

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

GPS/MIMU嵌入式组合 导航关键技术研究

Research on the Key
Technology of Embedded
GPS/MIMU Integrated Navigation

唐康华 吴美平 胡小平 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

GPS /MIMU 嵌入式组合 导航关键技术研究

Research on the Key Technology of Embedded
GPS/MIMU Integrated Navigation

唐康华 吴美平 胡小平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

GPS/MIMU 嵌入式组合导航关键技术研究/唐康华,
吴美平,胡小平著. —北京:国防工业出版社,2015. 10
ISBN 978-7-118-10276-5

I. ①G... II. ①唐... ②吴... ③胡... III. ①组
合导航—研究 IV. ①TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)22813 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 字数 185 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。

结集出版的目的是有三: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

现代战争的高技术特点表明,精确制导武器已经逐渐成为现代战争的主导,低成本导航与制导技术是消耗型制导武器的关键技术之一。卫星/MIMU 嵌入式组合导航系统具有成本低、体积小、重量轻、功耗低、动态性能高和抗干扰能力强等优点,因而在精确制导武器等军事应用方面具有非常重要的应用价值。本书以 GPS 为实例,开展卫星/MIMU 嵌入式组合导航一体化关键技术的研究,完成了 MIMU 辅助的 GPS 信号捕获、MIMU 辅助的 GPS 信号跟踪、MIMU 辅助的导航定位算法和 GPS/MIMU 深组合导航算法的分析,并给出了具体解决方案。主要的工作包括以下几个方面:

(1) 从卫星信号的检测概率、虚警率和捕获时间方面对时域相干和非相干捕获算法进行了分析比较。非相干捕获算法不受导航数据位的影响,而且多普勒频率误差对其影响较小,但是非相干捕获算法增加了平方损失;而相干捕获算法获取相同的捕获灵敏度,仅需较短的积分时间,但其受多普勒频移估计偏差和码移估计偏差的影响较大,并且受导航数据位的影响。基于时域标准相干和非相干捕获算法的特点,针对快速捕获的应用要求,提出了基于辅助的(卫星历书和星历辅助、卫星/MIMU 估计的多普勒频率辅助、位置和时间的辅助)时域相干捕获算法,分析结果表明该方法能有效地缩短捕获时间(从几百秒缩短到几秒)和提高捕获效率(在检测概率为 95% 的条件下,对 GPS 信号的捕获能力提高了 4.5dB/Hz)。

(2) 对接收机 DLL/PLL/FLL 的鉴别器进行了分析和比较研究,在综合考虑接收机跟踪环路中的各种误差源(热噪声、晶振误差、动态牵引误差等)的基础上,设计了一种适合于高动态的 GPS 环路结构:码跟踪环采用载波辅助的结构,载波环路采用双模态结构——二阶 FLL 辅助的三阶 PLL 结构。针对不同的晶振类型,综合考虑各种误差因素,设计了 MIMU 辅助的 GPS 接收机环路结构及 MIMU 辅助三阶 PLL 的最小带宽和最优带宽。根据设计的 MIMU 辅助的 GPS 环路结构,分析了其抗干扰性能,分析结果表明 MIMU 辅助的卫星接收机比一般的

GPS 接收机抗干扰性能至少有 11dB 的提高。

(3) 分析了基于卡尔曼滤波器的纯 GPS 导航定位算法,为了减少系统的状态维数,观测量采用伪距单差和伪距率单差(星间差)来抵消用户钟差和钟差漂移的影响,实验结果表明卡尔曼滤波导航算法使得导航定位结果更平滑,定位精度更高;同时分析了 MIMU 辅助的 GPS 导航定位算法,观测量采用伪距单差和伪距率单差来抵消用户钟差和钟差漂移的影响;针对低成本 MIMU 系统,设计了一种基于最大似然估计的自适应滤波算法,通过实验验证了该算法。静态实验结果表明:MIMU 辅助 GPS 定位系统的位置精度优于 5m,速度精度优于 0.1m/s,俯仰角和滚动角精度优于 0.2° ,航向角精度优于 0.2° (航向角辅助)。

(4) 为了提高系统的动态性能和抗干扰能力,本书进一步研究了 GPS/MIMU 深组合导航算法。首先论述了 GPS/MIMU 嵌入式深组合导航算法的基础——矢量跟踪环结构,着重分析了三种基带测量信号预处理方法;接着分析了 GPS/MIMU 嵌入式深组合导航算法中的导航滤波器设计,为了提高导航滤波性能,采用了降维的导航滤波算法;最后针对基带信号预滤波的强非线性问题,提出了基于 UKF 的基带测量信号预滤波方法,并对其性能进行了分析比较。

(5) 本书最后给出了 GPS/MIMU 嵌入式导航系统的实现方案及试验结果,客观评价了系统的关键性能指标,进一步验证了本专著提出的有关算法模型。系统主要性能指标为:

① 在 GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统中,当有星历辅助时 GPS 首次定位时间优于 10s。

② 在静态条件下,研制的 GPS 接收机的位置精度优于 5m,速度精度优于 0.1m/s;在动态车载条件下,水平位置误差优于 3m,高程优于 10m,与商用 GPS 接收机精度大体相当。

③ GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统在静态条件下的精度重复性为:位置精度优于 5m,速度精度优于 0.1m/s,俯仰角和滚动角精度优于 0.2° ,航向角精度优于 0.2° (航向角辅助)。

本书虽以 GPS 为实例,但是研究的成果同样适用于其他的卫星导航系统(如 GLONASS、GALLIEO、“北斗”II 卫星导航系统等)。

缩略语

AFRL	the Air Force Research Laboratory, 美国空军研究实验室
BPSK	Binary Phase - Shift Keying, 二进相移键控
CDMA	Code - Division Multiple Access, 码分多址
CMATD	Competent Munitions Advanced Technology Demonstration
DIGNU	Deeply Integrated (GPS/IMU/AJ) Guidance & Navigation Unit, 深组 合导航、制导单元
DDC	Digital Down Conversion, 数字下变频
DLL	Delay Lock Loop, 码延迟锁定环
ERGM	Extend - Range Guided Munition, 增程制导武器
FLL	Frequency Lock Loop, 锁频环
GLONASS	Global Navigation Satellites System, 全球导航卫星系统
GPS	Global Positioning System, 全球定位系统
GNC	Guidance Navigation Control, 导航、制导与控制
IDF	IntegrationDump Function, 积分清零函数
IF	Intermediate Frequency, 中频
IMU	Inertial Measurement Unit, 惯性测量单元
MEMS	Micro Electro - Mechanical Systems, 微机电系统
MIMU	MEMS Inertial Measurement Unit, 微惯性测量单元
NCO	Numerically Controlled Oscillator, 数控振荡器
NF	Navigation Filter, 导航滤波器
PF	Pre - filter, 预滤波器
PIT	Pre - detection Integration Time, 预检积分时间
PLL	Phase Lock Loop, 锁相环
PRN	Pseudo Random Number, 伪随机数
PPS	Pulse Per Second, 秒脉冲
SINS	Strapdown Inertial Navigation System, 捷联惯性导航系统
TTFF	Time To First Fix, 首次定位时间
VCO	Voltage Controlled Oscillator, 压控振荡器

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 卫星导航定位系统	1
1.1.2 微惯性测量单元(MIMU)	4
1.1.3 卫星(GNSS)/微惯性测量单元(MIMU)组合导航系统	6
1.1.4 本书研究的意义	8
1.2 卫星/MIMU 嵌入式组合导航技术的研究现状	9
1.2.1 卫星/MIMU 嵌入式组合导航技术的国外研究现状	9
1.2.2 卫星/MIMU 嵌入式组合导航技术的国内研究现状	12
1.3 卫星/MIMU 嵌入式组合导航关键技术的分析	12
1.3.1 外部辅助的卫星信号捕获技术	13
1.3.2 MIMU 辅助的卫星信号跟踪技术	13
1.3.3 MIMU 辅助的卫星导航定位算法	14
1.3.4 卫星/MIMU 深组合导航算法	14
第 2 章 外部辅助的 GPS 卫星信号捕获技术	17
2.1 卫星接收机时域捕获算法的基本原理	17
2.2 GPS 信号时域标准捕获算法	20
2.2.1 时域标准相干捕获判决算法	20
2.2.2 时域标准非相干捕获判决算法	24
2.2.3 时域标准相干与非相干捕获算法的性能比较	27
2.3 外部辅助的 GPS 信号时域相干捕获算法	29
2.3.1 历书和星历的辅助	30
2.3.2 MIMU 估计频率的辅助	32
2.3.3 时间和位置的辅助	34

2.4	辅助的 GPS 信号时域相干捕获算法的性能分析	36
2.5	本章小结	38
第3章	MIMU 辅助的 GPS 卫星信号跟踪技术	40
3.1	数字锁相环的基本原理	40
3.1.1	基本锁相环	40
3.1.2	环路参数的优化分析	43
3.2	GPS 接收机跟踪环路的鉴别器设计	45
3.2.1	GPS 接收机码跟踪环路(DLL)的鉴别器	45
3.2.2	GPS 接收机载波锁相环(PLL)的鉴相器	49
3.2.3	GPS 接收机频率锁相环(FLL)的鉴频器	51
3.3	GPS 接收机跟踪环路的跟踪误差分析	52
3.3.1	GPS 接收机码跟踪环路(DLL)的跟踪误差	53
3.3.2	GPS 接收机载波锁相环(PLL)的跟踪误差	55
3.3.3	GPS 接收机频率锁相环(FLL)的跟踪误差	60
3.4	高动态 GPS 接收机的跟踪环路设计	61
3.4.1	高动态 GPS 接收机的跟踪环路结构	62
3.4.2	高动态 GPS 接收机最优带宽的分析	63
3.5	MIMU 辅助的 GPS 接收机环路跟踪技术	65
3.5.1	MIMU 辅助的 GPS 接收机跟踪环路结构	65
3.5.2	MIMU 辅助的 GPS 接收机环路带宽的优化设计	67
3.5.3	MIMU 辅助的 GPS 接收机跟踪环路的性能分析	71
3.6	MIMU 辅助的卫星接收机抗干扰性能分析	71
3.6.1	GPS 卫星接收机抗干扰性能分析	72
3.6.2	MIMU 辅助 GPS 接收机抗干扰性能分析	74
3.7	本章小结	76
第4章	MIMU 辅助的 GPS 导航定位算法	77
4.1	GPS 接收机导航定位算法	77
4.1.1	GPS 动态定位的状态空间模型	78
4.1.2	GPS 动态定位的测量模型	81
4.1.3	GPS 接收机导航定位试验结果	83

4.2	MIMU 辅助的 GPS 接收机导航定位算法	84
4.2.1	MIMU 辅助的 GPS 接收机导航定位系统方程	85
4.2.2	MIMU 辅助的 GPS 接收机导航定位测量方程	86
4.3	MIMU 辅助的 GPS 导航定位自适应滤波算法	86
4.3.1	系统的噪声方差阵和测量方差阵对滤波性能的影响	87
4.3.2	自适应滤波方法	88
4.3.3	自适应滤波算法的性能分析比较	90
4.4	本章小结	91
第 5 章	GPS/MIMU 嵌入式深组合导航算法	93
5.1	嵌入式深组合导航算法的基础——卫星接收机矢量跟踪环结构 ...	93
5.1.1	基带测量信号预处理算法	94
5.1.2	导航滤波器模型	99
5.2	GPS/MIMU 嵌入式深组合导航算法	101
5.2.1	普通的导航滤波器模型	102
5.2.2	降维导航滤波器的设计	106
5.2.3	码/载波 NCO 控制量的计算	107
5.3	基于 UKF 基带信号预滤波器的设计	109
5.3.1	UKF 滤波的基础	109
5.3.2	基于 UKF 预滤波的设计	112
5.3.3	基带预处理算法性能分析比较	114
5.4	本章小结	115
第 6 章	GPS /MIMU 嵌入式组合导航系统的实现	116
6.1	GPS /MIMU 嵌入式组合导航系统的结构组成	116
6.1.1	系统的组成	116
6.1.2	GPS /MIMU 嵌入式组合导航系统的信息结构	118
6.1.3	时间同步关系	123
6.2	GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统软件设计	125
6.2.1	GPS /MIMU 嵌入式组合导航软件总体结构	125
6.2.2	GPS /MIMU 嵌入式组合导航系统的工作流程	126
6.3	静态试验	127

6.3.1 GPS 接收机的静态试验	127
6.3.2 GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统的静态试验	131
6.4 车载试验.....	135
6.4.1 GPS 车载定位结果	136
6.4.2 GPS/MIMU 嵌入式组合导航系统的车载定位结果	137
6.5 动态性能仿真试验.....	141
6.5.1 简单的高动态 GPS 中频信号仿真	142
6.5.2 GPS 接收机的动态性能仿真验证	143
6.5.3 MIMU 辅助的 GPS 接收机动态性能仿真验证	144
6.6 本章小结.....	146
第 7 章 本书结论与进一步工作设想.....	147
7.1 本书主要研究结论.....	147
7.2 进一步工作展望.....	150
参考文献.....	151

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 卫星导航定位系统

卫星导航定位系统是一种天基无线电导航系统,它通过测量若干颗已知星历的卫星至用户接收设备间的无线电延时来确定用户的位置。卫星导航定位系统能够在全球范围内,为多用户全天候、实时、连续地提供高精度的三维位置、速度及时间信息(Position, Velocity and Time, PVT),具有很强的军事用途和广阔的民用前景,许多国家和国际机构均大力开展这方面的研究。目前已经投入运营或正在建设的主要的卫星导航系统有美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLObal NAVigation Satellites System, GLONASS)、欧洲在建的伽利略全球卫星导航系统(GALILEO)、中国的“北斗”定位系统等,其中以GPS的应用最为广泛。

1. 全球定位系统(Global Positioning System, GPS) [1-8]

GPS于1994年正式建成并投入运行,具有全球、全天候、连续实时导航定位能力,其空间部分由24+3颗分布于高度约为20200km的6个轨道面的卫星组成,卫星运行周期为11h58min,卫星发射L1(1575.4MHz)及L2(1277.6MHz)两个频率的信号,信号采用码分多址(Code - Division Multiple Access, CDMA)方式,L1调制民用粗码(C/A)及军用精码(P);L2只调制精码。粗码容易捕获,定位精度在30m以内;精码另行施加保密(AS)技术,精度高,且可用双频求解电离层传播误差,定位精度达1m,但是非授权用户无法使用。

然而GPS系统却存在诸多的问题,如:①采用单一L1频段的C/A码进行伪距单点定位精度太低,难以满足高精度民用导航的需求;②在载波相位测量中,L2载波重建需依赖L1信号,质量不甚理想;③当前星历的有效期短且外推精度低;④信号易受干扰。针对GPS系统存在的问题,目前美国正在实施GPS现代化计划,其目标是在军事上强化并实现导航战的概念和思想,确保美国及其

盟国的军事优势,为此需要改善 GPS 的抗干扰性能和抗毁性,在空间部分和地面控制部分采取必要的措施,既要保证 GPS 现代化计划的实施有利于民用服务,又要保证不会因此而削弱军事优势。

总体上说, GPS 现代化的具体内容,就是在 L2 上增加一个民用码(L2 C/A);增加一个第三民用频率 L5。L5 信号在很大程度上是为改善当前 L1 C/A 码性能而专门设计的, L5 的功率将比现在的 L1 信号增加 6dB, 这些功率由 I 和 Q 两个数据通道平分,能适应于较差环境下的接收,提高抗干扰能力,尤其是对来自于 L5 相同频带的其他脉冲发射系统的干扰。在军用方面,将采用新的军用信号和编码结构,改善密码保护,改变数据信息的广播方式,其中最显著的举措就是增加新的军用 M 码信号,它将在必要时以比现有的 P(Y) 码高 20dB 的功率进行区域性的发射。同时开发与新的军用信号相适应的不再依靠民用码来快速捕获军用信号的技术。另外,频率还将加载一种比 L1、L2 C/A 码更长的码信号,即 NH 码,它能减少系统本身由于 CDMA 交叉相关引起的干扰。

2. 全球导航卫星系统(GLObal NAVigation Satellites System, GLONASS)^[9,10]

GLONASS 是俄罗斯以空间为基础的无线电导航系统,是继美国 GPS 系统之后又一个全天候、高精度的全球卫星导航定位系统。GLONASS 在功能上类似于 GPS,它能给具有相关装备的用户提供位置、速度和时间信息(PVT),不过卫星信号采用的是频分多址,其空间部分由 24 + 1 颗卫星组成,分布在轨道高度约为 19100km 的三个轨道面上,卫星运行周期为 11h15min。GLONASS 空间部分在 1996 年完成,它由 21 颗卫星星座加 3 颗处于工作状态的备用卫星组成,由俄罗斯空军监控运行。地面控制部分由散布在全俄罗斯的许多地面设备组成,用来控制和跟踪卫星,并把星历、定时信息及其他数据上传加载给卫星。俄罗斯及其以外的许多团体研制了各种民用和军用用户设备。但根据美国林肯实验室的研究报告,1998 年 2 月中旬, GLONASS 星座上仅有 12 颗健康的卫星。

俄罗斯正在加紧寻求国际合作,共同维持系统运行。目前,俄罗斯太空的卫星系统处于国家级水准,并达到了国防需求的最低水平。现有 17 颗卫星在轨运转,但其中一些的使用寿命将很快到期。有 6 颗以上的卫星即将发射,将作为主要卫星的备份,以确保系统的正常运转。根据俄罗斯联邦的全球导航卫星系统组建,在 2007 年开始运行,只给俄罗斯境内开放定位与导航服务。目前在轨运行卫星已达 30 颗,其导航范围可覆盖整个地球表面和近地空间。

3. 伽利略全球卫星导航系统(GALILEO)^[11-14]

基于政治、军事、经济和技术等方面的发展战略考虑,欧盟成员国于2002年3月26日达成一致的协议,启动民用卫星导航计划——伽利略(GALILEO)卫星导航系统。目前伽利略系统正在建设当中,整个系统将于2020年投入运行。

伽利略星座由30颗中地球轨道(MEO)卫星组成,其中3颗为备用卫星,用Walker星座标识符表示为27/3/1。卫星的轨道高度约为23616km,倾角为 56° ,轨道升交点在赤道上相隔 120° ,每个轨道面部署9颗工作星和1颗备份星,运行周期为14h4min。系统提供全球连续覆盖,地面可见卫星数量最多达13颗(截止高度角为 5°)。工作星失效后,由备份星替代,失效星将被转移到高于正常轨道300km的轨道上。伽利略的功耗为1.5kW,系统传递的信号强度(-155dBw/m^2)优于GPS(-158dBW/m^2),提高了抗干扰性。地面部分主要由2个位于欧洲的伽利略控制中心(GCC)和20个分布全球的伽利略敏感器站(GSS)及5个S波段和10个C波段的上行站组成。

伽利略卫星提供10个右旋圆极化的导航信号和1个搜救信号,伽利略系统是一个和GPS兼容的系统,但完全可以独立工作,其空间信号相当于GPSIIF/III或更好。频率选择上E5a和E5b与GPS的L5在同一频段上重叠应用;E1和E2与GPS的L1在同一频段上重叠使用;而E6是一个供商业服务和公共事业服务的专用频率。从信号结构的整体来说,将比GPS的民用码复杂。系统卫星区分采用码分多址(CDMA)技术,各卫星以相同的频率发射信号。伽利略卫星射频信号的调制除采用传统的二相移键控(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)调制技术外,还采用一种新的调制技术——二元补偿载波(Binary Offset Carrier, BOC)BOC(f_s, f_c)调制,其中 f_s 、 f_c 分别表示子载波频率和码速率,与BPSK相比,这种调制方式的优点是:具有较好的抗多路径效应能力,能够降低码噪声,易于信号跟踪。

4. 中国的“北斗”卫星导航系统^[15-17]

“九五”立项“北斗一号”工程——双星定位导航系统,于2000年10月31日发射了第一颗北斗导航试验卫星,同年12月21日发射了第二颗北斗导航试验卫星,构成了“北斗卫星导航定位系统”,这标志着我国拥有了自主研发的第一代卫星导航定位系统,该系统服务范围覆盖了中国大陆、台湾、南沙及其他岛屿、中国海、日本海、太平洋部分海域及我国部分周边地区。2003年5月25日,我国在西昌卫星发射中心成功地将第三颗北斗一代导航定位卫星送入太空。该卫星不仅是北斗一代导航定位系统的备份星,而且还承担了第二代北斗系统的关键技术试验任务,它与前2颗卫星一起组成中国自己完整的卫星导航定位系

统。北斗一代系统的顺利投入使用,解决了我国自主卫星导航系统的有无问题,是一个成功的、实用的、投资少的系统。虽然北斗一代卫星导航系统具有创新性,但系统的用户容量、导航定位维数和精度、系统的隐蔽性等方面还存在很多局限,在体制上也不能与 GPS 和 GLONASS 兼容,有待于发展成为更先进、更完善的北斗二代卫星导航系统。目前我国“北斗二代”卫星导航定位系统正在规划建设之中。

1.1.2 微惯性测量单元(MIMU)

众所周知,惯性导航系统以其独特的优点,在航空、航天和航海等领域得到了广泛的应用,惯性技术的发展水平直接影响一个国家武器装备现代化的程度。在现代以及可预见未来的高科技战场上,强技术对抗的复杂战场环境迫切需要微型飞行器、微型机器人等微小型侦察设备以及大量战术武器,这种需求促使惯性导航系统向低成本、微型化、低功耗的方向发展。

微惯性器件的主要特点有^[18-21]:

(1) 低成本。由于微惯性器件主要采用半导体或者石英材料,因此可以像制造芯片一样大批量生产,从而具有很低的成本。目前仅松下(Panasonic)公司每年就生产超过 200 万套采用微惯性器件的汽车导航系统,而 British Aerospace/Sumitomo 每年生产超过 700 万只微陀螺。

(2) 体积小、功耗低。由于在 MIMU 中已经可以采用平面(In-plane)安装的三轴惯性器件,美国用于 CMATD(Competent Munitions Advanced Technology Demonstration)项目的由 MIMU/GPS 组成的整个导航制导控制系统(Guidance Navigation & Control, GNC)的体积仅为 8 in^3 ,功耗仅为 3W。目前,Draper 实验室的用于 PGM(Precision Guided Munitions)项目的整个 GN&C 系统体积降至 4 in^3 ,并正在向 2 in^3 迈进。

(3) 全固态,可靠性高,抗冲击性好。目前国外的微惯性器件抗过载能力已经达到 $20000g$,并在火炮发射的制导炮弹中得到成功应用。

(4) 精度低。目前微陀螺的漂移远大于其他类型的常规陀螺。微惯导系统在无外界辅助信息的情况下导航的输出很快发散,因此在构成系统时,常需要其他辅助信息,来抑制系统定位误差的增长。由于 MIMU 和 GPS 接收机可以做到很高的集成,因此在战术武器上经常与 GPS 一起构成 GPS/MIMU 组合导航系统。

由于微惯性器件具有上述特点,因此国际上有很多机构和公司研究微惯性器件,主要的包括美国的 Draper 实验室、Honeywell、JPL 实验室、Crossbow,英国