

SINS/GPS 组合导航技术

SINS/GPS ZUHE DAOHANG JISHU

王新龙 李亚峰 纪新春 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

SINS/GPS 组合导航技术

王新龙 李亚峰 纪新春 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

SINS/GPS 组合导航系统被认为是目前导航领域最为理想的组合方式,具有巨大的发展潜力和应用前景,特别是在航空、航天飞行器导航和制导等方面,具有非常重要的作用。

本书主要根据作者与课题组成员多年来的研究成果和国内外 SINS/GPS 组合导航技术的最新进展撰写而成。全书内容共分 12 章,重点围绕当前 SINS/GPS 的松组合、紧组合、超紧组合和深组合四种组合模式,从理论与实际应用的角度,全面、系统地阐述了 SINS/GPS 组合系统的原理、设计理论与方法及其发展趋势。为便于读者理解、掌握概念内涵,书中列举了大量详细的仿真实例。

本书可作为自动控制、导航、制导及测绘等领域研究者和工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

SINS/GPS 组合导航技术 / 王新龙, 李亚峰, 纪新春
著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5124-1635-2

I. ①S… II. ①王… ②李… ③纪… III. ①组合导航—研究 IV. ①TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 265537 号

版权所有,侵权必究。

SINS/GPS 组合导航技术

王新龙 李亚峰 纪新春 著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:19.75 字数:506 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1635-2 定价:45.00 元

前 言

以 GPS 为代表的全球卫星导航定位系统,具有全球性、全天候、高精度、实时定位等优点,但其存在着易受干扰、动态环境中可靠性差以及数据输出频率较低等不足之处;SINS 是一种自主性强、隐蔽性好、抗干扰能力强、短时精度高的导航系统,能够独立提供载体所需的全部导航参数,但其最大的缺陷是导航误差随时间积累。可见,SINS 与 GPS 各有所长,在性能上具有很强的互补性。SINS/GPS 组合在众多组合导航系统中堪称“黄金组合”,而且随着组合程度的加深,SINS/GPS 组合系统的总体性能要远优于各独立系统,被认为是目前导航领域最为理想的组合方式。根据组合结构、信息交换及组合程度的不同,SINS 和 GPS 的组合可分为松组合、紧组合、超紧组合和深组合。虽然目前松组合、紧组合这两种组合模式应用较为广泛,但随着运载体机动性能的不断提高以及作战环境的复杂化,为满足高动态用户(飞机、导弹、航天器等)及强噪声干扰环境下的应用需求,进一步提高组合导航系统的精度和可靠性,近年来,以紧组合为基础发展起来的新一代组合概念——超紧组合和深组合,已成为 SINS/GPS 组合导航技术发展的重要方向,具有巨大的发展潜力和应用前景,特别是在航空、航天飞行器导航和制导等方面,具有非常重要的作用。本书正是为适应这些技术领域的需要而撰写的。

此前,国内外出版了一些有关 SINS/GPS 组合导航技术的著作与教材,绝大多数只用有限篇幅讲述了 SINS/GPS 组合导航的基本原理与个别组合方法,对 SINS/GPS 组合导航的基本理论、组合模式与方法的讲述不够系统、全面。多年来,在国家自然科学基金(61074157、61111130198、61233005)、航空科学基金(20090151004、20130151004)、卫星应用研究院创新基金(2014_CXJJ-DH_01)等项目的资助下,作者会同课题组成员对 SINS/GPS 组合导航技术进行了系统而深入的研究,本书是对这些研究成果的系统汇总;同时,也吸取了一些国际最新研究成果,围绕 SINS/GPS 组合导航技术的有关概念、原理与方法进行了系统阐述,注重从读者易于理解及工程应用的角度出发,反映当前 SINS/GPS 组合导航技术的新成就及今后的发展趋向。

本书共分 12 章。第 1 章简述了 SINS/GPS 不同组合模式的基本原理、特点及其发展趋势;第 2 章讲述了 GPS 基本原理与信号源模拟器的设计方法;第 3 章讲述了 GPS 软件接收机的设计理论与方法;第 4 章讲述了 GPS 接收机跟踪环路设计方法;第 5 章讲述了捷联惯导系统的基本原理及仿真器设计方法;第 6 章讲述了 SINS/GPS 松、紧组合系统设计理论与方法;第 7 章讲述了 SINS 辅助 GPS 捕获技术;第 8 章讲述了 SINS 辅助 GPS 信号跟踪技术;第 9 章讲述了 SINS 辅助

GPS 抗干扰技术;第 10 章讲述了基于低等级 IMU 的 SINS/GPS 超紧组合系统方案设计;第 11 章讲述了 SINS/GPS 超紧组合系统完好性监测算法;第 12 章讲述了基于矢量跟踪的 SINS/GPS 深组合一体化系统技术。

本书是作者及课题组多年研究成果的结晶。书中部分内容采用了北京航空航天大学李亚峰、纪新春、于洁、宋帅、谢佳硕士学位论文以及孙兆妍毕业设计论文的研究成果。此外,本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,作者对他们为本书作出的贡献表示诚挚的谢意!

尽管作者力求使本书能更好地满足读者的要求,但因内容涉及面广,限于水平,书中不足之处在所难免,诚望读者批评指正。

作 者

2014 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 SINS/GPS 组合的优越性	2
1.3 SINS/GPS 不同组合模式的基本原理与特点	4
1.3.1 SINS/GPS 松组合模式	4
1.3.2 SINS/GPS 紧组合模式	4
1.3.3 SINS/GPS 超紧组合模式	5
1.3.4 SINS/GPS 深组合模式	6
1.3.5 SINS/GPS 不同组合模式的特性	6
1.4 组合导航系统中卡尔曼滤波器的总体结构	8
1.5 SINS/GPS 组合技术的应用前景和发展方向	8
第2章 GPS 基本原理与信号源模拟器设计方法	10
2.1 全球定位系统的组成	10
2.2 GPS 信号的结构	12
2.2.1 GPS 信号的构成	12
2.2.2 本地 C/A 码生成	13
2.2.3 GPS C/A 码信号的特性	14
2.2.4 GPS 导航电文	15
2.3 GPS 信号功率	16
2.4 GPS 定位基本原理	17
2.4.1 GPS 绝对定位原理	17
2.4.2 差分 GPS 定位原理	20
2.5 GPS 卫星瞬时位置和速度计算	23
2.5.1 坐标系的定义	24
2.5.2 卫星位置的计算	24
2.5.3 卫星速度的计算	26
2.6 GPS 定位系统误差	28
2.7 GPS 接收机射频前端	34
2.8 GPS 信号源模拟器	36
2.8.1 主要功能	36
2.8.2 GPS 信号源模拟器的结构	36
2.8.3 GPS 中频信号的数学模型	39

2.8.4	GPS 中频信号模拟方案	41
2.8.5	GPS 中频信号模拟参数计算	42
2.8.6	导航星模拟器	43
2.8.7	前端滤波器模拟与信号仿真实现	46
第 3 章	GPS 软件接收机设计理论与方法	50
3.1	GPS 软件接收机的特点与结构	50
3.1.1	软件接收机的特点	50
3.1.2	软件接收机的结构	51
3.1.3	GPS 软件接收机关键组成环节的功能	52
3.2	GPS 信号捕获	53
3.2.1	循环相关粗捕获方法	53
3.2.2	基于相位估计的精细捕获方法	54
3.2.3	SINS 辅助 GPS 捕获方法	55
3.3	GPS 信号跟踪	55
3.3.1	C/A 码跟踪环路	55
3.3.2	载波跟踪环路	57
3.3.3	载波辅助码跟踪环	57
3.4	载噪比估计和锁定检测器	58
3.5	信号解码及观测信息提取	59
3.6	导航定位解算	60
3.6.1	基于多普勒频移观测值的伪距平滑	60
3.6.2	最小二乘 PVT 解算	60
3.7	GPS 软件接收机工作流程与性能测试	61
3.7.1	工作流程	61
3.7.2	性能测试	62
第 4 章	GPS 接收机跟踪环路设计方法	67
4.1	GPS 接收机跟踪环路	67
4.1.1	锁相环	67
4.1.2	锁频环	71
4.2	跟踪环路性能门限	72
4.2.1	锁相环跟踪门限	72
4.2.2	码跟踪环跟踪门限	73
4.2.3	锁频环跟踪门限	73
4.3	干扰环境下 GPS 信号等效载噪比	74
4.4	跟踪环路优化方案	75
4.4.1	热噪声颤动	75
4.4.2	动态应力误差	76

4.4.3 最优跟踪环路方案	79
4.4.4 性能验证	81
4.5 自适应载波跟踪环路设计	85
4.5.1 高动态 GPS 载波信号跟踪	86
4.5.2 基于 UKF 的载波跟踪环路	88
4.5.3 自适应 UKF 载波跟踪方案	89
4.5.4 性能验证	93
第 5 章 捷联惯导系统基本原理及仿真器设计方法	99
5.1 SINS 基本工作原理	99
5.2 惯性器件误差补偿原理	100
5.3 捷联惯导系统的力学编排	101
5.3.1 姿态方程	101
5.3.2 导航位置方程	107
5.3.3 捷联惯导系统力学编排方框图	110
5.4 SINS 仿真器设计	110
5.4.1 轨迹发生器	110
5.4.2 惯性器件仿真器	115
5.4.3 导航解算	117
5.4.4 误差处理器	121
第 6 章 SINS/GPS 松、紧组合系统设计理论与方法	122
6.1 SINS/GPS 松、紧组合原理	122
6.1.1 松组合	122
6.1.2 紧组合	123
6.2 卡尔曼滤波原理	124
6.3 SINS/GPS 松、紧组合滤波器的设计	126
6.3.1 状态方程	126
6.3.2 量测方程	130
6.3.3 方程离散化	133
6.3.4 卡尔曼滤波流程	134
6.4 性能仿真验证	134
6.4.1 仿真条件	134
6.4.2 验证结果	135
第 7 章 SINS 辅助 GPS 捕获技术	139
7.1 GPS 接收信号模型	139
7.2 GPS 信号捕获原理	140
7.3 GPS 信号捕获性能指标	141

7.3.1 检测概率和虚警概率	141
7.3.2 捕获灵敏度及捕获时间	141
7.4 GPS 信号捕获算法性能分析	142
7.4.1 相干捕获	142
7.4.2 非相干捕获	151
7.4.3 差分相干捕获	153
7.5 SINS 辅助 GPS 信号捕获方法	155
7.5.1 SINS 辅助 GPS 捕获方案	155
7.5.2 SINS 辅助 GPS 信号粗捕获	156
7.5.3 SINS 辅助 GPS 信号精捕获	158
7.6 SINS 辅助 GPS 信号捕获性能分析	161
7.6.1 计算量	161
7.6.2 捕获时间	162
7.6.3 辅助信息不确定度	163
7.7 性能仿真验证	165
7.7.1 仿真条件	165
7.7.2 验证结果	165
第 8 章 SINS 辅助 GPS 信号跟踪技术	169
8.1 SINS/GPS 超紧组合导航系统的结构	169
8.2 SINS/GPS 超紧组合导航系统的实现方案	170
8.3 SINS/GPS 超紧组合导航系统信号跟踪方法	172
8.3.1 SINS 辅助载波环跟踪方法	172
8.3.2 SINS 辅助码环的实现方法	175
8.4 SINS 辅助 GPS 接收机跟踪性能分析	177
8.4.1 跟踪环路的结构	177
8.4.2 SINS 辅助跟踪环路的等效带宽	178
8.4.3 SINS 辅助环路的跟踪性能	180
8.4.4 SINS 辅助环路的抗干扰能力	181
8.5 SINS/GPS 超紧组合导航系统数学模型的建立	186
8.5.1 超紧组合系统状态方程	186
8.5.2 超紧组合系统量测方程	189
8.5.3 性能仿真验证	189
8.6 SINS 辅助 GPS 高灵敏度频域跟踪方法	196
8.6.1 基于 FFT 的频域载波跟踪	196
8.6.2 SINS 辅助 GPS 高灵敏度频域载波跟踪方法	197
8.6.3 仿真测试及性能验证	203

第 9 章 SINS 辅助 GPS 抗干扰技术	207
9.1 GPS 干扰信号及抗干扰技术	207
9.1.1 典型 GPS 干扰信号	207
9.1.2 GPS 干扰抑制技术	208
9.2 基于自适应调零天线的干扰抑制技术	210
9.2.1 自适应天线阵的基本结构	210
9.2.2 接收信号模型	210
9.2.3 天线阵列方向图	211
9.2.4 功率倒置算法	213
9.2.5 仿真结果分析	214
9.3 基于子空间投影的空时二维滤波	216
9.3.1 空时联合处理技术原理	216
9.3.2 子空间投影滤波	218
9.3.3 仿真结果分析	218
9.4 基于时频分析的干扰抑制算法	221
9.4.1 LFM 干扰信号模型	222
9.4.2 基于时频分析的参数估计	223
9.4.3 仿真结果分析	223
9.5 SINS/GPS 超紧组合系统误差建模与环路带宽优化设计	227
9.5.1 SINS 辅助跟踪环路误差建模	227
9.5.2 SINS 辅助跟踪环路带宽优化设计	233
9.6 基于阵列天线的抗干扰 SINS/GPS 超紧组合方案	236
9.6.1 干扰检测	236
9.6.2 基于特征分析的功率倒置算法	237
9.6.3 GPS 信号导向矢量估计	239
9.6.4 系统抗干扰性能测试	239
第 10 章 基于低等级 IMU 的 SINS/GPS 超紧组合系统方案设计	241
10.1 误差相关性分析	241
10.2 基于误差解相关方法的 SINS/GPS 超紧组合系统设计	242
10.2.1 伪距率误差解相关方法	243
10.2.2 伪距误差解相关方法	245
10.2.3 组合滤波器模型	245
10.3 基于低等级 IMU 的 SINS/GPS 超紧组合系统方案	247
10.4 系统性能验证	248
10.4.1 仿真环境和参数设置	248
10.4.2 高动态环境	249
10.4.3 强干扰环境	251

第 11 章 SINS/GPS 超紧组合系统完好性监测算法	254
11.1 基于最小二乘残差的 RAIM 算法	254
11.1.1 最小二乘残差检测原理	254
11.1.2 故障检测可用性分析	256
11.1.3 单星故障隔离	257
11.2 SINS/GPS 超紧组合系统的 RAIM 算法	259
11.2.1 层次滤波器结构	259
11.2.2 故障检测与隔离算法	261
11.2.3 可用性分析	262
11.3 算法验证	262
第 12 章 基于矢量跟踪的 SINS/GPS 深组合系统技术	267
12.1 卫星信号的标量跟踪与矢量跟踪	267
12.1.1 标量跟踪结构	267
12.1.2 矢量跟踪结构	267
12.1.3 矢量跟踪算法	269
12.2 深组合数据处理方法	270
12.3 SINS/GPS 相干深组合模型与结构	273
12.3.1 SINS 和 GPS 伪距/伪距率的关系	273
12.3.2 相关输出与位置/速度的关系	275
12.3.3 SINS/GPS 集中式相干深组合	277
12.3.4 SINS/GPS 分布式相干深组合	278
12.4 SINS/GPS 非相干深组合建模与设计	279
12.4.1 信号矢量跟踪环节	280
12.4.2 组合导航处理器	283
12.5 深组合系统性能验证	286
12.5.1 仿真条件	286
12.5.2 验证结果	286
12.6 SINS/GPS 深组合低载噪比自适应矢量跟踪算法设计	290
12.6.1 自适应矢量跟踪结构设计	290
12.6.2 自适应矢量跟踪算法	291
12.6.3 性能仿真验证	293
参考文献	298

第1章 绪论

1.1 概述

导航制导与控制系统是飞行器的关键系统之一,而制导与控制进行的前提又是导航参数的获取,所以导航系统的优劣直接关系到飞行器的性能。所谓导航就是获取载体运动参数(载体的即时姿态、速度和位置)的技术或方法。目前,常用的导航设备、技术、方法很多,如:惯性导航、卫星导航、天文导航及地形辅助导航等。这些导航系统都有其各自的优点和特色,但也存在固有的缺陷和不足。为了克服其缺点,通常以惯性导航系统为主,将其他导航系统与惯性导航系统组合在一起,组成组合导航系统,则能够达到取长补短、综合发挥各种导航系统特点的目的,并能提高导航信息精度,更好地满足载体对导航系统的要求。组合后的系统具有冗余功能,提高了导航系统的可靠性。另外,计算机技术的迅速发展,也为组合系统的发展创造了一个成熟的技术条件。而现代控制理论的成就,特别是最优估计理论的数据处理方法,又为组合系统提供了理论基础。

惯性导航系统(Inertial Navigation System)是利用惯性敏感器(陀螺仪和加速度计)、基准方位以及初始位置信息来确定载体的方位、位置和速度的自主式航位推算导航系统,通常简称为惯导系统。它主要由惯性测量装置、专用计算机和控制显示器三部分组成。惯性测量装置又由陀螺仪、加速度计、导航平台以及电子线路组成。惯性导航系统可以分为平台式惯性导航系统(Platform Inertial Navigation System, PINS)和捷联式惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)两大类。前者是将陀螺仪和加速度计安装在一个实体的稳定平台上,以平台坐标系为基准测量载体运动参数的惯导系统;后者是将陀螺仪和加速度计直接安装在载体上,不需要实体平台,其“平台基准”的寻找和跟踪保持由计算机来完成。随着陀螺仪和计算机性能的不断提高,捷联式惯导系统已成为惯导系统发展的主流。平台式惯导系统体积大、质量重,机械结构复杂,可靠性和维护性较差,系统性能受极限精度制约,系统成本十分昂贵;捷联式惯导系统反应时间短,可靠性高,体积小,质量轻,结构简单,通过适当的冗余度配置,可以提高系统的精度和可靠性。据有关资料报道,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90%。目前,捷联式惯导系统已广泛应用于各种需要导航定位的工程领域。

惯导系统是一种不依赖于任何外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统,这就决定了惯导系统具有其他导航系统无法比拟的优异特性。首先,它的工作不受外界电磁干扰的影响,也不受电波传播条件所带来的工作环境限制(可全球工作运行)。这就使它不但具有很好的隐蔽性,而且其工作环境不仅包括太空、空中、地面,还包括水面、水下,这对军事应用来说具有非常重要的意义。其次,它除了能够提供载体的位置和速度数据外,还能给出载体的姿态信息,因此它所提供的导航和制导数据十分完全。再次,惯导系统还具有数据更新率高、短期精度和稳定性好的优点。所有这些,使得惯导系统在军事以及民用领域中发挥着越来越大的

作用。与其他导航技术相比,惯性导航系统的特点主要体现在以下几个方面。

- 自主性:无需任何导航台站,导航功能完全可由惯性导航系统自身来完成;
- 隐蔽性:不向载体以外发出任何信号,敌方无法搜索或发现它的工作信息;
- 抗干扰:不受外部电磁环境影响,敌方也无法实施电磁干扰和控制;
- 全球性:不受地域限制,具有全球导航能力;
- 连续性:能够提供连续、实时的导航信息;
- 完备性:既能提供载体的位置信息,又能提供载体的姿态、速度和时间信息。

全球定位系统是由美国国防部组织海陆空三军,共同研究建立的新一代卫星导航系统,英文全称“Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System”,通常简称为“GPS”。它由空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分组成。其中空间星座部分由 24 颗工作卫星构成,它们部署在 6 个轨道平面中,每个轨道平面升交点的赤经相隔 60° ,轨道平面相对地球赤道面的倾角为 55° ,每根轨道上均匀分布 4 颗卫星,相邻轨道之间的卫星相互间隔 30° 。

GPS 的建成并投入使用,极大地促进了导航控制技术领域和大地测量应用领域的发展,目前已遍及各行各业,并开始逐步深入人们的日常生活。GPS 具有全球性、全天候的特点,因而具有在全球范围内简便的三维精确定位、测时、测速以及测定姿态的能力。高精度和低成本是 GPS 的显著优点,但是它也存在着一些不足之处,主要是 GPS 接收机的工作受载体机动的影响较大;GPS 接收机数据更新频率低(一般每秒一次),因而难以满足实时控制的要求;GPS 主要用于定位,不能输出载体的角自由度的信息;另外还容易受到干扰和人为控制,在遮挡的情况下(如室内、水下、地下、两边为高楼的狭窄街道)不能使用等。

由此可见,GPS 和 SINS 具有优势互补的特点。以适当的方法将两者组合可以克服各自的缺点,达到取长补短的目的。SINS/GPS 组合导航系统的优点还表现为,对于 SINS 来说,可以实现惯性传感器的校准、SINS 的空中对准、SINS 高度通道的稳定等,从而可以有效地提高 SINS 的性能和精度。而对于 GPS 系统,SINS 的辅助可以提高其跟踪卫星的能力,提高接收机的动态特性和抗干扰性。另外,GPS 与 SINS 组合还可以实现 GPS 完好性的检测,从而提高可靠性,便于实现 SINS 和 GPS 的同步,减小非同步误差。

总之,SINS 与 GPS 组合可以构成一种比较理想的导航系统,是目前组合导航技术的主要形式之一。因此,SINS/GPS 组合导航定位系统具有广泛的应用前景,特别是在航空、航天导航和武器制导等方面,具有非常重要的作用。

1.2 SINS/GPS 组合的优越性

SINS/GPS 组合系统的优点主要表现为:高精度 GPS 作为外部量测值输入,在运动中不断修正 SINS,以控制其误差随时间的积累;而短时间内高精度的 SINS 定位结果,可以很好地解决 GPS 动态环境中的信号失锁和周跳问题。不仅如此,SINS 还可以辅助 GPS 接收机增强其抗干扰能力,提高捕获和跟踪卫星信号的能力。简而言之,在精度、性能、可靠性和抗干扰等各个方面,SINS/GPS 组合系统都优于单独的子系统。SINS/GPS 组合导航系统的优越性主要体现在以下几个方面。

(1) SINS/GPS 组合对改善系统精度有利

高精度 GPS 信息可用来修正 SINS, 控制其误差随时间的积累。利用 GPS 信息可以估计出 SINS 的误差参数以及 GPS 接收机钟差等; 另一方面, 利用 SINS 短时间内定位精度较高和数据采样率高的特点, 可以为 GPS 提供辅助信息。利用这些辅助信息, GPS 接收机可保持较低的跟踪带宽, 也就是说, 跟踪回路可更好地抑制噪声的影响, 从而获得更精确的 GPS 位置和速度信息, 并通过与 SINS 的组合来提高后者的精度。反过来, 在卫星覆盖不好的时段内, SINS 可帮助 GPS 提高精度。SINS/GPS 导航误差实际上要比单独的 GPS 接收机或者单独的 SINS 可能达到的误差都小。

(2) SINS/GPS 组合能够增强系统的抗干扰能力

当信噪比低于 GPS 接收机的跟踪门限, 或当接收机出现故障时, SINS 可以独立进行导航定位。当 GPS 信号条件显著改善到允许跟踪时, SINS 向 GPS 接收机提供有关的初始位置、速度等信息, 以供在迅速重新获取 GPS 码和载波时使用。SINS 的信息也可被用来辅助 GPS 接收机天线的方向瞄准 GPS 卫星, 从而减小干扰对 GPS 接收机工作的影响。例如 GPS 和 SINS 组合, 比一般 P 码接收机 40~50 dB 的抗干扰性能可提高 4~10 dB。

(3) SINS 辅助 GPS 对信号的捕获有利

当 GPS 接收机失去信号后, 或它不工作时, 导航可以在 SINS 的基础上继续独立进行。当 GPS 信号再次出现时, SINS 的导航解可作为辅助信息, 对 GPS 码和载波的直接再捕获起辅助作用。用这种方法, 在 GPS 停机时, SINS 不仅提供了导航功能, 而且也使得在 GPS 再次可使用之后, 重新获取 GPS 信号所要求的时间大大缩短。同时, 由 SINS 辅助 GPS 所带来的 GPS 时钟精度的提高, 也保证了这种重新捕获过程的进行。

(4) SINS 提高了 GPS 接收机的跟踪能力

只有当载波或码跟踪回路锁定并跟踪卫星信号时, 才能得到所需要的 GPS 数据。当跟踪误差太大时, 相关检波器会呈现非线性, 增益降低, 可能导致信号失锁。降低回路带宽虽然可以减小噪声引起的跟踪误差, 但同时也降低了系统对载体动态行为的响应能力, 即降低了跟踪能力。SINS 高频输出的导航信息可以很好地反映载体的动态行为, 利用此信息辅助 GPS 跟踪回路, 可以使由载体动态行为所引起的跟踪误差显著减小。这样就可以减小回路带宽, 进一步减小噪声引起的跟踪误差, 提高观测精度。

(5) 解决了周跳问题

对于 GPS 载波相位测量, SINS 可以很好地解决 GPS 周跳和信号失锁后整周模糊度参数的重新解算, 也降低了对至少 4 颗可见卫星的要求。

(6) 解决了 GPS 动态应用采样频率低的问题

某些动态应用领域中, 高频 SINS 数据可以在 GPS 定位结果之间进行高精度内插, 求取事件发生的具体位置。

(7) SINS/GPS 组合系统降低了对 SINS 的要求

在组合系统中, 可以采用低性能的 SINS。这里主要利用 SINS 的速度信号解决 GPS 的动态跟踪问题, 而高精度定位则由 GPS 来实现。同时, 高精度 GPS 信号可以显著提高组合系统的性能。

(8) SINS/GPS 组合系统的用途更广

SINS/GPS 组合系统是 SINS 与 GPS 互补、互相提高的集成, 而不是二者的简单结合。SINS/GPS 组合在众多组合系统中堪称“黄金组合”, 具有巨大的发展潜力, 一直是组合导航技

术研究领域中的重点和热点;而且随着组合程度的加深,SINS/GPS 组合系统的总体性能要远优于各独立系统,被认为是目前导航领域最为理想的组合方式之一。

1.3 SINS/GPS 不同组合模式的基本原理与特点

根据组合结构、信息交换及组合程度的不同,SINS 和 GPS 的组合可分为松组合、紧组合、超紧组合和深组合四种组合模式。

1.3.1 SINS/GPS 松组合模式

松组合(loosely coupled)是一种低水平的 SINS/GPS 组合模式,其原理如图 1.1 所示。该组合系统中,GPS 和 SINS 独立工作,在 GPS 正常工作时,通过专用接口将两者的量测数据输入组合滤波器,其组合的作用表现在利用 GPS 信息通过卡尔曼滤波器估计并校正 SINS 误差,使 SINS 能够保持较高的导航精度;当 GPS 不可用时,SINS 单独工作。这种组合模式因具有简单、便于工程实现且有一定的余度等优点而得到了广泛应用。

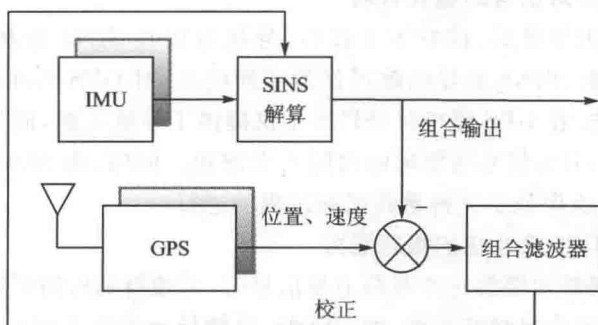


图 1.1 SINS/GPS 松组合模式原理图

但是,在松组合系统中,由于 GPS 仍作为一个单独的系统使用,当载体进行高动态机动或 GPS 信号受到干扰的影响而长时间无法工作时,该组合模式的精度将随着时间的增加而急剧下降,因而其可靠性和抗干扰能力较差。

1.3.2 SINS/GPS 紧组合模式

紧组合(tightly coupled)模式就是通常所说的伪距、伪距率组合模式,其原理如图 1.2 所示。根据 SINS 信息和卫星星历计算接收机相对于卫星视线方向(LOS)的距离、距离率,并与 GPS 码环和载波环得到的伪距和伪距率相减,作为卡尔曼滤波器的量测信息;然后利用卡尔曼滤波器估计 SINS 的误差量以及接收机钟差等;最后对 SINS 进行输出校正或反馈校正。

紧组合模式中,GPS 接收机仍然独立于 SINS,结构简单,可使用估值信息来重置 SINS 的参数。相对于松组合模式,该模式将原始的伪距和伪距率测量值直接送入组合滤波器,使系统的可观测性大大增强,理论和工程应用都表明其组合效果比采用位置、速度组合的松组合好。但由于它不能直接利用 SINS 辅助,因此在高动态或 GPS 信号受到干扰的情况下,存在与松组合模式同样的问题。

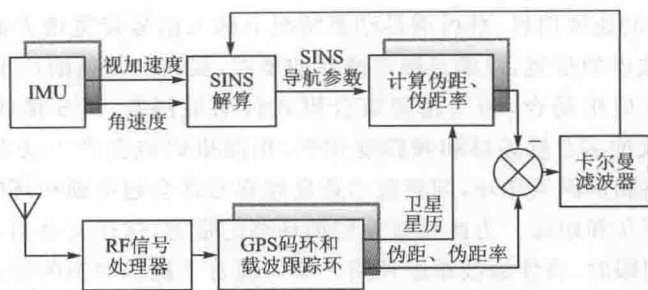


图 1.2 SINS/GPS 紧组合模式原理图

1.3.3 SINS/GPS 超紧组合模式

超紧组合(ultra-tightly coupled)与紧组合模式相比,除了采用伪距、伪距率组合外,还用 SINS 输出的速率信息来辅助 GPS 的跟踪环路,其工作原理如图 1.3 所示。

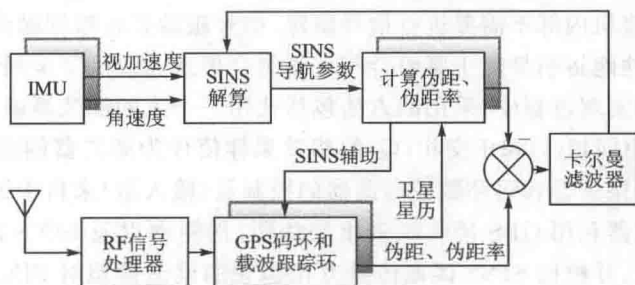


图 1.3 SINS/GPS 超紧组合模式原理图

利用 SINS 提供的速率信息辅助载波环和码环,可以增强对信号的动态跟踪性能与抗干扰能力,从而提高系统的精确性和可靠性。常用的惯导辅助方法是将 SINS 计算得到的伪距率与跟踪环的环路滤波器输出相加,送入载波 NCO(数控振荡器)或码 NCO。在有 SINS 速率辅助并假定接收机具有较高精度时钟信号的情况下,载波环带宽可降至 1~2 Hz,使抗干扰能力相对于无速率辅助情况提高约 15 dB 甚至更高。

在干扰很小的环境中,由于采用单纯的 GPS 接收机就可实现对所有可视卫星的载波跟踪,载波跟踪环还可为码环提供高质量的载波辅助,以保证码的正常跟踪,而且采用超紧组合模式还存在需要改变传统的 GPS 接收机的硬件的问题。因此,在这种情况下,该组合模式与紧组合模式相比并无大的优势。

在中等干扰的情况下,利用超紧组合模式能够明显提高载波相位测距接收机的性能;在较长时间干扰的情况下,也可明显提高伪码测距接收机的性能。这时,为了减小外界干扰噪声对系统性能的影响,要求跟踪环路中滤波器的低通滤波性能较好,即滤波器的噪声带宽越窄越好。但滤波器的带宽又直接影响整个跟踪回路的等效环路带宽,若滤波器的带宽很窄,则很可能使环路带宽小到无法满足载体动态性的要求,即不能实现对所有可视卫星的载波跟踪。在干扰时间较短的情况下,GPS 接收机的码跟踪环路不会出现失锁,利用伪码测距的 GPS 接收机仍能保持定位。但是在较长时间干扰的情况下,载波跟踪环路的失锁将导致码环失锁,这时无论采用载波相位测距还是伪码测距的接收机,其性能都会急剧恶化。而采用超紧组合模式

可以利用 SINS 辅助的速度信息,既可满足动态情况下输入信号带宽增大的要求,又可以减小 GPS 接收机环路滤波器的带宽,以满足噪声滤除的要求,提高接收机的抗干扰能力。

在高动态强干扰应用场合,利用超紧组合模式将明显提高 GPS 接收机的性能。这时, GPS 载波会产生较大的多普勒频移和频移变化率,伪随机码也会产生动态时延和频移,若使用传统的载波锁相环和伪码锁相环,则载波多普勒频移常常会超出锁相环的捕获带,因而不能保证对载波的可靠捕获和跟踪。为此就必须增加环路的带宽,这样又会引入宽带噪声,当噪声电平超过环路工作门限时,将使载波跟踪环路失锁。随着干扰或动态的增强,最终将引起码环的失锁,从而得不到伪距测量值,而且重新捕获时间加长,使得导航解发散。若采用超紧组合模式,利用 SINS 提供的速率信息辅助载波环和码环,则可以提高信号动态跟踪与抗干扰性能,从而提高组合导航系统的精度和可靠性。

1.3.4 SINS/GPS 深组合模式

深组合(deeply coupled)是以矢量跟踪为基础,采用 SINS 与 GPS 接收机信号相关器的输出进行数据融合,接收机内部不需要进行信号跟踪,信号跟踪是在数据融合时统一进行的。因此在理论上,深组合性能将明显优于紧组合与超紧组合模式,实现了“全局最优”。

在深组合模式的实现过程中,采用的方法包括使用一个大的滤波器或者成倍的小滤波器,用 GPS 接收机通道中同相(I)和正交相(Q)的相关采样值作为滤波器的观测量来更新滤波状态。本地载波的数控振荡器和码环数控振荡器的控制量(输入量)来自于组合导航滤波器的输出。而组合导航滤波器利用 GPS 接收机输出的伪距、伪距率以及 SINS 计算得到的伪距、伪距率差值作为观测量,并根据 SINS 误差传播方程建立的误差模型对 SINS 进行反馈校正,因而,可以获得更高的载波相位跟踪带宽和抗干扰能力。这种深组合模式原理如图 1.4 所示。

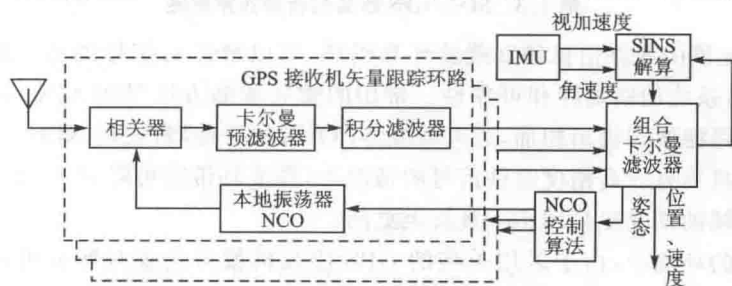


图 1.4 SINS/GPS 深组合模式原理图

通过对 GPS 接收信号进行相关处理后获得正交采样信号实际残差的测量值,即可得到卡尔曼预滤波器的精确量测量。在深组合模式的实现过程中,本地 NCO 的控制算法利用校正后的 SINS 导航数据、卫星位置、接收机钟差以及组合导航滤波器输出的 GPS 估计值综合计算控制指令,用于调节本地信号使其与接收的 GPS 信号相一致,因而,可以获得更高的载波与码跟踪带宽和抗干扰能力。但这种深组合工作模式,需要对现有的 SINS 系统和 GPS 接收机的硬件部分进行深层次改造以满足一体化要求,其工程实现比较复杂。

1.3.5 SINS/GPS 不同组合模式的特性

下面主要从抗干扰能力、动态性和精确性方面对 SINS/GPS 各组合模式的性能进行比较: