 0.001                      |  | 220         | 三轴         |             | 抖动   | 飞机     |
| 美国 Sperry    | SLIC - 15 | $\pm 1500$              | 0.13                       |  | 100         | $\Delta$   | 100         | 磁镜   | 导弹     |
| 俄罗斯 Polus    | ZLK - 16  | $\pm 500$               | 0.2                        | 0.03                                   | 160         | $\diamond$ | 100         | 塞曼   | 导弹     |

注:  $\Delta$  为三角形谐振腔,  $\square$  为四边形谐振腔,  $\diamond$  为非平面四边形谐振腔, 三轴为三轴激光陀螺谐振腔



世界上最大的激光陀螺生产公司 Honeywell 公司陀螺的主要发展阶段<sup>[26]</sup>如表 1.2 所示。

表 1.2 Honeywell 的激光陀螺发展阶段

| 时间            | 陀螺     | 项目           | 发展趋势       | 阶段状态    |
|---------------|--------|--------------|------------|---------|
| 1975 ~ 1985 年 | GG1342 | 757/767/美国空军 | 向激光陀螺过渡    | 属于创新技术  |
| 1985 ~ 1995 年 | GG1320 | 嵌入式 GPS/INS  | 向小型、数字陀螺过渡 | 成为国防部标准 |
| 1995 ~ 至今     | GG1308 | 低成本导弹和地面导航   | 小陀螺战术应用    | 实现大量供给  |

可以看出,国外的激光陀螺已经涵盖了从低精度到高精度、从三角形到四边形、从单轴到三轴的大部分类型,美国已实现了机抖激光陀螺的大规模批量生产,从国外陀螺的精度指标及其应用的广泛性可以看出,其激光陀螺理论水平、制造工艺和控制技术都已相当成熟。

激光陀螺控制技术主要包括抖动控制技术、稳频技术和稳流技术等,其中抖动控制技术主要解决闭锁问题,稳频技术主要保证比例因子稳定性,两者都影响陀螺的零偏漂移,是激光陀螺的主要控制技术。陀螺的抖动方式,传统上是采用与陀螺抖动反馈同步的正弦波驱动陀螺抖动机构,并注入幅度随机噪声<sup>[5,27]</sup>。虽然具体的实现方式多种多样<sup>[28-31]</sup>,但大致经历了从模拟抖动控制(如 Ljung<sup>[28]</sup>的抖动控制方法)到数字抖动控制(如 Daniel A. Tazartes<sup>[29]</sup>和 Fritze<sup>[30]</sup>的数字抖动控制方法)的转变过程。陀螺的稳频控制也从早期的模拟控制<sup>[5]</sup>发展到后来的数字稳频控制<sup>[32,33]</sup>。正如表 1.2 所示,在 20 世纪 90 年代, Honeywell 的激光陀螺向小型化、数字化过渡<sup>[10]</sup>,其中就包括陀螺控制技术的数字化技术。另外,目前国外的激光陀螺大部分电路都已采用了专用的控制芯片,如 Honeywell 公司的 LaserefIII 和 H-774 型激光陀螺惯性基准系统等,可见其控制电路数字化、集成化程度很高。

国内的激光陀螺理论研究起步较晚<sup>[34-40]</sup>,但近年来机械抖动激光陀螺已逐步实现量产,关于陀螺锁区的研究逐步深入<sup>[41-43]</sup>,控制技术日趋成熟<sup>[44-48]</sup>。抖动控制技术中数字方波控制虽然也有部分研究<sup>[6]</sup>,但主要还是采用模拟控制技术<sup>[36,49]</sup>。稳频控制上,数字控制技术在国内外已有部分研究,如杨恒<sup>[50,51]</sup>采用的数字小抖动控制技术和刘放<sup>[52]</sup>采用的模糊控制技术,但其工程实用效果有待验证。

考虑到激光陀螺控制系统数字化和小型化的发展要求,以及控制电路专用控制芯片研究的需要,有必要设计能提高控制性能、缩小系统体积并具有好的工程实用性的数字控抖方法和数字稳频方法。研究数字控制过程对激光陀螺信号特性的影响,为本书基于机抖激光陀螺信号频域特性的 SINS 动态误差分析与补偿算法研究奠定基础。