

浙江大学

硕士学位论文开题报告



论文题目 GNSS/MEMS-DR 超紧耦合组合导航算法研究

作者姓名 牟文杰

指导教师 宋开臣 教授

学科(专业) 电子信息技术与仪器

所在学系 信息学部

二零一三年 一 月

目录

第一章 课题背景及研究意义.....	3
1.1 课题背景与概述.....	3
1.1.1 INS/GNSS 组合导航.....	4
1.1.2 北斗卫星导航系统.....	5
1.1.3 INS/DVL 组合导航.....	6
1.2 研究意义.....	8
1.3 研究现状.....	8
1.3.1 INS/GPS 超紧耦合研究现状.....	8
1.3.2 INS/DVL 超紧耦合研究现状.....	9
1.3.3 组合导航系统信息融合方法研究概况.....	9
第二章 课题研究内容.....	12
2.1 研究内容.....	12
2.2 关键技术问题.....	12
第三章 总体设计方案.....	14
3.1 研究任务.....	14
3.2 总体设计.....	15
3.2.1 INS/BDS 超紧耦合方案.....	15
3.2.2 INS/DVL 超紧耦合方案.....	18
3.2.3 INS/BDS/DVL 超紧耦合方案.....	19
3.2.4 实验验证方案.....	20
第四章 研究进度安排.....	22
参考文献.....	23

第一章 课题背景及研究意义

1.1 课题背景与概述

将运载体从起点引导到目的地的技术或方法称为导航。导航系统测量并解算出运载体的瞬时运动状态和位置,提供给驾驶员或自动驾驶仪实现对运载体的正确操纵或控制^[1]。

随着科学技术的发展,可资利用的导航信息源越来越多,导航系统的种类也越来越多。以航海导航为例,目前可供装备的机载导航系统有惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)等,这些导航系统各有特色,优缺点共存。比如 INS 的优点是:不需要任何外来信息也不向外辐射任何信息,可在任何介质和任何环境下实现导航,且能输出飞机的位置、速度和姿态等多种导航参数,系统频带宽,能跟踪运载体的任何机动运动,导航输出数据平稳,短期稳定性好。但 INS 具有固有的缺点:导航精度随时间而发散,即长期稳定性差。GPS 精度高,且不随时间发散,这种高精度和长期稳定性是 INS 望尘莫及的。但 GPS 也有其致命弱点:频带窄,当运载体作高机动运动时,接收机码环和载波环极易失锁而丢失信号,从而完全丧失导航能力;完全依赖于 GPS 卫星发射的导航信息,受制于他人,且易受人为干扰和电子欺骗^[1]。DVL 的优点是:能进行完全自主的导航,不需要外部设备的支持;反应速度快,使用方便;由于发射波束很窄,且以很陡的角度发射到海底,所以隐蔽性和抗干扰性好;测得的平均速度精度很高。但是,多卜勒速度计程系统也存在着不足,它需要外部的航向和垂直基准信息,定位误差随时间积累^[2]。其余导航系统有各自的优缺点。

各种导航系统单独使用时很难满足实际导航要求,于是人们提出了组合导航的概念:即将多种不同的导航手段组合在一起,各种手段性能互补,取长补短,以获得比单独使用任一导航系统时更高的导航性能。

在海洋环境中,经典组合方式为 INS/GPS/DVL,在水面时采用 INS/GPS/DVL

组合，而水下时采用 INS/DVL 组合，这样的组合方式能同时满足水面和水下的导航。

1.1.1 INS/GNSS 组合导航

从结构上或信息交换及组合程度看，INS 与 GPS 的组合可分为：松耦合 (Loosely Coupled)、紧耦合 (Tightly Coupled) 和超紧耦合 (Ultra-tightly Coupled) 等三种耦合方式^[3]。

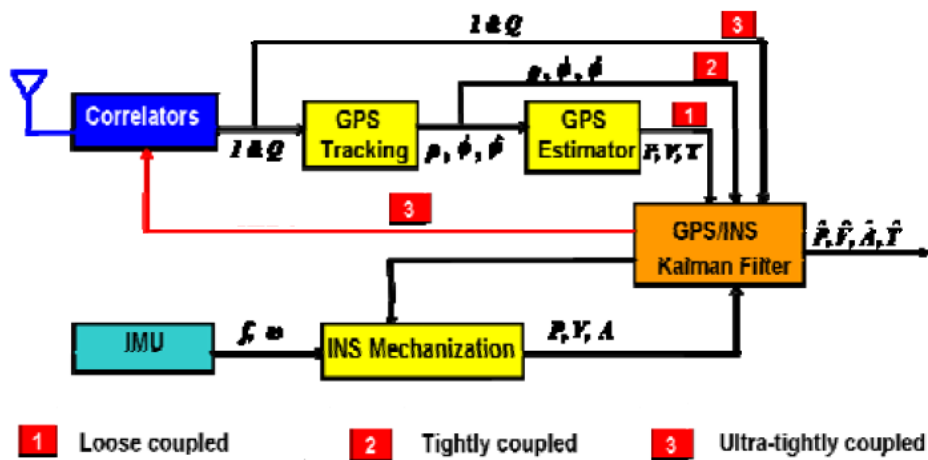


图 1 松耦合、紧耦合和超紧耦合结构示意图^[4]

松耦合是最简单的组合应用方式，在松耦合工作方式下，INS 和 GNSS 接收机各自独立工作，由融合算法综合两者数据给出最优的结果，并反馈给 INS 进行修正。在这种组合方式下，INS 和 GNSS 接收机单独工作，接收机至少有 4 颗卫星才能定位，抗干扰能力差；只有采用质量较高的惯性传感器（如导航级或战术级）才能发挥较佳的性能，若使用质量较低的惯性传感器（商业级），当卫星失锁不能定位时，系统的组合就被完全破坏，整体性能将会因系统无法对惯性传感器进行校正而迅速恶化。

紧耦合方式是一种相对复杂的组合方式，卫星接收机提供给融合算法的是伪距和伪距率等接收机用于定位解算的原始信息。由于紧耦合采用的伪距和多普勒信息等观测量与松耦合中采用的位置和速度等信息不相关，它可以获得更高的导航定位精度，更适用于姿态测量和载波相位定位。同时，紧耦合只需要 2 颗卫星就能参与组合，由此增强了抗干扰能力。但在机体高动态的情况下，接收机跟踪

环容易失锁，导致无法捕获卫星。

超紧耦合是更复杂的组合方式，超紧耦合除了需要完成紧耦合方式的处理工作以外，还将 INS 的量测信息反馈给接收机，辅助接收机对卫星的捕获和跟踪。超紧耦合除了具有紧耦合的优点外，由于有了 INS 提供的先验信息，可以防止在高动态情况下跟踪环失锁，进一步提高抗干扰能力；在丢失卫星的情况下，可以迅速地重新捕获到卫星。正是由于这些优点，超紧耦合使低成本的惯性器件（如 MEMS 惯性传感器）与 GNSS 的高性能组合导航成为可能。

以下是松耦合、紧耦合和超紧耦合的比较。

	松耦合	紧耦合	超紧耦合	说明
跟踪灵敏度	差	好	非常好	可提升20~30dB，一般室内卫星信号与室外相比衰减约20~30dB
捕获灵敏度	差	好	非常好	利用加速度信息，延长捕获积分时间，可提高捕获灵敏度
重新捕获能力	差	一般	非常好	利用多普勒频移，减少二维搜索的空间，从而减小捕获时间
数据更新率	低	低	高	捕获时间减少，从而可提高数据更新率，可高达100Hz
定位精度	低	一般	高	利用多普勒频移，可减小跟踪环路带宽，提高噪声抑制能力
动态响应	差	差	非常好	利用多普勒频移，可防止高动态情况下跟踪环路失锁
多径干扰抑制	差	一般	非常好	窄相关技术可消除多路径误差，从而获得更高精度的观测量
实现复杂度	低	中等	高	超紧耦合需要对接收机内部结构重新编排，融合算法也更加复杂

图 2 松耦合、紧耦合和超紧耦合的比较图^[4]

综上所述，超紧耦合提高了组合整体的鲁棒性、跟踪能力和导航精度，是今后组合导航领域发展的重要方向。

1.1.2 北斗卫星导航系统

全球卫星导航系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)是一种能够提供全球、全天候、全天时的高精度地理位置信息以及导航、授时信息的卫星系统。作为国家重要的信息基础和战略设施，GNSS 是国家综合国力的一个重要标志，是保障国家安全的重要基石，对于满足国民经济、国防建设的需要，具有重大的经济和社会意义。目前，正在规划建设或运营中的 GNSS 除美国的 GPS 外，

还有俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO，以及中国的 COMPASS “北斗二号” 全球卫星导航系统。^[5]

北斗卫星导航系统（简称北斗系统，英文缩写为 BDS）是中国正在实施的自主发展、独立运行的全球卫星导航系统。由空间段、地面段和用户段三部分组成，空间段由 5 颗地球静止轨道（GEO）卫星、27 颗中圆地球轨道（MEO）卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星组成^[6]，地面段包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站，用户段包括北斗用户终端以及与其他卫星导航系统兼容的终端^[7]。截止到 2012 年底，在轨工作卫星有 5 颗地球静止轨道（GEO）卫星、4 颗中圆地球轨道（MEO）卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星^[6]，建成覆盖亚太区域的“北斗”卫星导航定位系统（即“北斗二号”），具备导航、授时和短信通信服务能力，民用定位精度为 10 米。计划于 2020 年左右，建成覆盖全球的北斗卫星导航系统^[8]。

以 GPS 为代表的卫星导航应用产业已成为一个全球性的高新技术产业，成为继通信和互联网之后的第三个 IT 新增长点。然而，当前中国卫星导航应用产业绝大多数基于 GPS。发展拥有自主知识产权的安全可靠的“北斗二号”全球卫星导航定位系统，不仅是发展中国国民经济新增长点的有效手段，也是加强国家安全的必要措施。^[5]

到目前为止还没有 INS/BDS 超紧耦合的相关研究。

因此，研究 INS 与北斗的超紧耦合具有深远的意义。

1.1.3 INS/DVL 组合导航

声学多普勒计程仪是利用声学多普勒原理来测量海底相对于载体的速度和深度，其基本原理是利用水声换能器向海底发射特定频率的定向声脉冲信号（4 个不同方向），并接收从海底声波散射体上反射回波信号，通过分析 4 个波束回波信号的多普勒信息，从而得到海底相对运载器的速度和方向，以及运载器离海底的高度^[9]。如下图所示：

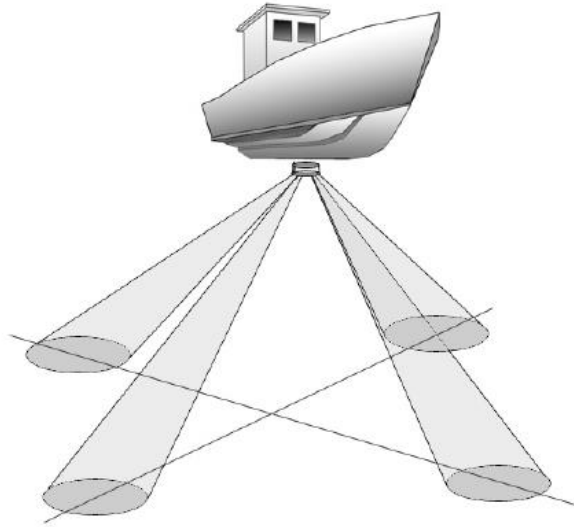


图 3 DVL 詹姆斯配置^[10]

目前 INS/DVL 组合方式都是 DVL 输出三维速度给 INS，参与组合导航。

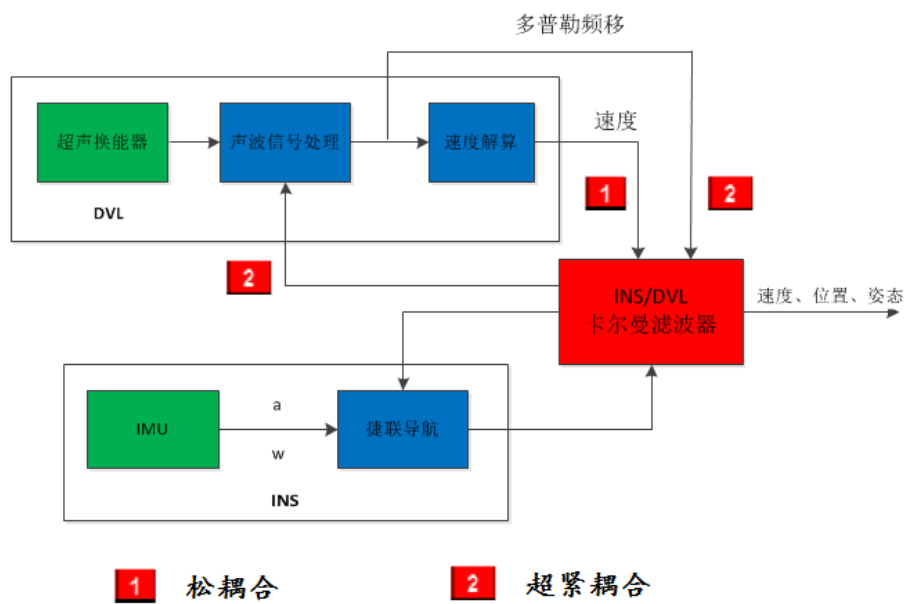


图 4 INS/DVL 松耦合和超紧耦合示意图

INS/DVL 传统组合方式存在以下问题：

1. 由于水底介质复杂，DVL 有可能无法正常接收到回波信号，如果四束波束中有一束回波信号失效，则无法输出最终的速度信息
2. DVL 由于缺少姿态角等信息，测得的速度会受到船体姿态角变化的影响，从而导致测速精度下降
3. 在运动速度快时，声波信号处理过程中可能会出现失锁现象，同样导致

无法提供速度信息

如果增加 INS 对 DVL 的速度和姿态辅助,并且 DVL 直接输出 4 束波束的多普勒频移信息参与耦合,就可以很好地解决以上问题。于是便提出了 INS/DVL 超紧耦合的概念。

目前还没有 INS/DVL 超紧耦合的相关报道,具有重要的研究价值。

1.2 研究意义

北斗卫星导航系统(BDS)是我国自主研发的全球卫星导航系统,用北斗代替 GPS 是加强国家安全的必要措施。目前还没有 INS/BDS 超紧耦合的相关研究,因此,研究 INS 与 BDS 的超紧耦合具有广泛的应用的前景和研究价值。

INS/DVL 的超紧耦合能有效地解决传统组合方式存在的问题,能有效提高导航精度和抗干扰能力。INS/DVL 的超紧耦合是一种新的组合方式,目前还没有相关报道。

INS/BDS/DVL 的超紧耦合能有效地提高组合导航系统在强干扰和高动态情况下的导航精度、提高整体的鲁棒性,从而实现在海洋中的长时间高精度导航。

超紧耦合的思想不仅仅局限于组合导航中,也可以应用于多传感器数据融合的场所(如无人驾驶汽车等),从而提高信息融合的效果以及鲁棒性。

因此研究 INS/BDS/DVL 的超紧耦合,具有深远的实用价值和理论研究意义。

1.3 研究现状

1.3.1 INS/GPS 超紧耦合研究现状

国外对于 GPS 和 INS 组合的研究起步较早,特别是作为 GPS 的拥有国的美国在对 GPS 和 INS 的组合导航研究方面一直处于世界前列,其它发达国家也都对组合导航系统进行了全面细致的研究。

自 20 世纪 80 年代起的过去二十多年中,INS 与 GPS 的耦合方式绝大多数是松耦合或紧耦合两种方式。

早在 1980 年 Copps EM 等学者的关于 GPS 信号最优化处理的文献中,就最先认识到 INS/GPS 超紧耦合结构的优势^[11]。直到 20 世纪末,超紧耦合的组合导航

方式才受到极大的关注，其中 Draper 实验室 Donald Gustafson 等人在 2000 年明确了超紧耦合方式^[12]，提出了扩展范围码跟踪环的 INS/GPS 超紧耦合方法，以提高接收机的抗干扰能力，并通过仿真验证了这一方法。2003 年，美国斯坦福大学的 Gautier J D 则进一步完善了这种概念^[13]，对 INS/GPS 的超紧方法进行了研究，并分析了超紧耦合下卡尔曼滤波器的基本结构及状态观测方程。加拿大的 Abbott 和 Lillo 则为 INS/GPS 的 FKF 联邦卡尔曼滤波器实现方法申请了专利^[14]，并受美国关键军事技术出口限制。2010 年，国立台湾海洋大学的 Dah-Jing 等人利用模糊自适应无味卡尔曼滤波器对超紧耦合进行分析，取得较好的滤波精度^[15]。

国内对超紧耦合的研究起步较晚，基本还处于仿真阶段。2009 年，哈尔滨工业大学的 Gannan, Yuan 等人提出用基于无味卡尔曼滤波器（UKF）的超紧耦合方案^[16]，仿真表明性能得到提升。2010 年，南京理工大学的胡锐自行设计了高精度的 GPS 接收机，增加了 INS 对 GPS 的辅助，实现了 INS/GPS 的超紧耦合^[17]，但实现过程是基于紧耦合卡尔曼滤波器的超紧耦合，并没有将卡尔曼滤波器引入到跟踪环路中。

超紧耦合涉及到 GPS 接收机内部的编排，甚至重新设计。要求对 GPS 接收原理和内部结构有较深入的掌握，并要求有可以进行内部编排的接收机，实施难度较大，这也是我国在相关领域只停留在原理仿真层面上的主要原因。不过，目前有关厂商已经提供了可以进行内部码环编排的接收机，所以这方面的障碍将会得到解决^[18]。

1.3.2 INS/DVL 超紧耦合研究现状

目前 INS/DVL 组合方式都是 DVL 输出三维速度给 INS，参与组合导航。INS/DVL 的超紧耦合是根据实验过程中发现传统耦合方式存在问题的情况下而提出的一种新的耦合方式。

目前没有查找到提及 INS/DVL 超紧耦合的文献。

1.3.3 组合导航系统信息融合方法研究概况

信息融合方法是组合导航系统的核心问题，直接影响了组合导航系统的性

能,对组合导航信息融合方法的研究已经成为一个重要的课题^[19]。

在现有的 INS/GPS 组合导航系统中主要应用卡尔曼滤波的方法进行多传感器的信息融合。卡尔曼滤波方法是一种线性最小方差估计方法,在时域中滤波,采用状态空间方法描述系统,算法采用递推形式,数据存储量小,不仅可以处理平稳随机过程,也可以处理多维和时变过程。正是由于卡尔曼滤波方法的以上优点,在多传感器信息融合中得到了广泛的应用。^[19]

导航系统一般为高维数、非线性系统,系统的动态模型复杂且因载体运动的变化具有不确定性,这种不确定性增加了导航的误差:应用卡尔曼滤波方法进行误差估计时通常将非线性系统近似为线性系统进行计算,近似计算将导致误差积累,降低了导航精度;噪声过程统计特性估计的不准确也影响了滤波的精度。目前对组合导航卡尔曼滤波问题的研究主要集中在如何解决这几个问题。^[19]

标准卡尔曼滤波方法仅能处理线性系统,扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)方法将其扩展应用于非线性系统,EKF 方法通过线性化将非线性系统转变为线性系统后进行卡尔曼滤波。其后,一些广义卡尔曼滤波方法被提出并应用于非线性系统,广义卡尔曼滤波方法通过增加非线性系统线性化后泰勒级数展开项的数量调节滤波精度,由于减小了线性化的误差,因此滤波精度得到提高,但因此增加了计算负担^[20]。

集中式卡尔曼滤波方法随着系统状态维数的增加计算量急剧增大,影响了系统对实时性的要求。其次,集中式卡尔曼滤波方法的可靠性较差,一个传感器的故障将导致整体导航性能的迅速下降。1978 年 Hassan 提出了一种分散卡尔曼滤波方法^[21],增强了滤波的可靠性,但当各传感器的状态噪声和初始条件相关联时,各分散滤波器无法独立的给出相应的滤波估计,同时各分散滤波器之间需要交换大量的信息,极大的增加了滤波计算量。近年来分散卡尔曼滤波方法得到了广泛的关注,提出了很多的改进方法,并被成功应用于组合导航系统^[22]。

1988 年 Carlson 提出了一种联邦卡尔曼滤波方法^[23],该方法将系统分解为多个子系统,各子系统分别由各自的滤波器进行滤波估计,各分滤波器的估计结果通过一个主滤波器进行信息的融合。滤波过程中的信息是经由主滤波器向各子滤波器分配的,因此增强了对信息的利用率,消除了各子状态间的相关性,使各子滤波器的估计为最优估计,设计灵活,容错性好,只需进行简单、有效的融合,

就能得到全局最优的估计，因此得到了广泛的关注和应用。

标准卡尔曼滤波方法要求我们知道系统状态和观测噪声的统计特性，统计特性的不准确或不可知，将导致滤波精度下降甚至是发散的^[24]。Sage 提出的自适应卡尔曼滤波^[25]算法很好地解决了这个问题，自适应滤波通过观测量估计修正预测值的同时对噪声特性和模型的不确定性进行估计并修正。现有的自适应滤波方法很多，包括渐消记忆卡尔曼滤波方法^[26]、新息自适应卡尔曼滤波方法^[27]、虚拟噪声补偿滤波方法^[28]、动态偏差去耦合估计方法^[29]等。

导航系统多为非线性系统，EKF 方法通过将系统误差函数线性化后再进行线性滤波，由于线性化误差大，影响了滤波的精度。非线性滤波方法通过对误差模型矢量的统计特性进行近似来达到将模型线性化的目的，无迹卡尔曼滤波 (Unscented Kalman Filter, UKF) 就是其中最具代表性的非线性卡尔曼滤波方法。UKF 方法通过设计少量的 sigma 点，经过 UT 变换和非线性函数的传播，估计得到状态矢量的统计特性，然后进行滤波计算^[30, 31]。UKF 方法假设系统噪声和观测噪声均为高斯白噪声，而这一条件有时不能满足，这也限制了该方法的应用^[32]。UKF 不需要系统进行线性化近似，不需要计算雅可比矩阵，减小了线性化所带来的误差。UKF 方法已经得到了广泛的应用^[33, 34]，Merwe^[33]将 UKF 方法应用于 INS/GPS 松散组合飞行器上，导航精度相对 EKF 方法提高了三分之一，Crassidis^[35]等对飞行器初始对准和姿态的 UKF 估计研究表明具有更大的容差性。

非线性滤波是以贝叶斯理论为基础的最优滤波过程。Ho 等^[36]对贝叶斯滤波问题进行了深入的研究，结论表明卡尔曼滤波为贝叶斯滤波的一个特例。基于同样的理论基础，粒子滤波也是解决非线性滤波的另一个有效方法，粒子滤波可以解决非高斯的非线性滤波问题，Carvalho^[37, 38]和 Babak^[39]对组合导航系统滤波方法的研究表明粒子滤波可以很好的解决非线性滤波问题，提高了导航的精度。粒子滤波已经成为近年来非线性滤波研究的一个重要方向，由于退化问题和计算复杂使得粒子滤波方法的实际应用还有很多问题需要解决。

第二章 课题研究内容

2.1 研究内容

本课题以海洋环境的导航为背景，研究 INS/BDS/DVL 超紧耦合算法，主要包括以下几个部分：

1. 研究 INS 辅助北斗接收机捕获和跟踪的方法
 - a) 研究基于卡尔曼滤波器的跟踪环路算法
 - b) 研究自适应卫星捕获算法，根据速度、位置和加速度等信息，自适应地调整二维搜索空间和搜索步长，同时实时预测可见卫星，减小捕获时间的同时，又提高捕获精度和灵敏度。
2. 研究 INS/BDS 超紧耦合组合滤波算法
 - a) 研究超紧耦合下卡尔曼滤波器的基本结构，利用载波环跟踪误差、伪距率量测误差与惯导误差之间的关系模型，建立卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程。
 - b) 研究各种卡尔曼滤波器的滤波性能，并对超紧耦合滤波算法进行仿真，寻找一种最佳滤波算法。
3. 研究 INS/DVL 超紧耦合组合滤波算法。
 - a) 建立 INS 误差与 DVL 多普勒频移误差的关系模型，对组合滤波算法进行仿真分析。
 - b) 设计微波多普勒雷达测速系统模拟 DVL，对 INS/DVL 超紧耦合进行原理性验证。
4. 研究 INS/BDS/DVL 超紧耦合数据融合算法
研究如何有效地利用三者的信息估计得到最佳导航信息，并且保证当 BDS 或者 DVL 失效时，也能可靠地工作。

2.2 关键技术问题

要实现 INS/BDS/DVL 的超紧耦合，关键是要解决以下几个问题：

1. 如何将组合滤波器引入跟踪环路，有效地实现对接收机的辅助；
2. 如何利用 I 和 Q 信息进行信息融合，建立卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程。
3. 如何利用 DVL 输出的多普勒频移信息，建立相应的状态方程和观测方程。
4. 如何有效地利用三者的信息估计得到最佳导航信息，并且保证当 BDS 或者 DVL 失效时，也能可靠地工作。

第三章 总体设计方案

3.1 研究任务

完成 INS/BDS/DVL 超紧耦合系统。具体研究目标是：

1) 完成文献检索与资料查询

查阅文献 100 篇，其中外文文献 40 篇以上。完整检索 INS/GPS 超紧耦合的国内外现状。

2) 实现 INS 辅助北斗接收机的捕获和跟踪

重新设计北斗接收机内部结构：

- a) 完成基于组合滤波器的跟踪环路设计，输出 I 和 Q 信号参与组合滤波，并利用组合滤波后的信息进行环路跟踪
- b) 利用 INS 的信息实现自适应卫星捕获算法，自适应地调整二维搜索空间和搜索步长，同时实时预测可见卫星，减小捕获时间的同时，又提高捕获精度和灵敏度。

3) 实现 INS/BDS 的超紧耦合，并通过路试验证

建立 INS/BDS 超紧耦合下的状态方程和观测方程，通过理论和仿真对各种滤波算法进行分析，综合考虑滤波精度、计算复杂度和鲁棒性等因素，选择一种综合效果最好的滤波器。

实现 INS/BDS 的超紧耦合，并通过路试验证。

4) 完成 INS/DVL 的超紧耦合，并用微波多普勒雷达测速系统进行原理性验证

利用 INS 和 DVL 的误差模型，建立 INS/DVL 超紧耦合下卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程，并对滤波算法进行仿真。

搭建四波束微波多普勒雷达测速系统来模拟 DVL，输出四束波束的多普勒频移，与 INS 参与组合，同时利用 INS 的信息辅助微波测速系统，对 INS/DVL 超紧耦合系统进行原理性验证。

5) 实现 INS/BDS/DVL 超紧耦合，并通过路试验证

用联邦滤波器实现 INS/BDS/DVL 超紧耦合下的数据融合，并通过路试来

验证 INS/BDS/DVL 超紧耦合的有效性及其优势。

6) 小论文和毕业论文的撰写

完成两篇小论文（一级）和毕业论文的撰写。

3.2 总体设计

3.2.1 INS/BDS 超紧耦合方案

INS/BDS 的超紧耦合原理类似于 INS/GPS 的超紧耦合，其实现方式可借鉴 INS/GPS 的超紧耦合。

北斗与 GPS 比较：

	BD	GPS	GALILEO	GLONASS
组网卫星数	5GEO+ (24-30) MEO	(24-30)MEO	30MEO	24MEO
卫星轨道高度 (km)	GEO MEO 21500	MEO 20230	MEO 23222	MEO 19100
轨道平面数	3	6(3)	3	3
轨道倾角	55°	55°	54°	64.8°
运行周期	12H55M	12H58M	13H	11H15M
星历数据 表达方式	卫星轨道的 开普勒根数	卫星轨道的 开普勒根数	卫星轨道的 开普勒根数	直角坐标系中 位置速度时间
测地坐标系	中国2000	WGS-84	WGS-84	PZ-90
时间系统	BDT	GPST	GPST	GLONASST
使用频率 (MHz)	B1: 1561.098 B2: 1207.140	L1: 1575.42 L2: 1227.6 L3: 1176.45	L1: 1575.42 E5b: 1207.14 E5a: 1176.45	L1: 1602.5625- 1615.5 L2: 1240-1260
卫星制式	CDMA	CDMA	CDMA	FDMA
码时钟频率 (Mbps)	2.046	1.023	1.023	0.0511
电波极化方式	右旋圆极化	右旋圆极化	右旋圆极化	右旋圆极化
调制方式	QPSK+BOC	BPSK	BPSK+BOC	BPSK
数据速率(bps)	50, 500	50	50, 1000	50

图 5 北斗与 GPS 等比较图^[40]

从上图可以看出，四个系统基本兼容，具有相同的相同的伪距定位原理和相同的定位算法。但北斗也有其特殊性：

1. 卫星信号调制方式不同，GPS 采用的是 BPSK 调制方式，北斗采用的是 QPSK+BOC，因此捕获和跟踪方式不同。

2. 测距码的长度和序列不同，GPS 的 I 和 Q 支路采用的测距码均为 1023 位

的 Gold 码；北斗的 I 支路为 255 位的 Kasami 码，而 Q 支路为 $2^{19}-1$ 位的 Gold 码。因此卫星信号的捕获和码环跟踪会不同^[41]。

3. 伪距误差修正方程不同，由此导致建立的卡尔曼滤波器误差方程不同。

4. 卫星星历不同，采用的坐标系和时间系统不同，因此预测可见卫星和估算多普勒频移不同。

因此需要深入研究北斗接收机的内部结构。

基于北斗接收机开发系统，重新设计原来的跟踪环路，将组合滤波器引入环路之中。具体过程如下图所示：

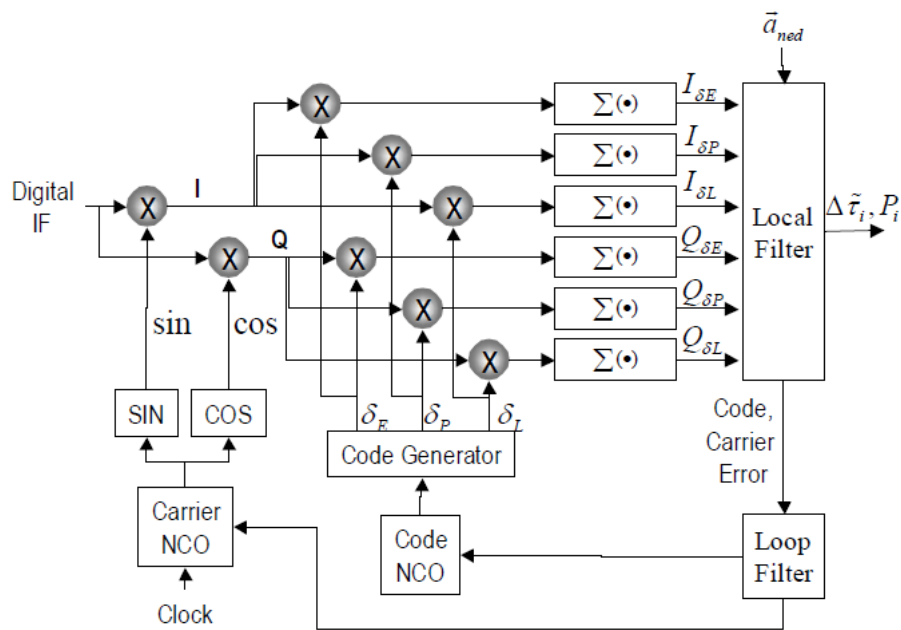


图 6 INS 辅助接收机捕获和跟踪^[42]

射频前端经过下变频和采样，输出中频信号，分别与同相和正交的载波相乘解调得 I 和 Q 信号，然后与本地生成的超前、同相和滞后的测距码相乘，再经过累积和清零等操作，输送给组合滤波器，作为滤波器的观测量；经滤波后得到导航信息，同时估算出载波和测距码的相位差，辅助调节载波和测距码的数控振荡器的频率，从而实现与实际信号同步。

超紧耦合的信息融合着重解决的是非线性滤波问题，滤波精度、实时性和鲁棒性等也是实际应用中要考虑的因素。前面讲到非线性滤波器主要有扩展卡尔曼滤波器（EKF）、无味卡尔曼滤波器（UKF）、粒子滤波器（PF）等。

目前最常用的是 EKF，但 EKF 线性化误差大，影响了滤波的精度。

UKF 不需要系统进行线性化近似，不需要计算雅可比矩阵，减小了线性化所

带来的误差,且计算复杂度接近于 EKF。不足之处就是 UKF 基于高斯噪声的假设。

粒子滤波可以解决非高斯的非线性滤波问题，但粒子滤波器计算复杂度高，难以满足实时性要求，并且存在粒子退化问题，因此粒子滤波方法的实际应用还有很多问题需要解决。

因此优先选择 UKF。

北斗目前有 14 颗卫星，最终有 35 颗，每一颗卫星都需要有一个跟踪回路，即一个通道。每个通道的滤波结果再通过一个总的卡尔曼滤波器，输出最终的导航信息（如下图所示）。

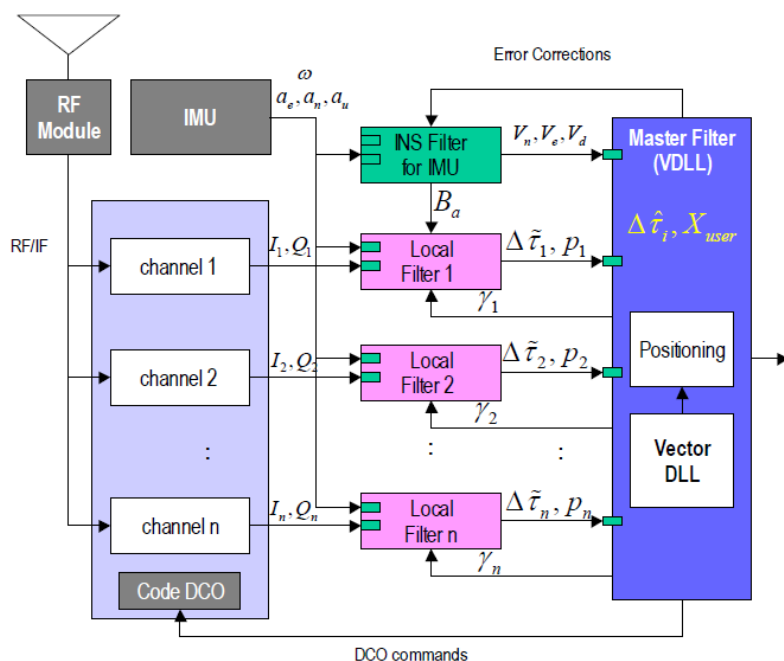


图 7 INS/GPS 超紧耦合总体框图^[42]

北斗接收机采用星源北斗公司的 HG-RE03-D 高级 GNSS 开发套件。开发套件由射频板、FPGA 板、处理器板组成(如图 8 所示),射频芯片采用 MAX2769ETI+,支持 GPS L1 和北斗 B1;FPGA 采用 EP3C55F484C8N,可实现 64 通道相关器;处理器采用 Cortex-M4F,带浮点运算单元,主频 168MHz,内存 192KB,足以支持 32 通道处理。开发套件提供北斗信号捕获、跟踪和解算等源代码,并且提供 NMEA 输出能力,能够满足 GNSS 的各种开发需求。



图 8 HG-RE03-D 高级 GNSS 开发套件

3.2.2 INS/DVL 超紧耦合方案

由于实验条件限制，没有可以直接对内部超声信号处理进行修改的 DVL，因此自己搭建一个微波多普勒雷达测速系统来模拟 DVL，对 INS/DVL 的超紧耦合进行原理性验证。具体方案如下图所示：

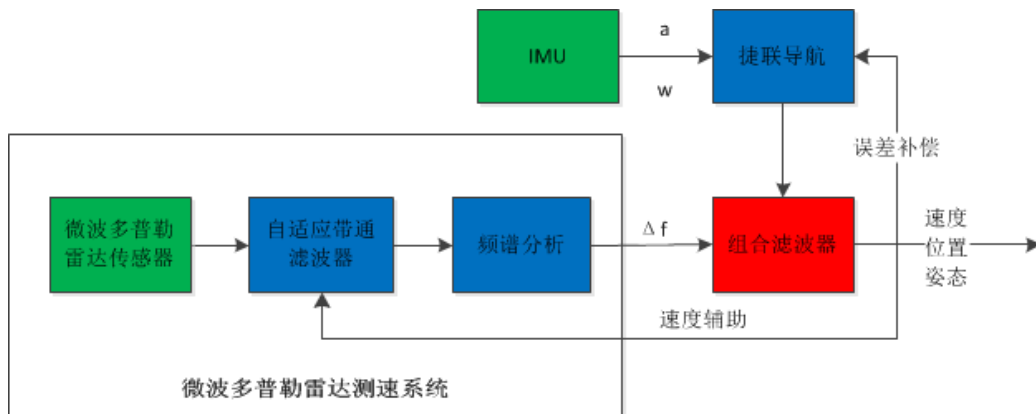


图 9 INS/DVL 超紧耦合实现示意图

微波多普勒雷达传感器采用德国 InnoSent 公司的 24GHz 雷达收发器（如图 10 所示），向地面发射 4 束不同方向的波束（采用詹纳斯配置，如图 11 所示），同时接收回波信号，输出多普勒频移信号。通过对多普勒频移信号进行自适应带通滤波和频谱分析计算得到每束波束的多普勒频移，输出给 INS 参与组合滤波。滤波后得到的速度信息又反馈给微波测速系统，辅助调节带通滤波器的中心频率，从而得到更窄的带宽，增强抑制噪声的能力，又防止有效多普勒频移落在阻带上（类似于 DVL 跟踪环失锁）。

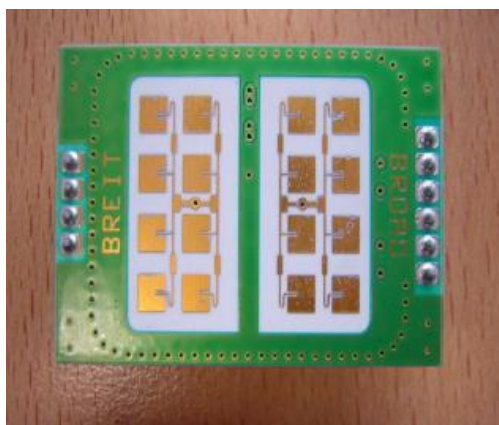


图 10 IPS-154 雷达收发器

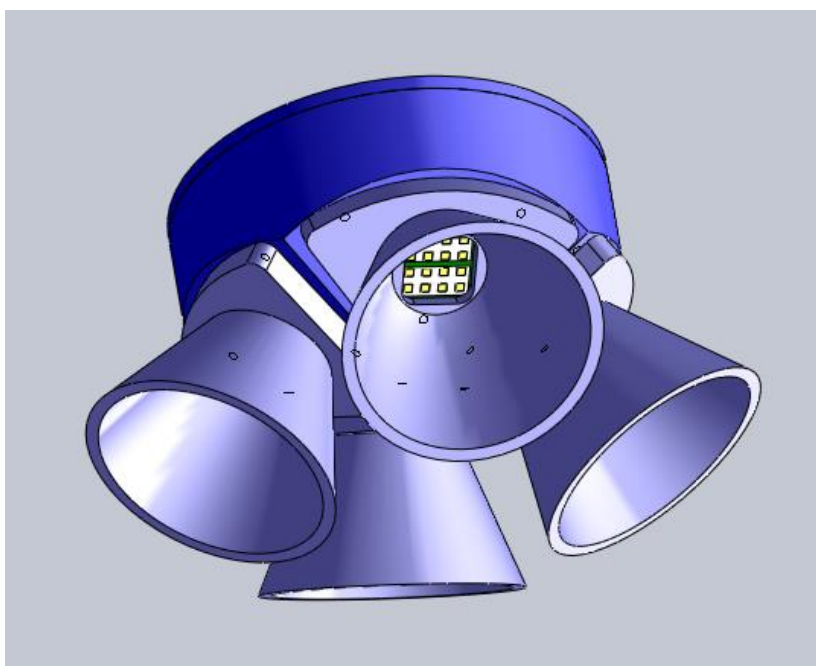


图 11 四波束微波多普勒测速系统示意图

INS/DVL 的超紧耦合滤波思想与 INS/BDS 类似，不同的是要利用 INS 和 DVL 的误差模型，建立相应的状态方程和观测方程。

3.2.3 INS/BDS/DVL 超紧耦合方案

INS/BDS/DVL 三者的超紧耦合信息融合算法的难点在于如何有效地利用三者的信息估计得到最佳导航信息，并且保证当 BDS 或者 DVL 失效时，也能可靠地工作。

前面讲到集中式卡尔曼滤波方法随着系统状态维数的增加计算量急剧增大，影响了系统对实时性的要求；可靠性较差，一个传感器的故障将导致整体导航性

能的迅速下降。而分散式卡尔曼滤波方法则将系统分解为多个子系统，各子系统分别由各自的滤波器进行滤波估计，各分滤波器的估计结果通过一个主滤波器进行信息的融合，即使有一个或多个子滤波器失效时，也不会影响整体性能。因此，INS/BDS/DVL 三者的超紧耦合采用分散式卡尔曼滤波方法，其中典型代表为联邦卡尔曼滤波器。具体方案如下图所示：

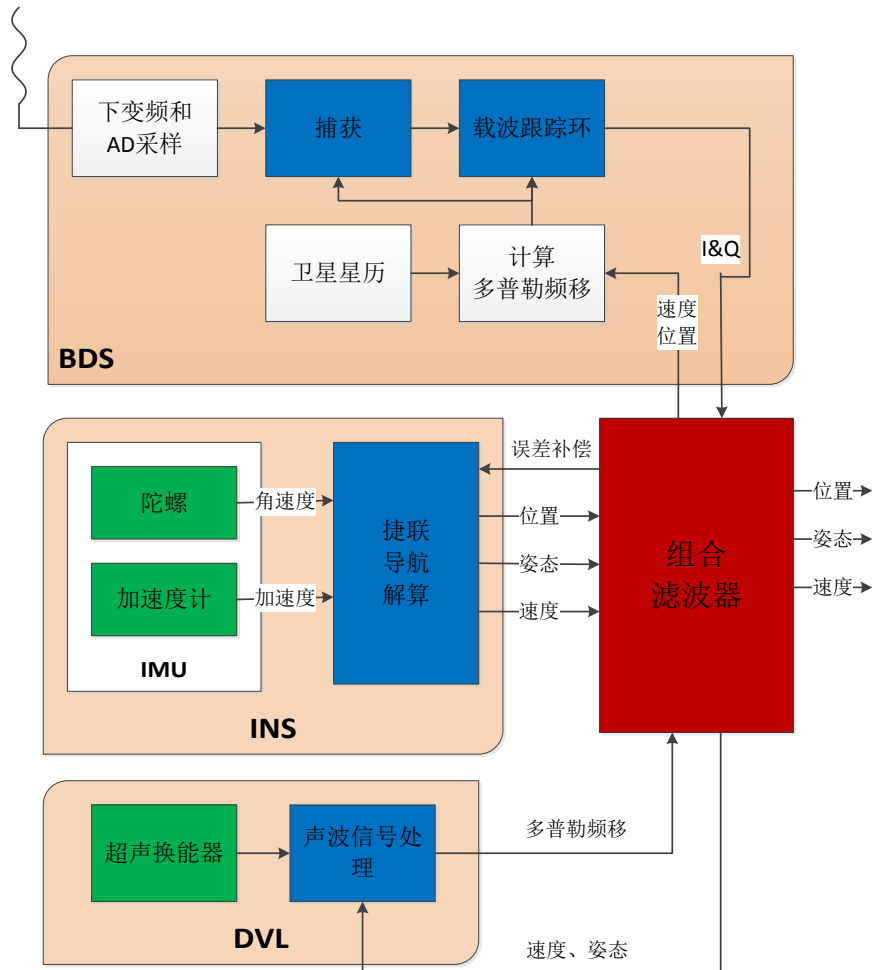


图 12 INS/BDS/DVL 超紧耦合框图

3.2.4 实验验证方案

1. INS/BDS 超紧耦合验证方法：

用实验室现有的惯导系统与北斗接收机实现超紧耦合，做路试，寻找一个对卫星信号遮挡比较严重的路段，分别采用松耦合、紧耦合和超紧耦合进行导航，比较导航效果。

2. INS/DVL 超紧耦合验证方法

用微波多普勒雷达测速系统模拟 DVL, 实现与惯导系统的超紧耦合, 做路试, 人为地关闭其中一路或者几路微波波束, 看组合导航结果, 并与传统耦合方式比较。

寻找一个颠簸比较厉害的路段, 模拟姿态对测速的影响, 看组合导航结果, 并与传统耦合方式比较。

3. INS/BDS/DVL 超紧耦合验证方法

INS/BDS/DVL 组合做路试, 连续导航 1 小时以上, 最后回到起始点, 计算导航轨迹的圆概率误差。

第四章 研究进度安排

2013.02-2013.03: 修改 BDS 接收机定位解算部分程序, 使接收机输出伪距和伪距率等信息

2013.04: 建立 INS 和 BDS 的紧耦合滤波模型, 并对算法进行仿真, 分析比较各种卡尔曼滤波器的性能

2013.05: 撰写小论文

2013.06- 2013.07 : 修改北斗接收机基带信号处理部分程序, 利用 INS 导航信息辅助对卫星信号的捕获和跟踪。

2013.8: 建立 INS 和 BDS 的超紧耦合滤波模型, 并对算法进行仿真分析

2013.9: 实现 INS/BDS 超紧耦合, 通过实验验证, 并与紧耦合比较

2013.10: 撰写小论文

2013.11: 搭建微波多普勒雷达测速系统来模拟 DVL

2013.12: 建立 INS 和 DVL 的超紧耦合滤波模型, 实现 INS/DVL 超紧耦合, 通过路试, 并与传统耦合方式比较, 验证其有效性

2013.12: 建立 INS/BDS/DVL 超紧耦合滤波模型, 实现并验证

2014.01-2014.02: 撰写毕业论文

参考文献

- [1] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[G]. 西北工业大学出版社, 1998.
- [2] 刘慧, 王丰乐. INS/DVL组合导航系统在水下载体中运用研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版); JOURNAL OF QINGDAO UNIVERSITY(ENGINEERING & TECHNOLOGY EDITION), 2002,17(1):4.
- [3] 黄汛, 高启孝, 李安, 等. INS/GPS超紧耦合技术研究现状及展望[J]. 飞航导弹, 2009(4):42-47.
- [4] Gao G, Lachapelle G. A novel architecture for ultra-tight HSGPS-INS integration[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2008,7(1):46-61.
- [5] 任江涛. 北斗接收机基带信号的捕获算法研究[D]. 合肥工业大学信号与信息处理, 2010.
- [6] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件[S]. 2012.
- [7] 北斗卫星导航系统简介 [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/2011/12/06/20111206e06b16a3bd8846459b969277a3317e5b.html>.
- [8] 北斗卫星导航系统 [EB/OL]. http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%97%E6%96%97%E5%8D%AB%E6%98%9F%E5%AF%BC%E8%88%AA%E7%B3%BB%E7%BB%9F#cite_note-21.
- [9] 傅菊英, 吴炳昭. 声学多普勒计程仪测速误差分析与补偿[J]. 海洋技术, 2011,30(2):91-93.
- [10] Rudolph D, Wilson T A. Doppler Velocity Log theory and preliminary considerations for design and construction: Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE, 2012[C].
- [11] Copps E M, Geier G J, Fidler W C, et al. OPTIMAL PROCESSING OF GPS SIGNALS[J]. NAVIGATION, 1980(Vol. 27 No. 3):171-182.
- [12] Gustafson D, Dowdle J, Flueckiger K. A deeply integrated adaptive GPS-based navigator with extended range code tracking: Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000, 2000[C].
- [13] Gautier J D. GPS/INS generalized evaluation tool (GIGET) for the design and testing of integrated navigation systems[D]. Stanford University, 2003.
- [14] Abbott A S. Global positioning systems and inertial measuring unit ultratight coupling method:
- [15] Dah-Jing J, Fong-Chi C. Fuzzy Adaptive Unscented Kalman Filter for Ultra-Tight GPS/INS Integration: Computational Intelligence and Design (ISCID), 2010 International Symposium on, 2010[C].
- [16] Gannan Y, Tao Z. Unscented Kalman filtering for ultra-tightly coupled GPS/INS integration: Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on, 2009[C].
- [17] 胡锐. 惯性辅助GPS深组合导航系统研究与实现[D]. 中国, 2010.
- [18] 陈偲, 王可东, Si CHEN, 等. 惯性导航与卫星导航紧耦合技术发展现状[J]. 全球定位系统; GNSS WORLD OF CHINA, 2007,32(3):6.
- [19] 张涛. GPS/SINS超紧密组合导航系统的关键技术研究[D]. 中国, 2010.
- [20] Vathsala S. SPACE ATTITUDE DETERMINATION USING A SECOND-ORDER NONLINEAR FILTER.[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1987,10(6):559-566.
- [21] Hassan M F, Salut G, Singh M G, et al. DECENTRALIZED COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR THE GLOBAL KALMAN FILTER.[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978,AC-23(2):262-268.

- [22] Zhu Y, You Z, Zhao J, et al. The optimality for the distributed Kalman filtering fusion with feedback[J]. Automatica, 2001,37(9):1489-1493.
- [23] Carlson N A. Federated square root filter for decentralized parallel processors [J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1990,26(3):517-525.
- [24] 岳晓奎, 袁建平, Xiaokui Yue, 等. 一种基于极大似然准则的自适应卡尔曼滤波算法[J]. 西北工业大学学报; JOURNAL OF NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY, 2005,23(4):6.
- [25] SAGE A P, HUSA G W. ADAPTIVE FILTERING WITH UNKNOWN PRIOR STATISTICS[J]. 1969:760-769.
- [26] 耿延睿, 崔中兴, 张洪钺, 等. 衰减因子自适应滤波及在组合导航中的应用[J]. 北京航空航天大学学报; JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 2004,30(5):4.
- [27] Hide C, Moore T, Smith M. Adaptive Kalman filtering algorithms for integrating GPS and low cost INS: PLANS - 2004 Position Location and Navigation Symposium, April 26, 2004 - April 29, 2004, Monterey, CA, United states, 2004[C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..
- [28] Yoshimura T, Soeda T. A technique for compensating the filter performance by a fictitious noise[J]. Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1978,100(2):154-156.
- [29] 尚捷, 顾启泰, Jie SHANG, 等. MIMS/GPS组合导航系统中卡尔曼滤波器设计与实验研究[J]. 中国惯性技术学报; JOURNAL OF CHINESE INERTIAL TECHNOLOGY, 2005,13(2):5.
- [30] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A New approach for filtering nonlinear systems: Proceedings of the 1995 American Control Conference. Part 1 (of 6), June 21, 1995 - June 23, 1995, Seattle, WA, USA, 1995[C].
- [31] Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte H F. New method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000,45(3):477-482.
- [32] Julier S J, Uhlmann J K. Corrections to "Unscented filtering and nonlinear estimation": Deep Space Kas Band Link Management and Mars Reconnaissance Orbiter, 2004[C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..
- [33] Van Merwe R D, Wan E A, Julier S I. Sigma-point kalman filters for nonlinear estimation and sensor-fusion - Applications to integrated navigation: Collection of Technical Papers - AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, August 16, 2004 - August 19, 2004, Providence, RI, United states, 2004[C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc..
- [34] Crassidis J L. Sigma-point Kalman filtering for integrated GPS and inertial navigation: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2005, August 15, 2005 - August 18, 2005, San Francisco, CA, United states, 2005[C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc..
- [35] Crassidis J L, Markley F L. Unscented filtering for spacecraft attitude estimation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003,26(4):536-542.
- [36] Upadhyaya B R, Sorenson H W. BAYESIAN DISCRIMINANT APPROACH TO INPUT SIGNAL SELECTION IN PARAMETER ESTIMATION PROBLEMS.[J]. Information Sciences, 1977,12(1):61-91.
- [37] Carvalho H, Del Moral P, Monin A, et al. Optimal nonlinear filtering in GPS/INS integration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997,33(3):835-850.

- [38] Nordlund P J, Gustafsson F. Sequential Monte Carlo filtering techniques applied to integrated navigation systems: 2001 American Control Conference, June 25, 2001 - June 27, 2001, Arlington, VA, United states, 2001[C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc..
- [39] Azimi-Sadjadi B. Approximate nonlinear filtering with applications to navigation[D]. University of Maryland College ParkDepartment of Electrical and Computer Engineering, 2001.
- [40] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008,29(2):391-396.
- [41] 何秋生. GNSS接收机基带信号处理算法[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [42] Kim H, Bu S, Jee G, et al. An Ultra-tightly coupled GPS_INS Integration using Federated Kalman Filter: Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), Portland, OR, 2003[C].