

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

惯性辅助的高动态 GNSS基带信号跟踪技术

Inertial Aided High Dynamic GNSS
Baseband Signal Tracking Technology

郭瑶 吴文启 罗兵 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

惯性辅助的高动态 GNSS 基带信号跟踪技术

**Inertial Aided High Dynamic GNSS
Baseband Signal Tracking Technology**

郭 瑶 吴文启 罗 兵 胡小平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

惯性辅助的高动态 GNSS 基带信号跟踪技术/郭瑶等
著. —北京:国防工业出版社,2017.2

ISBN 978-7-118-10269-7

I. ①惯… II. ①郭… III. ①卫星导航—全球定位
系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024618 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 8 $\frac{3}{4}$ 字数 145 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

北斗卫星导航系统已经组网成功并在亚太地区提供服务,是全球四大卫星导航系统之一。现阶段航空航天领域的导航需求日渐迫切,因此北斗卫星导航系统的高动态应用成为研究热点。本书以高动态飞行器为应用背景,以 GNSS/INS 紧组合系统惯性辅助的基带跟踪环路为研究对象,研究速度辅助、加速度辅助、加加速度辅助的 PLL 结构和辅助方法,并分析辅助的 PLL 稳态误差和瞬态误差,以实现高动态卫星信号的稳定跟踪。

本书的主要工作和研究成果包括以下几个方面:

(1) 研究了 GNSS/INS 紧组合系统的基带跟踪环路表达式,设计了载波/码联合滤波器。将传统的离散形式跟踪环路表示成状态向量形式,结构简单明确,能够实时输出码相位、载波相位、载波多普勒频率及其变化率。在此基础上,设计了载波/码联合滤波环路,将载波跟踪和码跟踪在同一环路滤波器中完成。采用北斗 B3 频点数据进行验证,静态条件下,三阶 PLL 和一阶 DLL 组成的联合滤波环路相位精度提高 27%;高动态条件下,同阶次的独立滤波环路不能准确估计 40g 高动态信号的多普勒频率及其变化率,而联合滤波环路可稳定跟踪,跟踪误差约为 0.033 周(12° , 1σ)。

(2) 分析了 PLL 的瞬态响应过程,采用经典控制理论中的高阶系统瞬态指标分析方法、相平面法以及等效的微分方程法对 PLL 的拖入时间和瞬态相位误差极限值进行计算。PLL 的稳态误差和瞬态误差均满足各自阈值的情况下可稳定跟踪。分析和仿真实验结果表明,载体—卫星视线加速度阶跃是引起三阶 PLL 拖出并失锁的主要原因。

(3) 研究了惯性辅助的 PLL 结构及其稳定性。首先提出了速度和加速度直接辅助和间接辅助两种辅助方法。直接辅助方法和间接辅助方法各具优势:直接辅助方法瞬态响应过程迅速,瞬态性能更优;间接辅助方法不受辅助信息误差偏值的影响。分析了上述辅助方法的 PLL 稳态误差和瞬态误差,并给出稳定跟踪所需满足的误差阈值。其次研究了速度辅助的 PLL 误差传递机理,并推导

了误差放大系数。分析结果表明,速度直接辅助的 PLL 误差放大系数小于间接辅助的 PLL。GNSS/INS 紧组合系统中辅助信息更新率低于环路更新率,导致辅助信息时间延迟,研究了辅助信息时间延迟对跟踪性能的影响。实验结果表明,若辅助信息存在时间延迟,直接辅助的 PLL 跟踪相位偏差增大,间接辅助的 PLL 跟踪相位噪声增大,上述作用对加速度辅助方式的影响远小于速度辅助方式。

(4) 采用 GNSS 信号模拟器生成的高动态卫星射频信号和同步输出的惯导数据对 GNSS/INS 紧组合系统样机进行了定位测速实验验证,ECEF 坐标系下,载体最大加速度为 $50g$,最大加加速度为 $5g/s$ 。无辅助情况下,样机无法跟踪上述高动态卫星信号。加速度辅助情况下,样机可稳定跟踪,载体作水平面圆周运动时,三维位置误差为 $0.24m$ (RMS),速度误差为 $0.06m/s$ (RMS);载体作往复直线运动时,三维位置误差为 $0.39m$ (RMS),速度误差为 $0.44m/s$ (RMS)。

(5) 针对存在较高视线加加速度的高动态应用背景,提出了基于 KFPLL 的自适应跟踪方法与加加速度辅助跟踪方法。其中,自适应 KFPLL 能够根据相位误差调整 KFPLL 滤波器状态噪声矩阵相关参数,有效提高无辅助 PLL 对视线加加速度信号的跟踪性能。此外,加加速度辅助的 KFPLL 基于非线性跟踪微分器,由视线加速度估计视线加加速度,调整 KFPLL 滤波器状态噪声矩阵相关参数。若采用加速度辅助方法,辅助信息偏差可导致直接辅助的 PLL 产生相位偏差,视线动态性变化可导致间接辅助的 PLL 产生较长的瞬态过程,加加速度辅助的 KFPLL 解决了上述问题。采用 GNSS 模拟器输出的北斗 B3 频点数据进行验证,实验结果表明,上述方法可有效跟踪 $10g/s$ 视线加加速度的卫星信号。

缩 略 语

GNSS	Global Navigation Satellite System, 全球卫星导航系统
INS	Inertial Navigation System, 惯性导航系统
PLL	Phase Locked Loop, 锁相环
RMS	Root Mean Square, 均方根
KFPLL	Kalman Filter based Phase Locked Loop, 基于卡尔曼滤波的 PLL
GPS	Global Positioning System, 全球定位系统
GLONASS	Global Navigation Satellites System, 全球导航卫星系统
QZSS	Quasi - Zenith Satellite System, 准天顶导航系统
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System, 印度区域卫星导航系统
CDMA	Code - Division Multiple Access, 码分多址
FDMA	Frequency - Division Multiple Access, 频分多址
BPSK	Binary Phase - Shift Keying, 二相相移键控
QPSK	Quadri - Phase - Shift Keying, 四相相移键控
BOC	Binary Offset Carrier, 二相偏移载波
IMU	Inertial Measurement Unit, 惯性测量单元
NCO	Numerically Controlled Oscillator, 数控振荡器
GEO	Geostationary Orbit, 地球静止轨道
IGSO	Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, 倾斜地球同步轨道
MEO	Medium Earth Orbit, 中圆轨道
OCXO	Oven Controlled Crystal Oscillator, 恒温晶体振荡器
MEMS	Micro Electro - Mechanical Systems, 微机电系统

DMLGB	Dual Mode Laser Guided Bomb, 双模激光制导炸弹
GBU	Guided Bomb Unit, 制导炸弹
FPGA	Field Programmable Gate Array, 现场可编程逻辑门阵列
DSP	Digital Signal Processor, 数字信号处理器
EKF	Extended Kalman Filter, 扩展卡尔曼滤波器
SPKF	Sigma - point Kalman Filter, Sigma - point 卡尔曼滤波器
DLL	Delay Lock Loop, 码延迟锁定环
FLL	Frequency Lock Loop, 锁频环
PID	Proportion Integral Derivative, 比例积分微分
IDF	Integration Dump Functio, 积分清零函数
UFA	Unambiguous Frequency Aided, 无模糊频率辅助
PVT	Position Velocity Time, 位置速度时间
PSD	Power Spectral Density, 功率谱密度
LOS	Line of Sight, 视线方向

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	4
1.2 GNSS/INS 组合导航系统研究现状	5
1.2.1 GNSS/INS 组合导航理论的研究现状	5
1.2.2 GNSS 基带跟踪环路研究现状	7
1.2.3 GNSS/INS 组合导航设备研制现状	9
1.2.4 实验测试方法	11
1.3 GNSS/INS 紧组合系统惯性辅助的跟踪环路需解决的问题	14
1.3.1 惯性辅助的 GNSS 接收机基带跟踪环路基本结构设计	14
1.3.2 惯性辅助的 GNSS 接收机基带跟踪环路误差机理	16
1.3.3 基于卡尔曼滤波的 PLL 高动态跟踪方法	17
1.4 本书的研究内容、组织结构及成果	17
1.4.1 本书的研究内容和组织结构	17
1.4.2 本书的研究成果	18
第 2 章 GNSS/INS 紧组合导航	20
2.1 GNSS/INS 紧组合系统	20
2.2 惯性信息辅助的卫星信号捕获	21
2.2.1 惯性信息辅助的卫星信号捕获原理	22
2.2.2 基于 GNSS 模拟器的辅助捕获实验	23
2.3 基于状态向量表达式的跟踪环路	26
2.3.1 DLL	27
2.3.2 FLL	28

2.3.3	PLL	30
2.3.4	FLL 辅助的 PLL	32
2.4	载波/码联合滤波器	36
2.4.1	载波/码联合滤波器数学模型	36
2.4.2	实验验证	39
2.5	组合导航滤波器	42
2.6	本章小结	44
第3章	载波跟踪环路误差与瞬态响应	45
3.1	控制系统的一些分析方法	45
3.1.1	PLL 基本结构	45
3.1.2	高阶系统瞬态指标分析的近似方法	48
3.1.3	非线性控制系统瞬态响应的分析方法——相平面法	50
3.1.4	非线性控制系统的分析方法—微分方程法	53
3.2	载波跟踪环路稳态误差	54
3.2.1	FLL 稳态跟踪误差	55
3.2.2	PLL 稳态跟踪误差	57
3.3	载波跟踪环路瞬态响应	60
3.3.1	PLL 的拖入过程	60
3.3.2	PLL 的拖出过程	64
3.4	本章小结	66
第4章	辅助的 PLL 及其稳定性分析	67
4.1	辅助的 PLL	67
4.1.1	辅助的 PLL 结构与两种实现方法	67
4.1.2	直接辅助的 PLL 与间接辅助的 PLL 跟踪性能的 实验对比分析	71
4.1.3	辅助的 PLL 误差分析	73
4.2	速度辅助的 PLL 误差传递机理分析	80
4.3	辅助信息时间延迟对 PLL 稳态性能的影响	84
4.3.1	辅助信息时间延迟对直接辅助 PLL 的影响	85
4.3.2	辅助信息时间延迟对间接辅助 PLL 的影响	87

4.4	GNSS/INS 紧组合系统样机半实物仿真实验	89
4.5	本章小结	93
第 5 章	基于 KFPLL 的高动态跟踪方法	94
5.1	基于卡尔曼滤波器的 PLL	94
5.2	高动态下自适应跟踪方法	97
5.2.1	高动态下自适应跟踪方法	98
5.2.2	仿真结果	99
5.3	基于非线性跟踪微分器的加加速度辅助跟踪方法	101
5.3.1	基于非线性跟踪微分器的加加速度辅助跟踪方法	101
5.3.2	实验验证	105
5.4	本章小结	109
第 6 章	总结与展望	110
6.1	本书总结	110
6.2	惯性辅助方法的算法复杂度和鲁棒性分析	112
	参考文献	115

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

全球卫星导航系统(GNSS)是一种利用接收设备对接收到的卫星导航信号进行处理,从而获得本地三维位置、速度和时间信息的天基导航系统^[1],具有全天候、实时性、连续性的优势特点。目前已经成功运营或大力发展的全球四大卫星导航系统有美国的GPS系统、俄罗斯的GLONASS系统、欧洲的Galileo系统和我国的北斗二代卫星导航系统。此外,日本的QZSS和印度的IRNSS等卫星导航增强系统也发挥了重大作用^[2]。全球四大卫星导航系统的情况介绍如表1.1所示。

表 1.1 全球四大卫星导航系统情况介绍

卫星导航系统	GPS	GLONASS	Galileo	北斗二代
卫星总数	24 ^[3]	30 ^[4, 5]	27 ^[6]	35 ^[7]
当前卫星数目	31	29	4	16
频段	L1/L2/L5 ^[8]	L1/L2/L3	E5/E6/L1 ^[9]	B1/B2/B3
信号复用方式	CDMA	FDMA ^[9]	CDMA	CDMA
码调制方式	BPSK/BOC ^[10]	BPSK	BPSK/BOC	QPSK/BPSK/BOC
定位精度	5~10m ^[11]	2.8m	10~15m	10m

现阶段航空航天领域的导航需求日渐迫切,航天器、高超声速飞行器、无人机等^[12, 13]高动态研究和应用逐步增多。载人航天器能承受的最大过载不超过 $10g$ ($1g \approx 9.8\text{m/s}^2$, 重力单位),而无人机更为灵活、机动性更高,其过载可达 $25g$ ^[14]。GNSS可全天候提供载体的位置速度测量信息,但GNSS接收机动态性能有限,根据锁相环稳态误差阈值表达式,在 45dB-Hz 载噪比情况下,若载体一卫星视线加加速度超过 $2g/s$,将引起带宽为 10Hz 的三阶PLL失锁。因此,有必要研制适用于视线加速度大于 $10g$,视线加加速度大于 $2g/s$ 的高动态GNSS

导航设备。

在高动态情况下,GNSS 的跟踪环路容易发生失锁,导致其不能提供准确的三维载体位置和速度信息^[15]。此外,GNSS 还存在卫星信号容易被遮挡、干扰和欺骗的缺陷^[16]。惯性导航系统(INS)是完全自主的导航系统,具有不受外界干扰的优势,但由于其工作原理是对陀螺和加速度计测得的角速度信息和加速度信息进行积分,从而获得载体姿态、位置和速度,因此会导致输出误差随时间累积^[17]。综上可看出,GNSS/INS 组合导航系统的研制是针对上述问题的一个很好的解决方案^[18],其特点如表 1.2 所示。

表 1.2 GNSS、INS 及其组合导航系统的特点

GNSS 系统	INS 系统	GNSS/INS 组合导航系统
劣势:信号易被遮挡、干扰和欺骗	优势:完全自主、连续输出	双系统工作,组合导航系统可连续输出定位测速与时间信息,不受外界干扰
优势:误差不随时间累积	劣势:误差随时间累积	采用 GNSS 测量信息校正 INS 器件误差,组合导航系统误差不随时间累积
劣势:跟踪环路可承受的动态性有限	优势:惯性器件的动态范围宽	采用 INS 测量信息辅助 GNSS 跟踪环路,组合导航系统动态性能更高
	优势:可测量载体姿态信息	通过 GNSS 测量信息校正 INS 器件误差,得到更准确的载体姿态信息

GNSS/INS 组合导航系统由 GNSS 模块、INS 模块和组合导航模块组成。其中,INS 模块将惯性测量单元 IMU 测得的角度增量、速度增量进行误差补偿后,采用捷联惯导算法完成惯性导航计算,以得到位置、速度、加速度和姿态等惯性信息;GNSS 模块将卫星接收到的射频信号经过射频前端处理后,通过捕获、跟踪以及导航数据的解析,来获得星历、基带 I/Q、伪距、伪距率、位置、速度等测量信息。组合导航模块则将惯性测量信息与卫星测量信息进行卡尔曼滤波,输出位置、速度以及 IMU 误差等。然后,将 IMU 器件误差反馈至 INS 模块,在一个滤波周期内对 IMU 误差进行修正。GNSS/INS 组合导航系统有三种实现方式:松散组合、紧组合和深组合^[19, 20],其原理框图和特点总结如表 1.3 所示。由表 1.3 可得,松散组合、紧组合、深组合三种组合方式的区别在于:

(1) 三种组合方式中,GNSS 模块提供给组合导航滤波模块的测量信息不同,组合程度不同。

(2) 在紧组合和深组合的 GNSS 基带处理模块中,INS 信息起到了一定作用,通过惯性信息及星历信息计算得到环路数控振荡器 NCO 的控制量,并将其

反馈到 GNSS 模块中,从而实现调整本地信号频率的目的。因此,这种深度的组合方式也称为耦合。(有些文献将包含惯性辅助的 GNSS/INS 系统称为深组合,因此,对于深组合并无绝对确切的定义^[21]。)

(3) 紧组合和深组合的区别还在于是否包括传统意义上的 GNSS 跟踪环路。

松散组合系统将 GNSS 模块与 INS 模块作为两个独立的个体,从而无法适应高动态或强干扰等严苛的应用环境,而深组合系统的计算复杂度高,实现难度大,因此紧组合导航系统是工程实现的最佳选择。紧组合通常以伪距、伪距率信息作为组合导航滤波器的观测量,估计惯性器件误差并进行校正,其中,紧组合中的伪距信息来源于码跟踪环,伪距率信息来源于载波跟踪环。值得指出的是,紧组合系统中惯性辅助的 GNSS 跟踪环路是关键环节,通过惯性信息的辅助,可提高环路的动态性能和抗干扰性能。

表 1.3 松散组合、紧组合和深组合原理框图与特点

	原理框图	特点
松散组合		(1) 组合导航滤波采用 GNSS 输出的位置/速度信息; (2) GNSS 模块与 INS 模块相互独立; (3) 系统简单易行,计算复杂度低
紧组合		(1) 组合导航滤波采用 GNSS 输出的伪距/伪距率信息; (2) INS 信息用于辅助 GNSS 基带跟踪环路; (3) 系统设计较为复杂,组合滤波器状态更多
深组合		(1) 组合导航滤波采用 GNSS 输出的 I/Q 信息; (2) GNSS 基带无传统意义的跟踪环路,采用 INS 信息调整基带 NCO ^[22] ; (3) 系统设计非常复杂,计算量最大

1.1.2 研究意义

自 2000 年我国建成北斗导航试验系统(北斗一代^[23])以来,该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域,产生了显著的经济效益和社会效益。在此基础上,我国大力发展北斗卫星导航系统(北斗二代)。北斗卫星导航系统的组成部分包括空间段、地面段和用户段。在空间段,从 2007 年开始至今,我国一共发射 16 颗北斗二代导航卫星,包括 6 颗 GEO、5 颗 IGSO 和 5 颗 MEO。2012 年底公布了北斗卫星导航系统的公开服务信号 B1I 接口控制文件^[7],正式向亚太地区提供区域服务。北斗导航系统建设的下一个目标是,2020 年左右,北斗卫星导航系统形成全球覆盖能力^[24]。在地面段,除主控站、注入站外,我国具备完整的卫星监测网络,其中包含横跨我国本土的数个测控站、国外站以及海上测控站。在用户段,众多高等院校与研究单位就相关课题进行了大量研究,军用领域和民用领域的很多设备均装备了北斗导航终端。在民用方面,北斗导航系统已经并将更多地应用于个人位置服务、气象、交通、海运、航空、救援、授时、农业、测绘等领域。在军用方面,北斗导航系统也将发挥越来越重要的作用。

随着我国北斗导航系统的组网成功并日趋完善,且北斗、GPS 等 GNSS 导航系统工作原理大致相同,在此背景下,对高动态 GNSS/INS 组合导航系统相关理论进行研究,将对北斗/INS 组合导航系统的工程应用有着重要的指导意义。

基于表 1.3 所示的 GNSS/INS 紧组合系统,本书主要在惯性辅助的高动态 GNSS 基带信号跟踪方面展开研究,力求对高动态应用环境下惯性辅助的 GNSS 基带跟踪环路原理、结构、实现方法与误差分析等问题进行全面研究。

本书的研究意义主要包括以下三个方面:

(1) 对惯性辅助的 GNSS 跟踪环路结构和实现方法进行全面研究,通过改进现阶段的组合导航系统,以适应高动态应用需求。在现阶段航空航天等应用背景下,要求 GNSS 接收机跟踪环路具有较高的动态性能,而提高动态性能通常采用的方式是增加环路的跟踪带宽,但增加环路带宽的同时会导致跟踪噪声增大,进而造成较大的跟踪误差,从而无法在信噪比较低的情况下保持精确跟踪。考虑到 GNSS 与 INS 具备互补的性能,因此两者间的组合一直是研究热点。通过惯性信息的辅助作用,可在不影响环路跟踪精度的前提下,提高环路的动态性能。

(2) 对惯性辅助的 GNSS 基带跟踪环路性能进行分析,更好地实现组合导航系统的工程化。惯性辅助 GNSS 基带跟踪环路若实现工程化,需要最大限度