

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

北斗/微惯导组合 导航方法研究

Algorithms for BD/MIMU
Integrated Navigation Systems

何晓峰 胡小平 罗兵 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

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

北斗/微惯导组合导航方法研究

**Algorithms for BD/MIMU Integrated
Navigation Systems**

何晓峰 胡小平 罗兵 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书基于我国的北斗卫星导航和微惯性导航系统,构建北斗/微惯导组合导航系统,研究了基于软件接收机的紧组合与深组合导航框架,对于两类框架中的主要关键技术进行了优化设计,对软件接收机信号捕获与 SINS 的适配性分析、基于软件接收机的 BD-2/MIMU 紧组合导航方法、基于软件接收机的 BD-2/MIMU 深组合导航方法、BD-1/SINS 组合导航方法等进行了深入研究,研制了 BD-2/MIMU 和 BD-1/SINS 组合导航系统原理样机,并进行了相关实验。

图书在版编目(CIP)数据

北斗/微惯导组合导航方法研究/何晓峰,胡小平,罗兵
著. —北京:国防工业出版社,2015. 10
ISBN 978-7-118-10275-8

I. ①北... II. ①何... ②胡... ③罗... III. ①组
合导航-研究 IV. ①TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 228220 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 11 $\frac{1}{4}$ 字数 195 千字

2015 年 10 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 (第二炮兵工程大学)
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

导航技术是现代武器装备的基准信息源和中心信息源,在现代高技术战争和社会经济发展中具有不可替代的作用。随着我国北斗卫星导航系统建设的稳步推进和惯性导航技术的飞速发展,以及我军制导弹药发展的迫切需求,北斗/微惯导组合导航方法及相关应用技术已成为研究的热点。

本书以我国自主建设中的北斗卫星导航系统为背景,对软件接收机信号捕获与 SINS 的适配性分析、基于软件接收机的 BD-2/MIMU 紧组合导航方法、基于软件接收机的 BD-2/MIMU 深组合导航方法、BD-1/SINS 组合导航方法等进行了深入研究,研制了 BD-2/MIMU 和 BD-1/SINS 组合导航系统原理样机,并进行了相关实验。具体内容分为 7 章,各章的内容安排如下:

第 1 章,绪论。着重阐述了本书研究的动机、国内外相关研究的现状与发展趋势、相关关键技术。

第 2 章,软件接收机信号捕获与 SINS 的适配性分析。首先,研究了基于软件接收机的组合导航原理;其次,从卫星信号捕获误差分析入手,结合 SINS 的误差方程,研究了动态条件下不同 SINS 误差对提高信号捕获概率的程度;最后,针对信号捕获与 SINS 的适配性问题进行了仿真分析。

第 3 章,基于软件接收机的 BD-2/MIMU 紧组合方法。首先,推导了作为选星准则的 GDOP 的理论下界,通过 STK 软件模拟了 BD-2 导航区域内的 GDOP 分布;其次,针对 BD-2 卫星分布特点,研究了一种 MIMU 辅助的快速选星算法;深入研究了基于 MIMU 辅助的接收机跟踪环路优化设计,在此基础上,研究了紧组合导航算法;最后,针对卫星信号缺失情况,提出了一种 ANFIS 辅助卡尔曼滤波的紧组合算法,分析了算法原理,进行了实验验证。

第 4 章,基于软件接收机的 BD-2/MIMU 深组合方法。首先,针对微陀螺仪系统误差较大的特点,引入半参数模型进行系统误差建模与补偿,采用推广的最小二乘降噪算法处理微陀螺仪随机误差;其次,基于矢量跟踪环结构,研究了深组合导航算法;最后,针对基带信号预处理的强非线性问题,采用半参数模型估计算法进行基带信号预处理技术研究。

第5章, BD-2/MIMU 组合导航系统的实现。首先, 详细论述了系统的构成、信息流程; 其次, 采用卫星信号模拟器与相关实验条件, 设计了实验流程和方法; 最后, 采用实际高动态飞行轨迹进行了实验研究, 并分析比较了实验结果。

第6章, 基于神经网络辅助 KF 的 BD-1/SINS 组合导航方法。第一, 针对 BD-1 有源定位方式带来的定位延迟, 研究了 BD-1/SINS 组合导航的数学模型; 第二, 对于神经网络辅助的卡尔曼滤波进行深入研究; 第三, 采用不同性能的惯性导航系统组建了组合导航原理样机, 进行了动态车载实验; 第四, 通过实验分析验证了算法性能。

第7章, 结论与展望。总结了本书研究的主要贡献, 指明了尚未解决的问题以及进一步研究的方向。

本书力求反映北斗/微惯导组合导航的关键技术研究成果, 突出工程实践与理论发展, 为相关专业技术人员提供技术参考。同时, 本书也可作为导航技术及相关专业的研究生教材。囿于组合导航技术随着军事技术的发展得以迅速发展, 由于编者的实践经验和认识水平有限, 书中难免存在错误和不妥之处, 敬请广大读者指正。

本书在编著过程中, 参考了编者所在课题组的相关研究成果, 并得到同事们的大力支持。同时, 国防工业出版社对本书的出版给予极大的支持与帮助, 在此一并表示诚挚的感谢。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 北斗/微惯导组合导航研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外发展及研究现状	3
1.2.1 全球卫星导航系统(GNSS)	3
1.2.2 捷联惯性导航系统(SINS)	6
1.2.3 组合导航技术的发展及研究现状	9
1.3 北斗/微惯导组合导航的关键技术	16
1.3.1 软件接收机与 SINS 的适配性分析	16
1.3.2 基于软件接收机的紧组合导航	17
1.3.3 深组合导航算法	19
1.3.4 有源定位条件下的组合滤波算法设计	19
1.3.5 关键技术研究评述	20
第 2 章 软件接收机信号捕获与 SINS 的适配性分析	22
2.1 基于软件接收机的组合导航	22
2.1.1 软件接收机	22
2.1.2 基于软件接收机的组合导航	24
2.2 卫星信号捕获性能与 SINS 的适配性分析	26
2.2.1 卫星信号捕获的误差分析	26
2.2.2 卫星信号捕获性能与 SINS 的适配性	39
2.3 仿真结果与分析	45

2.3.1	高动态运动轨迹	45
2.3.2	预检测积分时间 1ms 时 SINS 辅助的检测概率分析	45
2.3.3	预检测积分时间 10ms 时 SINS 辅助的检测概率分析	47
2.3.4	对比分析	47
2.4	本章小结	50
第 3 章	基于软件接收机的 BD-2/MIMU 紧组合方法	51
3.1	基于 MIMU 辅助的 BD-2 快速选星算法设计	52
3.1.1	GDOP 的理论下界	52
3.1.2	我国及周边区域 GDOP 分布	55
3.1.3	MIMU 辅助的快速选星算法设计	59
3.2	基于 MIMU 辅助跟踪环路的紧组合算法设计	64
3.2.1	基于 MIMU 辅助跟踪环路的紧组合算法总体设计	65
3.2.2	MIMU 辅助的跟踪环路设计	66
3.2.3	紧组合算法设计	69
3.3	卫星信号缺失情况下基于 ANFIS 辅助 KF 的紧组合设计	71
3.3.1	基于 ANFIS 辅助 KF 算法原理	72
3.3.2	卫星信号缺失情况下基于 ANFIS 辅助 KF 的算法设计	72
3.3.3	实验验证	75
3.4	本章小结	78
第 4 章	基于软件接收机的 BD-2/MIMU 深组合方法	79
4.1	半参数模型及估计方法	79
4.1.1	半参数模型	80
4.1.2	半参数模型的广义补偿最小二乘估计	80
4.1.3	正则矩阵与光滑因子的选定	81
4.2	微陀螺仪误差补偿算法设计	82
4.2.1	基于半参数模型的微陀螺仪系统误差补偿算法	82
4.2.2	基于推广最小二乘的微陀螺仪随机误差降噪算法设计	89
4.3	BD-2/MIMU 深组合算法设计	93
4.3.1	深组合导航系统结构	93

4.3.2	导航滤波器设计	94
4.3.3	矢量跟踪环结构	95
4.4	基于半参数模型的基带信号预处理技术	96
4.4.1	基带信号预处理模型	96
4.4.2	基于半参数模型的基带信号预处理	98
4.5	本章小结	98
第5章	BD-2/MIMU 组合导航系统的实现	100
5.1	组合导航原理样机的实现	100
5.1.1	系统的构成	100
5.1.2	系统的信息流程设计	102
5.2	实验设计	105
5.2.1	实验环境与信号模拟器	105
5.2.2	实验方法	107
5.3	实验与结果分析	110
5.3.1	实验轨迹与数据处理	110
5.3.2	卫星信号捕获实验结果与分析	112
5.3.3	组合导航实验结果与分析	115
5.3.4	深组合导航高动态场景仿真实验	122
5.4	本章小结	124
第6章	基于神经网络辅助 KF 的 BD-1/SINS 组合导航方法	126
6.1	BD-1/SINS 组合导航的基本原理	126
6.1.1	基本框架	126
6.1.2	系统误差模型	127
6.1.3	BD-1/SINS 组合导航的特点	129
6.2	基于神经网络辅助 KF 的组合导航方法设计	130
6.2.1	基于神经网络辅助 KF 的框架研究	130
6.2.2	BP 算法的改进	131
6.3	BD-1/SINS 组合导航系统的实现	133
6.3.1	实验方案	133

6.3.2 实验结果与分析	134
6.4 本章小结	145
第 7 章 结论与展望	147
7.1 本书总结	147
7.2 研究展望	148
附录 A 坐标系定义及地球模型参数	150
A.1 常用坐标系的定义	150
A.2 常用坐标系的相互转换	150
A.3 地球模型参数	151
附录 B 卫星运动产生的多普勒频移分析	153
B.1 MEO 卫星	153
B.2 IGSO 卫星	156
参考文献	157

第1章 绪 论

1.1 北斗/微惯导组合导航研究背景与意义

1.1.1 研究背景

导航技术深刻影响和推动着人类社会的发展^[1-3]。在信息化时代的今天,任何一种单纯的导航手段均难以满足人类与日俱增的导航需求。组合导航技术由于能够将若干种优势互补的导航手段结合起来,达到“ $1+1>2$ ”的显著效果^[4-6],已成为目前导航领域最具发展前景的技术之一^[7-13]。作为一种新颖的组合导航技术,卫星/惯导组合导航技术已成功应用于智能车辆、无人机、飞机精密进场、精确制导武器、重力梯度测量、卫星定轨、大地测绘等军民领域^[4, 14-16]。

未来战争是高技术条件下的信息化战争。以导航定位技术为核心信息源的精确制导武器在战场中得到了广泛应用,远程精确打击和“非接触作战”成为主要作战样式。精确制导武器已经逐渐演化为现代战争的主导者,成为加速战争进程、决定战争胜负的关键要素。高性价比导航与制导模块是精确制导武器的关键技术之一。

战术类精确制导武器对惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)的精度要求虽然不是很高,但是要求有低廉的成本、较短的反应时间、较宽的动态范围、较小的体积与质量和较强的环境适应能力。基于嵌入式一体化设计的卫星/微惯导组合导航系统具有成本低、体积小、动态性能好、抗干扰能力强、功耗低等优点,十分适合战术类精确制导武器,因此受到军方的高度关注。

基于紧(或深)组合方式的卫星/微惯导组合导航技术应用于精确制导武器,提高了武器装备的作战性能,其优势主要体现在以下几方面:

(1) 降低了成本,适合大批量装备。一方面,构成 MIMU 的微惯性器件主要采用硅或石英材料,适合大批量生产,因此具有很低的成本,而且 MIMU 具有质量轻、体积小、功耗低的优点;另一方面,卫星接收机芯片化设计已日趋成熟。这两方面为卫星/微惯导组合的模块化、一体化、芯片化设计提供了基础,使大批量

生产低成本的组合导航组件成为可能。

(2) 采用紧/深组合方式,提高了制导武器的命中精度。目前,微惯性器件的精度相对其他类型陀螺的精度较差,MIMU 长时间独立工作难以满足武器装备的精度指标要求。但是,采用紧/深组合方式对于 MIMU 与卫星接收机进行一体化设计,能够更准确地实时估计与补偿 MIMU 的器件误差和卫星测量误差;通过 MIMU 辅助的卫星信号跟踪环路设计,减小环路跟踪带宽,提高卫星信号测量精度,从而减小了组合导航误差,提高了制导武器的命中精度。

(3) 提高了动态性能。精确制导武器的高动态应用特点决定了其导航系统必须具备足够高的动态性。MIMU 动态范围很宽,抗过载能力可达到 $20000g$ 。而卫星接收机独立工作的动态性能较差,但是在卫星/微惯导组合导航中,可以通过 MIMU 测量得到的动态信息辅助卫星信号的捕获与跟踪,使卫星接收机在高动态环境中保持正常工作。GPS/MIMU 组合系统已经成功应用于由火炮发射的增程制导炮弹试验,制导炮弹出膛后 GPS 接收机迅速捕获跟踪了卫星信号,承受过载达到 $6500g$ 。

(4) 增强了抗干扰能力,提高了制导武器在恶劣环境中的生存能力。复杂电磁环境下的现代化战场,使卫星接收机的抗干扰能力受到了严峻的挑战。组合导航中采用 MIMU 辅助进行卫星信号捕获、跟踪,能够有效提高组合系统的抗干扰能力。特别是采用深组合方式的 GPS/MIMU 系统,相对紧组合方式的抗干扰能力能够提高 $15 \sim 20\text{dB}^{[17]}$ 。

(5) 可靠性增强。基于嵌入式一体化设计的紧/深组合卫星/微惯导组合系统,通过共用处理器、电源等方式,简化了电路设计,减小了温度、同步误差等系统误差,提高了系统的可靠性。

发达国家研制的卫星/微惯导组合导航系统正走向实用化,美军已成功地将 GPS(Global Positioning System) 与 MIMU(Micro - Electro - Mechanical - Systems based Inertial Measurement Unit) 的组合导航系统应用于联合防区外发射武器(JSOW)、联合防区外空地导弹(JASSM)、联合直接攻击弹药(JDAM)、集束炸弹(CBU)、灵巧炸弹,以及“捕食者”导弹、LOSAT(Line Of Sight Anti Tank missile)反坦克导弹、AGM - 130 导弹、AGM - 65 空地导弹等众多武器型号。

国内在 GPS/MIMU 组合导航技术方面的研究与应用滞后于发达国家。GPS/MIMU 紧组合导航的理论方法与仿真实验研究较为完善,而对深组合导航的研究仍处于起步阶段^[13],并且对 GPS/MIMU 紧组合导航实际应用的文献报道也较少,目前还未见关于低成本 GNSS/MIMU 深组合导航系统产品的公开报道。

虽然 GPS/MIMU 组合导航技术为我们提供了成功的经验,但是由于我国不

具有 GPS 系统的掌控权,如果武器装备依赖于 GPS 系统,在平时是不可靠的,在战时则是危险的。我国自主建设的北斗卫星导航系统,一期工程已投入使用^[18],二期工程正在积极建设,目前已实现了亚太地区的定位,全球系统正在建设^[19, 20]。北斗卫星导航系统相对于 GPS 等全球卫星导航系统,既有类似之处,又有其自身的特点^[21, 22]。在国家 863 和预先研究相关项目的支持下,本书对北斗/微惯导组合导航方法及关键技术进行了深入研究,重点研究了北斗/微惯导组合导航的适配性分析、紧组合方法、深组合方法及系统实现等。

► 1.1.2 研究意义

根据我国国情,采用高新技术对现役武器装备进行信息化改造是推进我军武器装备信息化建设的重要途径;发展我军常规制导化弹药,加强精确制导武器建设,对低成本组合导航系统提出了迫切需求。因此,立足我国的北斗卫星导航系统和 MIMU 器件,采用嵌入式一体化的紧/深组合导航方式,研制低成本的北斗/微惯导组合导航系统,具有十分重要的意义。本书的研究成果可以广泛应用于各军兵种的制导武器装备建设中,例如远程制导炮弹、微小型无人机、防区外投放的机载布撒武器系统、各类常规炸弹制导化改造等;此外,在民用领域也具有广阔的应用前景。

1.2 国内外发展及研究现状

► 1.2.1 全球卫星导航系统(GNSS)

1957 年 Sputnik 卫星的成功发射,开启了人类利用卫星进行导航的新纪元。通过对 Sputnik 卫星的多普勒频移测量,可以实现定位功能。在此基础上,1967 年美国海军开发了 Transit 系统^[23],苏联建立了类似的 Tsikada 系统,这两套系统均能够实现二维定位。但是由于卫星数目少,需 10 ~ 15min 连续观测才能定位,这给广泛应用带来了许多不便,特别是限制了高动态载体的应用。自 20 世纪 70 年代开始,美国和苏联分别开始建立 GPS、GLONASS 卫星导航系统,并于 20 世纪 90 年代投入使用^[4, 24, 25]。目前,所谓的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)主要是指美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS(GLObal Navigation Satellite System)、欧盟的 Galileo 和中国正在建设的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System)。我国在建立北斗一代卫星定位系统

(BD-1)的基础上,正在积极筹备建立北斗二代卫星导航系统(BD-2,也称为Compass)^[26]。另外,许多国家正在大力发展和建设自主的卫星导航系统,例如,法国正在运行中的DORIS(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)卫星导航系统,印度正在建设其自主的区域卫星导航系统IRNSS(India Regional Navigation Satellite System)^[27]以及日本正在建设中的QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)^[28]。毋庸置疑,全球卫星导航系统的发展正逐渐趋向世界多极化^[24, 29]。

1.2.1.1 GPS 系统

GPS系统于1994年正式投入运行,具有全球、全天候、连续实时导航定位能力。卫星星座由均匀分布在平均高度为20200km的6个轨道面内的24颗卫星组成,卫星运行周期约为11h58min,卫星发射L1(1575.4MHz)及L2(1277.6MHz)两个频率的信号。信号调制采用码分多址(CDMA)技术,L1调制民用粗码(CA)及军用精码(P码);L2仅调制精码。因此,GPS提供两种服务:标准定位服务(SPS)和精密定位服务(PPS)。SPS供民用社团使用,PPS则指定为美国核准的军方用户和选定的政府部门用户使用^[30]。

随着GPS系统的日益普遍使用,整个卫星导航产业快速崛起,成为国民经济与国防建设中耀眼的新星。但是,在数次美军参与的现代化局部战争中,由于敌方采用无线电干扰等手段,导致美军制导武器上的GPS接收机受到干扰,出现误炸平民等事件,充分暴露了GPS导航定位的易受干扰等弱点。为了更好地保护美方及其盟友使用GPS,阻止敌对方的使用和干扰,保持GPS在GNSS中的统治地位,美国提出了GPS现代化计划。GPS现代化的提法是1999年1月25日时任美国副总统的戈尔以文告的形式发表的。文告只提出了几项民用GPS导航技术的改进和发展,但整个GPS现代化实质是要加强GPS对美军现代化战争的支撑,并保持其在全球民用导航领域中的领导地位^[31]。美国公共法案规定,2000年9月30日以后,国防部任何飞机、舰船、装甲车辆以及非直接火力武器系统,如果不配备GPS接收机,将不能获得采购或技术改进资金。

在对军事用户需求调查的基础上,美国军方和情报部门在1999年6月提出了GPS现代化的军用部分:增加GPS卫星发射的信号强度,以增加抗电子干扰能力;在GPS信号频道上,增加新的军用码(M码),严格与民用码分开且M码要有更好的抗破译的保密和安全性能;军事用户的接收终端比民用终端具备更好的保护装置,特别是抗干扰能力和快速初始化功能;不断研究其他新技术以阻止和阻扰敌方使用GPS。GPS现代化计划中的民用部分包括:改善民用导航和定位的精度;扩大服务的覆盖面和改善服务的持续性;提高导航的安全性,如增

强信号功率,增加导航信号和频道^[32];保持 GPS 在全球定位系统中技术和销售的领先地位;保持和现有的、将来的其他民用空间导航系统的匹配与兼容^[33]。

近年来,美国实施 GPS 现代化是在配合内政、外交政策,以及与 GLONASS、Galileo 系统既竞争又合作的过程中逐步推进的。总体上,GPS 现代化措施的实施与原定计划有一定的延迟,但始终在 GNSS 的各方面技术中处于领先地位^[29]。目前,GPS 星座已包含 8 颗 Block II R-M 卫星^[1],自从 2008 年开始发射 Block II F 卫星,Block II F 卫星星座将逐步取代 Block II R 星座,其抗干扰能力是当前 GPS 卫星的 10 倍。为了满足将来导航战的需要,从 2016 年开始发射的 Block III 卫星的导航定位精度达 20~50cm,其抗干扰能力提高了 8 倍^[34]。可以预期,GPS 将随着卫星导航系统的激烈竞争而日益完善。

1.2.1.2 GLONASS 系统

GLONASS 于 20 世纪 70 年代由苏联开发,1995 年初步建成投入使用。其原理类似于 GPS,但是信号调制采用频分多址(FDMA);空间部分由 24 颗卫星组成,分布在轨道平均高度为 19100km 的三个轨道面上,卫星运行周期约为 11h15min。由于政治以及经费、技术等原因,GLONASS 一度陷入半瘫痪状态^[35]。近年来,俄罗斯意识到 GLONASS 在军事战略上的重要作用,着手重建系统使之正常工作^[24]。2004 年,印度和俄罗斯签署了《关于和平利用俄全球导航卫星系统的长期合作协议》,正式加入了 GLONASS 系统,计划联合发射 18 颗导航卫星^[36]。

2008 年 2 月 14 日,俄罗斯激活了 GLONASS 系统的几颗新卫星,而且宣布新卫星激活后,GLONASS 已经能覆盖俄罗斯 95% 面积和全球 83% 的面积。2009 年 3 月,GLONASS 系统已经有 20 颗卫星投入运行,第一颗第三代的 GLONASS-K 卫星也于 2011 年发射升空,新卫星的设计寿命延长至 12 年。俄罗斯联邦航天署署长阿纳托利·佩尔米诺夫近期在接受采访时表示,GLONASS 的卫星数量在 2010 年 10 月已达 24 颗,从而实现了全球覆盖。

2009 年 2 月 4 日,俄罗斯联邦委员会批准了《导航活动法》,对俄罗斯 GLONASS 的部署和使用做出了明确规定。该法规要求公路、铁路、海洋和航空等所有国有及商业公共交通工具在 2010 年年底前安装 GLONASS 接收机,强调“这对保证俄罗斯联邦的国防和安全、提高车辆运行管理效率和乘客安全、保障特殊危险货物的运输至关重要”。

1.2.1.3 Galileo 系统

1999 年 2 月 10 日,欧盟公布了欧洲导航卫星系统 Galileo,该系统与 GPS 和