

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目: 基于多源信息融合的

无人机编队协同相对导航技术

学生姓名:	沈佳雯
学生学号:	516413910003
专 业:	航空航天工程
指导教师:	战兴群
学院(系):	航空航天学院



摘要

近年来,无人机编队因其潜在的价值而受到了广泛关注。高精度的相对导航信息是无人 机编队完成任务和保证密集集群准确控制的的重要保障。室外的无人机编队的相对导航通 常由全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)来提供,但是这种方法在 复杂的城市环境中会面临由建筑物遮挡而带来的定位问题上巨大的挑战,具体表现为导航 精度、完好性和连续性的下降。针对这一问题,本文提出了一种基于多源信息融合的无人机 编队协同相对导航技术,通过利用不同传感器和多架无人机在编队中的观测量信息进行协 同导航,以提高导航性能。为验证所提出算法的有效性,本文搭建了基于 MATLAB 的计算 机仿真平台,进行了城市环境下的仿真实验。仿真结果表明本算法在相对导航的精度方面相 较于传统相对导航方法有显著的性能提升。另外,通过对本算法进行灵敏度分析,研究了影 响相对导航性能的因素。本文还搭建了无人机测试平台,进行了实际飞行实验验证。

关键词:无人机编队,相对导航,协同导航,信息融合,全球导航卫星系统定位(GNSS)



COOPERATIVE RELATIVE NAVIGATION FOR MULTI-UAV SYSTEMS BY FUSING INFORMATION OF MULTIPLE SENSORS

ABSTRACT

Multiple Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems have attracted extensive attention because of their potential values. High accuracy relative navigation is a key guarantee for multi-UAV systems to accomplish their missions. Outdoor multi-UAV system relative navigation is commonly ensured by Global Satellite Navigation System (GNSS). However, this approach might face great challenges in urban environments. On the other hand, due to the limitations of cost, load, endurance and size, a UAV cannot be equipped with too many high precise sensors at the same time. Aiming at these problems, this paper proposes a cooperative relative navigation system based on GNSS pseudoranges and information from other sensors, for example, Peer-to-Peer (P2P) range measurements. The proposed algorithm takes full advantage of observations from different sensors and multiple UAVs in the formation. The study in this paper is composed of three parts: theoretical research, algorithm design and testing technology both in simulation and flight test. To be more specific, the main content includes reviewing the theory framework of relative navigation and cooperative navigation, designing a cooperative relative algorithm in multi-UAV systems based on the estimations which are obtained by the information fusion between two UAVs, building testing platforms based on MATLAB and UAVs in order to validate the proposed algorithm by simulations and flight tests. The results lead to the conclusions as follows: 1) the overall relative navigation performance will be severely degraded due to limited satellite visibility and poor measurement accuracy in urban environment; 2) the performance can be enormously improved by employing observations of additional sensors to pseudorange DD, especially in GNSS challenging situations; 3) the relative navigation performance can be significantly improved by cooperating the information of multiple UAVs; 4) the impacts on the performance of the proposed algorithm includes the formation scale, the formation geometry, and the accuracy of the additional sensors; and 5) the testing platform based on UAVs can validate the proposed algorithms and it can be extended for other relative algorithms.

Key words: Multiple Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems, relative navigation, cooperative

navigation, information fusion, Global Navigation Satellite System (GNSS)



目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	1
1.3 研究内容及意义	2
1.4 遵循的相关行业规范	3
第二章 协同相对导航技术综述	4
2.1 无人机编队相对导航性能的需求	4
2.2 无人机编队协同导航调研	5
2.2.1 相对导航方式分类	5
2.2.2 无人机编队协同导航结构分类	5
2.2.3 协同导航算法分类	6
2.3 常用相对导航算法性能分析对比	6
2.4 基于多源信息融合的协同相对导航技术算法综述	6
2.4.1 无人机编队的协同导航	6
2.4.2 基于多源信息融合的相对导航	7
2.5 本章小结	7
第三章 基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法	8
3.1 GNSS 卫星导航观测量模型	8
3.1.1 GNSS 伪距观测量模型	8
3.1.2 GNSS 伪距双差模型	8
3.1.3 GNSS 伪距双差误差模型	9
3.2 相对测距观测量模型	10
3.2.1 相对测距观测量模型	10
3.2.2 UWB DWM1000 模块的相对测距误差实验	10
3.3 气压计观测量模型	12
3.4 相对测距辅助 GNSS 观测量的双机相对导航算法	12
3.5 相对测距辅助 GNSS 观测量的多机协同相对导航算法	13
3.5.1 算法介绍	13
3.5.2 协方差估计	16
3.6 UWB/气压计辅助 GNSS 观测量的协同相对导航算法	16
3.7 本章小结	17
第四章 计算机 MATLAB 平台仿真实验及仿真结果分析	18
4.1 仿真平台搭建	18
4.2 仿真条件设置	19
4.2.1 算法仿真基础条件	19
4.2.2 城市环境设置	19
4.3 性能评估仿真分析	20
4.4 灵敏度分析	23
4.5 本章小结	26



第五章 尤人机测试半台设计与实现	
5.1 无人机测试平台的设计与搭建	
5.2 无人机测试平台的实现	
5.3 本章小结	
第六章 结论与展望	
6.1 本文主要工作与创新点	
6.2 未来研究展望	
参考文献	
谢辞	
作者在学期间取得的学术成果	
ABSTRACT	1



第一章 绪论

1.1 研究背景

近年来,无人机编队系统在国际上受到的关注日益增长,其具有巨大的军事和民用价值:军事上,无人机编队应用于现代化作战,发展了无人机集群侦查打击一体化、"蜂群作战"等研究成果;民用上,基于无人机编队的空中监视、对地观测以及大型无人机群灯光秀的热度也在不断上升。相较于单机飞行,多无人机系统具有可执行多重任务、可靠性高、整体效率高等优点^[1],但是由于其系统的复杂性,执行难度也随之增加,且由于无人机有成本、载荷、续航、大小等诸多限制,无法在每架无人机上搭载太多高精度传感器。然而,在复杂的环境下提供准确和可靠的相对导航信息是实现无人机编队的基础性需求^[2]。

在相对导航中,最为常用的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的接收机可以在开阔环境下进行高精度的观测和定位,但是城市环境下,由于建筑物的遮挡等因素,仅基于 GNSS 的相对定位存在由可见卫星数不足、可见卫星几何分布差、非直射信号和多径效应引起的定位误差显著增大等问题^[3~6]。因此,基于 GNSS 的相对导航系统性能明显退化,具体表现为导航精度^[7]、完好性^[8]和连续性^[9]的下降,甚至可能出现无法导航的情况。

20世纪70年代,著名物理学家哈肯(Hermann Haken)提出"协同"的概念,并系统地 论述了协同理论(Synergetics),他指出如果一个系统的各子系统共同围绕目标相互协调配 合,则可以产生"1+1>2"的协同效应^[10]。协同导航则是一种利用多载体之间的相对观测和信 息传递实现导航资源共享的导航技术,可以有效解决上述问题,并能够增强导航系统在复杂 环境下的鲁棒性,且能够增加信息的冗余度以提高系统的安全性。

1.2 研究现状

本文研究的是无人机编队的协同相对导航问题,协同导航的研究起始于20世纪末,其 应用范围广阔,包括导弹、水下无人器、无人机、机器人等^[11]。由于具有准确性高、可靠 性高等诸多优势,协同导航技术获得了研究者的广泛关注。以美国为代表的西方国家在协同 技术的发展上起步较早,拥有较多的研究成果: 20 世纪 80 年代末,美国研发了联合战术信 息分布系统(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS),并在1991年海湾战争中 全面采用该系统,实现海陆空作战一体化;2014年,由法国牵头,瑞士、西班牙、瑞典、意 大利和希腊参与研究的"神经元"无人机在试飞中验证了编队控制、信息融合以及机间数据 通信等技术^[12]; 2015 年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出了在拒止环境中协同作战 (Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)项目, 使多无人飞行器在磁屏蔽环境下通过信息协同获得全面的情报 信息 [13]。与国外相比,虽然我国协同导航技术起步较晚,但国内科研团队紧跟国际步伐, 在无人机编队协同导航研究中取得了一定的研究成果: 民用上大多为小型旋翼无人机编队 表演,2018年南京航空航天大学团队成功进行了300架无人机的灯光秀;军用上,中国电 子科技集团公司分别在 2017 年和 2018 年完成了 119 架和 200 架固定翼无人机集群飞行试 验,虽然集群数量上获得了一定优势,但是在面对复杂环境时,协同感知能力及鲁棒性较差 [14]。



多传感器融合导航的引入提高了协同相对导航的导航精度,国内外很多学者对多传感器在无人机协同导航上的应用进行了研究,在传统的 GNSS 相对导航的基础上,融合了惯性(Inertial Measurement Unit, IMU)、超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)、视觉/图像、测高仪等技术^[15-23],通过多传感器的信息融合协同,提高协同导航准确性与可靠性,进而提高协同导航系统的精度与鲁棒性。除此之外,无人机编队的故障探测与排除(Fault detection and exclusion, FDE)算法作为多无人机协同相对导航的关键要素也在不断发展,包括对硬件的故障诊断识别方法^[24]、多机故障检测识别恢复系统^[25],多无人机利用协同相对导航信息对无人机编队进行多尺度冗余量测信息的故障检测与排除,可以提高编队飞行的稳定性、安全性以及在复杂环境下的适应性。

但是,以上各种基于多传感器融合的无人机编队协同相对导航定位方法存在不足:没有 针对可见卫星数较少的情况进行模型优化,大多没有采用 GNSS 和惯性传感器组合,室外没 有采用气压计辅助高度测量精度等。并且以上方法有一个普遍的局限性,即双机的相对位置 只通过双无人机的多传感器信息进行估计,而没有做到真正的多无人机信息的协同,因此多 机信息的利用率低,其相对导航的精度、完好性、连续性还有待提高。而通过加入故障探测 与排除(FDE),可以进一步提高相对导航的性能。

从国内外学者的大量研究成果,可以归纳出无人机编队的协同相对导航技术的发展趋势 如下:

(1) 协同相对导航的精度不断提升;

- (2) 拓展应用新型相对导航传感器;
- (3) 融合多源传感器;
- (4) 故障检测与排除的智能化;
- (5) 协同相对导航对象的复杂化,向大型集群系统发展。

1.3 研究内容及意义

本文题目为"基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航技术"。协同导航是一种利用 多载体之间的相对观测和信息传递实现导航资源共享的导航技术,针对"面向无人机编队的 协同导航技术研究"的大课题,本文从无人机编队的相对导航的角度进行相关研究。研究内 容围绕"协同相对导航"展开,包括理论研究、算法设计与测试仿真三部分,具体如下:

(1) 理论研究:

研究无人机编队相对导航性能的需求;研究基于 GNSS 的相对导航技术及不同相对导航算法的性能差异;研究基于 GNSS/UWB/气压计/IMU/视觉多源信息融合的相对导航技术。

(2) 算法设计:

在前人研究的基础上,设计多源信息融合应用于无人机编队协同相对导航技术。

(3) 算法测试:

搭建基于 MATLAB 的计算机仿真平台和基于无人机的算法测试平台, 对算法进行验证 与性能评估。

本文研究面向协同相对导航在无人机编队上的应用,旨在提升无人机编队相对导航的精度、可靠性和连续性,从而提高无人机编队在复杂环境下的可用性。本研究基于全球卫星导航系统(GNSS),超宽带(UWB),气压计,视觉传感器、惯性(IMU)等多传感器信息融合的相对导航技术,建立了包括基于 MATLAB 的计算机仿真平台和无人机测试平台在内的算法测试平台,对相关算法进行了验证和测试。本研究具有以下意义:

(1) 学术上,在复杂环境下提供准确和可靠的相对导航信息是实现无人机编队的基础 性需求,而协同导航能够增强导航系统在复杂环境下的鲁棒性,且能够增加信息的冗余度以 提高系统的安全性,本研究有利于进一步推进相对协同导航技术的研究内容,包括算法设



计、算法仿真和算法测试等方面。

(2) 工程上,研究相对协同导航信息有助于复杂环境中的无人机编队摆脱有限的传感 器搭载的限制,即无人机的成本、载荷、续航等要求而导致无人机上无法搭载过多传感器的 限制,从而提高传感器的信息利用率,降低运行成本,具有显著的经济意义;有助于增强城 市环境中无人机编队的安全性,从而进一步拓展无人机编队在城市环境的应用。

1.4 遵循的相关行业规范

document DO-299D.

本文设计的内容所隶属的类别为民用无人机,遵循的相关行业规范具体包括:

中国民用航空局(Civil Aviation Administration of China, CAAC)《特定类无人机试运行管理规程(暂行)》;

文件见于:特定类无人机试运行管理规程(暂行)。

- (2) 国际民航组织的标准和建议措施(Standard s and Recommended Practices SARPS);
 文件见于: GNSS Standards and Recommended Practices (SARPs)。
- (3) 国际民航组织(International Civil Aircraft Organization, ICAO)最低使用性能规范 (Minimum Operation Performance Standards, MOPS);
 文件见于: WAAS Minimum Operational Performance Specification (MOPS), RTCA



第二章 协同相对导航技术综述

本章为本文的理论研究部分,给出了无人机编队协同导航和相对导航相关的理论研究综述。本章的内容安排为: 2.1 节介绍无人机编队相对导航性能的需求,论证了无人机编队中应用协同相对导航技术的必要性; 2.2 节介绍无人机编队协同导航调研; 2.3 节介绍常用相对导航技术,包含基于 GNSS 的相对导航技术和其他相对导航算法,以及不同算法的性能差异分析; 2.4 节介绍基于多源信息融合的相对导航技术及协同导航技术的算法综述,该内容也是本文研究关注的重点; 2.5 节给出本章小结。

2.1 无人机编队相对导航性能的需求

无人机编队飞行的应用广泛,其协同编队具有任务分配、编队控制、轨迹规划等功能, 而在执行这些技术前,首先要获取编队中各无人机之间的相对位置信息。因此,在无人机编 队飞行中,精确的相对定位是保证准确密集集群协同控制的关键要素。无人机编队中各无人 机之间存在安全距离的要求,尤其是在小型无人机近距离编队飞行时,在编队内部多机之间 必须保持一定的距离^[26]。当相对导航的精度不能满足最小安全距离的要求时,无人机编队 飞行将会面临巨大的安全隐患。故相对导航性能在无人机编队之中尤为重要。

而由于单个无人机存在成本、载荷、续航、大小的要求^[27],导致无人机无法同时搭载 过多的高精度传感器。除此之外,复杂环境下的 GNSS 导航也会面临挑战,存在由可见卫星 数不足、可见卫星几何分布差、非直射信号、多径效应带来的显著误差(如图 2-1 所示), 导致仅基于 GNSS 的导航性能下降,具体表现为导航精度、完好性和连续性的下降,甚至可 能出现无法导航的情况。因此,为了保证无人机编队的相对导航的性能,引入协同的相对导 航技术是十分必要的。



图 2-1 城市环境下无人机编队相对定位面临的挑战示意图



2.2 无人机编队协同导航调研

本节从相对导航方式的分类、无人机编队协同导航的结构、及协同导航算法的分类进行了调研。

2.2.1 相对导航方式分类

常用的相对导航方式主要分为无线电导航、视觉导航等^[13]。其中,无线电导航包括全 球导航卫星系统定位(GNSS)、雷达、超宽带(UWB)等,可获取方位、距离、速度等信 息,具有定位精度较高、定位速度较快等优点;视觉导航即利用视觉传感器进行导航定位, 是协同导航位姿测量最直接的传感器,且不需要无人机之间相互通信,可以在复杂环境下提 供重要信息。

2.2.2 无人机编队协同导航结构分类

无人机编队协同导航示意图如图 2-2 所示,通过机间通信,实现各无人机之间的数据传输,达到信息协同的目的。





无人机编队协同导航的结构可分为主从式结构^[28](如图 2-3)与平行式结构^[29](如图 2-4):其中,主从式结构包括单主、多主等,通过搭载高精度的传感器的长机与配备低精度 传感器的僚机进行交互,僚机利用长机的导航信息及两者间的相对位置测量来对自身位置进 行估计,而僚机之间不进行信息通信^[30];平行式结构,也可称为分布式结构,通过多无人 机直接信息广播,各无人机搭载相同的传感器,且互相之间均有信息交互,实现信息共享, 通过两两的相互距离测量来更新自身位置。





2.2.3 协同导航算法分类

协同导航算法大致可以分为三种,分别为数理优化算法、图论算法以及滤波数据融合算法^[13]。其中,数理优化算法包含极大似然估计、最小二乘法等,在提高准确性的同时有助于降低计算复杂度;图论是通过数学结构点对点的关系将某一特定集合内的对象进行建模的算法^[31];信息融合滤波算法以卡尔曼滤波为主,可以分为原始卡尔曼滤波算法(Kalman filtering,KF)、扩展卡尔曼滤波算法(Extend Kalman filtering, EKF)和无迹卡尔曼滤波算法(Unscented Kalman filtering, UKF),运用信息滤波可使估计更新变得简单化。

2.3 常用相对导航算法性能分析对比

根据导航传感器的配置,常用的相对导航算法有:

(1) 基于 GNSS 的相对导航算法

基于 GNSS 信号的相对导航算法又可以分为位置域差分法和双机测量域差分法。其中, 位置域差分法通过两个载体的 GNSS 定位直接相减得到相对位置,优点在于其算法十分简 单,缺点在于它的数据输出频率很低,而且极度依赖两个载体的 GNSS 信号和 GNSS 单点 定位的精度,易受环境的影响;双机测量域差分法^[32]是对两个载体的 GNSS 观测量(伪距 或载波)进行差分来得到相对定位,差分算法包括单差、双差等,其优点为算法较为简单, 面对低成本的需求可以采用伪距进行双差计算,而对于高精度的要求可以采用载波进行双差 计算,但其缺点也在于依赖 GNSS 信号,易受环境影响,并且伪距双差的精度不足,而载波 双差则成本较高。

(2) 惯导辅助的双机测量域差分法

由惯性导航单元(IMU)辅助的双机测量域差分法^[33]的优点在于其成本较低,数据输出频率相比于普通的双机测量域差分法有所提高,并且在 GNSS 信号短暂失效时仍能使用,缺点为当 GNSS 信号长期失效时,其相对导航的精度下降严重。

(3) 视觉惯性组合的相对导航

采用视觉传感器和 IMU 组合的相对导航算法^[34],其优点在于两者都不依赖于 GNSS 信号,不依赖于外部传感器,因此具有自主性,缺点在于视觉设备的处理时间较长,且容易受到外部环境限制。

(4) 基于机间测距的相对导航性能增强算法

采用机间测距辅助的相对导航算法^[18],其优点在于相对测距模块的成本较低,可以达 到精度提高和稳定性提高的效果;其缺点在于无人机之间的相对定位距离受到相对测距模块 的测距范围限制。

2.4 基于多源信息融合的协同相对导航技术算法综述

从目前的研究现状来看,相关研究主要集中于无人机编队的协同导航方法以及基于多源 信息融合的相对导航方法上,故本节分别从这两个方向进行了文献调研。

2.4.1 无人机编队的协同导航

协同导航的概念最早提出于 20 世纪 80 年代,应用于多机器人协作系统的领域^[35-37], 通过各机的信息协同来进行定位导航,从而最终达到协同作业的功能。近年来,协同导航的 概念已经被引入到无人机领域,尤其是多无人机领域和无人机-无人车协同领域,涌现了大 量相关研究。Causa 等人讨论了一种主从机协同模式,将飞行于开阔环境的无人机作为主机 (父节点),而飞行在 GNSS 条件较差的环境下的无人机作为从机(子节点),通过主机的定 位信息和两者之间的观测,对原本导航条件较差的从机进行定位与导航,也可以实现从机的 自动导航^[38]。Gross 等人提出了一种无人机-无人车协同导航模式,由卫星定位良好的无人 驾驶地面小车(Unmanned Ground Vehicle, UGV)辅助空中飞行的无人机的导航,此法也适



用于在 GNSS 挑战环境下飞行的无人机进行导航^[22]。Vetrella 等人利用视觉、GPS、不同飞 行平台上天线之间的差分 GPS 以及由惯性传感器和磁力仪获得的测量数据,通过辅助的地 面载体来对开阔环境下飞行的一架小型无人机进行协同定位^[39]。然而,这些研究主要关注 的是绝对导航定位,而未能将重点放在多无人机系统的相对导航上。

同样,多源信息融合也是无人机编队协同导航的研究热点。上述 Gross 等人所提出的无 人机-无人车协同导航模式采用了 UWB 相对测距进行测量辅助^[22]。曲法义等研究者结合无 人机编队飞行问题,提出了一种由 INS、GPS 和视觉导航组成的高精度无人机编队相对导航 系统^[15]。但此类研究大多以双机作为编队进行讨论,本质上还是只利用了双机的信息,并 非真正的多机协同。

2.4.2 基于多源信息融合的相对导航

多源信息融合目前已成为一种获得更高精度的相对导航结果的主流方案。Wang 等人对 视觉传感器(VisNav)、惯性导航系统(INS)和差分 GPS(DGPS)采用分布式滤波进行信 息融合^[17]。Gross 等人采用 DGPS、INS 和 UWB 的组合进行相对导航,使用 UWB 相对测量辅助 GNSS 信号条件较差情况下整周模糊度的修复^[40]。熊骏等人提出了一种基于 UWB 和 GNSS 差分的相对导航方法^[18]。王念曾等人融合 GNSS 载波相位差分技术、UWB 点对 点测距和低成本 INS,提出了一种基于机间测距信息的相对导航方法^[16]。Nguyen 等人对 IMU、UWB 和测高仪进行融合,实现室内的相对定位与目标追踪^[41]。以上研究表明采用多 源信息融合的相对导航算法的精度明显优于仅采用一种相对观测量的效果。尽管如此,此类 研究只关注双机之间的相对导航,融合的多源信息仅在于多传感器,而非多机。因此如果直 接应用至无人机编队中,仍然无法实现多机协同。

2.5 本章小结

本章对本文的理论研究内容做了陈述,论证了无人机编队协同相对导航研究的必要性。 从研究现状的调研可以总结出目前研究的急需要解决的不足:(1)无人机编队的协同导航算 法大多关注通过各机的协同信息辅助绝对导航信息,相对导航的关注还不足;(2)无人机的 相对导航算法虽然应用了多源信息融合,但主要是针对双机之间的相对导航,或者是以双机 作为多机编队在进行普遍讨论,这导致多机信息并没有得到充分利用,不够协同。因此,本 文提出的基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航技术有必要性和先进性,不仅对多传 感器信息进行融合协同,也对各无人机的信息进行协同利用,达到协同相对导航的要求。



第三章 基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法

本章为本文的算法设计部分,介绍基于 GNSS 的相对导航算法的相关模型,并提出了基 于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法。本章的内容安排为:3.1 节提供了 GNSS 卫星导航测量模型,包括伪距观测量模型及伪距双差模型;3.2 节介绍了测距测量及其误差 模型;3.3 节介绍了气压计测量及其误差模型;3.4 节给出了本文所设计的相对测距辅助 GNSS 双差的双机基线估计算法;3.5 节进一步由双机到多机延伸,给出了本文所设计的相对测距 辅助 GNSS 双差的多机协同相对导航算法;3.6 节介绍了相对测距/气压计辅助 GNSS 观测量 的协同相对导航算法;3.7 节为本章小结。

3.1 GNSS 卫星导航观测量模型

3.1.1 GNSS 伪距观测量模型

GNSS 接收机可以提供两种不同的观测量:码相位测量(即伪距)和载波相位测量(即 载波)。伪距通常应用于精度要求相对较低(米级或亚米级)的应用中,可以提供瞬时的单 点定位^[42],而载波则是面向高精度(分米级或厘米级)的应用^[43]。在使用高端接收机或是 卫星信号质量较好的情况下(例如在开阔的环境中),GNSS 接收机可以接收稳定的载波相 位观测。然而,在GNSS 定位较困难的环境中,载波相位观测量不稳定,因此通常采用非平 滑伪距的模型进行相对导航。这种情况通常发生在使用低成本接收机的城市动态应用中。因 此,本文主要考虑伪距观测量来进行相对导航。伪距的测量模型如下所示。

对于给定的接收机b和给定的卫星k,其伪距观测方程^[44]如公式(3-1):

$$\rho_{b}^{k} = d_{b}^{k} + E_{b}^{k} + c(\delta t_{b} - \delta t^{k}) + I_{b}^{k} + T_{b}^{k} + \varepsilon_{b}^{k}$$
(3-1)

其中,

- d为卫星与接收机之间的几何范围;
- E为星历误差,即广播轨道与实际值之差;
- c为真空中的光速;
- $\delta t_b \pi \delta t^k$ 分别指的是接收机b的时钟钟差和卫星k的时钟钟差;
- *I*和T分别指的是电离层延时和对流层延时,两者为大气传播误差;
- ε为一个值未知的测量噪声量,代表其他误差的总和,包含了多路径、接收机噪声等误差源。

3.1.2 GNSS 伪距双差模型

GNSS 伪距观测量最主要的误差源如公式(3-1)所示。对于相对距离很近的两个接收 机,其对于同一个卫星的伪距测量结果中所包含的卫星时钟误差、卫星星历误差、电离层延 迟和对流层延迟大致相等。因此,可以通过观测量做差的方式来消除两个接收机之间共同的 误差项。

如图 3-1 所示,伪距单差(Single Difference, SD)是通过对两个接收机的相应观测量进行差分而形成的组合,其中,卫星星历误差和时钟钟差以及大气传播误差将被消除,但接收机的时钟偏移项(即 $\delta t_r - \delta t_b$)仍然未知。双差(Double Difference, DD)是通过对来自不同卫星的两个单差测量值再次进行差分而得到的,它可以进一步消除接收机时钟偏移项^[43]。由于多径误差和接收机噪声在接收机之间不相关,因此对于伪距双差,这两项无法被消除。





图 3-1 GNSS 单差观测量构成

伪距双差观测量由两个接收机和两个卫星组成,如公式(3-2)所示:

$$\rho_{rb}^{jk} \triangleq \rho^{(j)} = \left(\rho_r^j - \rho_b^j\right) - \left(\rho_r^k - \rho_b^k\right) \tag{3-2}$$

其中,下标r和b表示接收机;上标j和k表示卫星,且卫星k为参考星(参考星一般选取高仰

角卫星,因其观测量精度较高);上标(ĵ)表示在原卫星序列中去掉参考星后的新卫星编号。 实际上,伪距双差测量值可看做由基线(两个接收机间距离)部分*d*^{jk}和误差部分*ε*^{jk}_{rb}组

关你工, 仍距然差测重值可有做田蓥线 (两个按权机间距离) 即力 *u_{rb}*和庆差的力 *ε_{rb}* 组成:

$$\rho^{(j)} = d_{rb}^{jk} + \varepsilon_{rb}^{jk} \tag{3-3}$$

基线项 d_{rb}^{jk} 反映了待求解的基线向量x(方向从r到b):

$$d_{rb}^{jk} \triangleq \left(d_r^j - d_b^j\right) - \left(d_r^k - d_b^k\right) = \begin{bmatrix}\mathbf{1}_b^j - \mathbf{1}_b^k\end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{x}$$
(3-4)

其中,1^{*j*}是接收机b到卫星*j*的单位方向向量。

由公式 (3-4), 公式 (3-3) 可以简写成:

$$\rho^{(j)} = \mathbf{1}_{h}^{(j)} \cdot \mathbf{x} + \varepsilon^{(j)} \tag{3-5}$$

其中, $\mathbf{1}_{b}^{(j)}$ 是接收机b到卫星j和卫星k的单位方向向量之差。

误差项 ε_{rh}^{jk} 反映了多径和接收机噪声:

$$\varepsilon_{rb}^{jk} \triangleq \varepsilon^{(j)} = \left(\varepsilon_r^j - \varepsilon_b^j\right) - \left(\varepsilon_r^k - \varepsilon_b^k\right) \tag{3-6}$$

3.1.3 GNSS 伪距双差误差模型

通过 3.1.2 节所介绍的伪距双差计算,伪距观测量中绝大多数的误差源已被消除,仅保 留了伪距双差的多路径误差和接收机噪声误差。本文考虑城市环境中常用的未平滑伪距模 型。相对于卫星*j*的伪距单差测量量(SD^{*j*} = $\rho_r^j - \rho_b^j$)的多路径(MultiPath, MP)误差和接 收机噪声(Receiver Noise, RN)误差可建模为^[45]:

$$\sigma_{\rm MP,SD}^{j} = \sqrt{2} \times \sigma_{\rm MP}^{j}[m] \tag{3-7}$$

$$\sigma_{\rm RN,SD}^{j} = \sqrt{2} \times \sigma_{\rm RN}^{j} [\rm m]$$
(3-8)

其中, σ_{MP}^{j} 和 σ_{RN}^{j} 分别是多路径误差和接收机噪声误差的标准差。

第9页共40页



由此,伪距单差测量量误差的协方差对角矩阵CsD受多路径和接收机噪声的影响^[46]:

$$\boldsymbol{C}_{\rm SD}(j,j) = \left(\sigma_{\rm MP}^{j}\right)^{2} + \left(\sigma_{\rm RN}^{j}\right)^{2}, j = 1, 2, \dots, N_{S}$$
(3-9)

其中, N_s为该接收机可视卫星的个数。

以公式(3-2)为基础,伪距双差测量量误差的协方差矩阵可以通过公式(3-10)获得:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{DD}} = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{C}_{\mathrm{SD}} \cdot \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$$
(3-10)

其中,矩阵**B**为伪距单差到伪距双差的转换阵,是一个(N_S-1)×N_S阶矩阵,如下所示:

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3-11)

其中,矩阵中第k列(对应参考星k)的所有元素均等于-1。

3.2 相对测距观测量模型

3.2.1 相对测距观测量模型

本文的相对测距以超宽带(UWB)技术的测距功能为例。超宽带(UWB)技术是一种 先进无线通信技术,其使用 1GHz 以上带宽,且不依靠载波。UWB 的信号带宽应大于等于 500MHz,或其相对带宽大于 20%。相对带宽定义为: $\frac{f_H-f_L}{f_c}$,其中, $f_H n f_L \beta$ 别为功率较峰 值下降 10dB 时对应的高端频率和低端频率, f_c 为信号中心频率,即 $f_c = (f_H + f_L)/2$ 。

UWB 的主要特点有:结构简单、功耗低、多径分辨力强、数据传输率高、穿透能力强、 定位精确、抗干扰能力强^[47]。

具有较高测距精度的 UWB 模块,可用于提供无人机之间的距离信息,UWB 模块所获 得的距离信息为标量而非矢量。由于相对测距模块存在一定误差,其在两架无人机之间的测 距观测值*m_{rb}*可以定义为真实几何距离*d_{rb}*和噪声ω_{rb}的组合:

$$m_{rb} = d_{rb} + \omega_{rb} \tag{3-12}$$

其中,真实几何距离 $d_{rb} = ||x||$,即基线长度;噪声误差可看做一个以零为均值、以 σ_{uwb} 为标准差的高斯正态分布噪声误差模型。

3.2.2 UWB DWM1000 模块的相对测距误差实验

本文采用 UWB DWM1000 模块提供相对测距信息,该模块内置相对测距代码,可以测 得基站和标签之间的相对距离,通过读取基站串口可直接获得该距离信息。对于该模块,本 文作者进行了相对测距的误差实验。

实验方法为在确定距离真值的情况下,用 DWM 1000 模块进行测距,与真值比较,得 到测距误差。

实验过程为先确定基站位置,以基站位置为0距离,标注需要测量的距离位置,将标签 依次放于预设位置,进行测量,每个距离测量100组数据。测量范围考虑为0米到2米取 0.1米为步长(0.1:0.1:2),2米到5米取0.2米为步长(2.2:0.2:5),5米到10米取0.5米为 步长(5:0.5:10),以及11米,共46组。

实验结果取测量误差的最小值、均值-标准差的差值、均值、均值+标准差、最大值, 绘制箱线图(如图 3-2 所示)。





(c) 测量范围 2.2 米至 5.0 米

第 11 页 共 40 页





图 3-2 UWB DWM1000 模块测距精度误差箱线图

测量结果表明,短距离(10米内)误差虽然会有起伏,但基本都在0.1米内,符合UWB的10厘米精度的要求;在5.5米~7.5米,误差与之前的相似,在10厘米精度内;但在8.0米~10米,误差有上升趋势,达到20厘米,此时数据已不如之前稳定。10米后原本计划以1米为步长,测至20米,但是在11米的测量发现,此时串口数据输出很慢,此时只有0.2Hz左右,且测量误差很大,误差均值达到2.7米,误差的标准差达到1.858米,数据非常波动,故不再进行后续的测量。图中出现多个异常值标注,实为实验中得到的最值,作图时因其超出正常范围而被判定为异常值,说明此时数据波动较大,该最值已不合理。在调试中也发现,基站和标签中如果存在遮挡物,也会有很大的误差,且遮挡不宜控制,故实验中未设置定量遮挡,只进行无遮挡情况的室内测量。

因此本文所测试的 UWB DWM1000 模块非常适用于短距离(8 米以内)的相对测距需求,精度可达 10 厘米,该距离虽然存在限制但仍然适用于小型的无人机编队,满足后续的实验需求。

3.3 气压计观测量模型

气压计可用于获取无人机的高度信息,其测距原理是大气压强随着高度的升高而降低 ^[48],即通过测量无人机所在高度的大气压强值,可以推算出当前所处的高度。由于大气压力 并不是均匀分布的,因此,大气压力和相对高度是非线性关系。

气压计绝对精度并不理想(米级以上),但是气压计测量的分辨率高,因此通过在同一高度上进行两个气压计的对准校正后,气压计在相对高度的精度表现上相当突出(分米级),非常适用于相对导航中提供两两无人机之间的相对高度^[49~50]。其相对高度观测值 ΔH_{rb} 也可定义为真实几何高度差 h_{rb} 和噪声误差 δ_{rb} 的组合:

$$\Delta H_{rb} = \Delta h_{rb} + \delta_{rb} \tag{3-13}$$

其中,噪声误差 δ_{rb} 可看做一个以零为均值、以 σ_{har} 为标准差的高斯正态分布噪声误差模型。

3.4 相对测距辅助 GNSS 观测量的双机相对导航算法

假设无人机b和r搭载的接收机共有N_s颗共同可见的卫星(简称为共视卫星),选取仰角 最高的卫星作为参考星,则一共可以得到(N_s – 1)个双差测量量。同时,两架无人机之间有 相对测距信息。将相对测距和测量量组合,可以得到公式(3-2),(3-5)和(3-6)的拓展:

第 12 页 共 40 页



$$\begin{bmatrix} \rho^{(1)} \\ \rho^{(2)} \\ \vdots \\ \rho^{(N-1)} \\ m_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{b} \\ \mathbf{1}_{b}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{1}_{b}^{(N-1)} \\ \mathbf{1}_{x} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \varepsilon^{(1)} \\ \varepsilon^{(2)} \\ \vdots \\ \varepsilon^{(N-1)} \\ \omega_{rb} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{\Leftrightarrow} \rho_{rb} = A \cdot \mathbf{x} + \varepsilon_{rb}$$
(3-14)

其中,1_x是基线的单位方向向量。

г <mark>1</mark>(1)]

基线向量解**x**通过牛顿迭代法求解方程组(3-14)得到,在每次迭代过程中通过加权最 小二乘法更新Δ**浆**:

$$\Delta \hat{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{D}} \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{D}} \cdot \Delta \boldsymbol{\rho}_{rb}$$
(3-15)

其中, Δρ_{rb}由两部分组成, 第一部分为伪距双差测量值与由估计的基线确定的双差值的差, 第二部分为测量的相对距离与由估计的基线确定的相对距离的差;基线初值可由单点定位 给出;基线解由上一步迭代得到; **W**_D为权重矩阵,是一个对角阵。

权重矩阵 $W_{\rm D}$ 由双差测量量协方差矩阵 $C_{\rm DD}$ 和相对测距的协方差决定。对于双差测量量 部分,权重矩阵 $W_{\rm D}$ 的对角线元素对应等于双差测量量的误差协方差倒数:

$$\boldsymbol{W}_{\rm D}(\hat{j},\hat{j}) = \left(\boldsymbol{C}_{\rm DD}(\hat{j},\hat{j})\right)^{-1}, \hat{j} = 1, 2, \dots, N_{\rm S} - 1$$
(3-16)

对于相对测距部分,权重矩阵W_D的对角线元素对应等于相对测距的误差协方差倒数:

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{D}}(N_{\mathrm{S}}, N_{\mathrm{S}}) = \left(\sigma_{\mathrm{uwb}}^{2}\right)^{-1} \tag{3-17}$$

由公式(3-16)和(3-17),可以得到所有观测量的协方差矩阵:

$$\boldsymbol{C}_{\text{OB}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{\text{DD}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \sigma_{\text{uwb}}^2 \end{bmatrix}$$
(3-18)

3.5 相对测距辅助 GNSS 观测量的多机协同相对导航算法

3.5.1 算法介绍

假设一个由N架无人机组成的无人机编队,其机间通信关系和相对观测量如图 3-2 所示。 通过 3.4 节的解算,可以初步得到机间的基线估计,记为*e*。



图 3-2 无人机编队通信关系及机间观测

选取无人机编队中接收卫星信号良好的无人机作为基准,记为无人机b,以无人机b为 原点建立当地东北天(ENU)坐标系。其他无人机的相对位置可以通过和无人机b的基线估 计得到。 (金) 上海交通大学

在城市环境中,存在因共视卫星数不足导致公式(3-14)无法解算的情况。特别地,当 无人机*i*和无人机*r*仅有两颗共视卫星,机间相对距离信息辅助 GNSS 相对差分测量值的方 程为:

$$\begin{bmatrix} \rho_{ir}^{(1)} \\ m_{ir} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{r}^{(1)} \\ \mathbf{1}_{x,ir} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{ir} + \begin{bmatrix} \varepsilon^{(1)} \\ \omega_{ir} \end{bmatrix}$$
(3-19)

其中, $\rho_{ir}^{(1)}$ 是伪距双差测量量: $\mathbf{1}_{r}^{(1)}$ 是无人机r到这两颗共视卫星的单位方向向量之差: $\mathbf{1}_{x,ir}$ 为无人机*i*到无人机r的单位方向向量; \mathbf{x}_{ir} 无人机*i*到无人机r的方向向量,可以通过无人机b 分别到无人机*i*和无人机r的方向向量获得,即 $\mathbf{x}_{ir} = \mathbf{x}_{br} - \mathbf{x}_{bi}$ 。因此,基于 3.4 节估计的基 线 \mathbf{e}_{br} ,公式(3-19)可以改写为:

$$\begin{bmatrix} \rho_{ir}^{(1)} - \mathbf{1}_{r}^{(1)} \cdot \boldsymbol{e}_{br} \\ m_{ir} - \mathbf{1}_{x,ir} \cdot \boldsymbol{e}_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{1}_{r}^{(1)} \\ -\mathbf{1}_{x,ir} \end{bmatrix} \boldsymbol{x}_{bi} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} \\ \boldsymbol{\omega}_{ir} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{\Leftrightarrow} \boldsymbol{f}_{ir} = \boldsymbol{H}_{ir} \cdot \boldsymbol{x}_{bi} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ir}$$
(3-20)

其中, $\mathbf{1}_{x,ir}$ 可通过 $\mathbf{1}_{x,ir} = \frac{e_{br} - x_{bi}}{|e_{br} - x_{bi}|}$ 计算得到。

至此,相对测距辅助 GNSS 双差的双机基线估计完整流程如图 3-3 所示。其中,数据采 集单元包括 GNSS 接收机、相对测距模块(UWB),机间通信模块对信息进行传输,将相对 测距和伪距双差测量量组成融合方程进行解算。



图 3-3 相对测距辅助 GNSS 双差的双机基线估计流程图



图 3-4 相对测距辅助 GNSS 双差的多机协同相对导航算法流程图

第 14 页 共 40 页



图 3-4 展示了相对测距辅助 GNSS 双差的多机协同相对导航算法的流程。该算法将通过以下内容进行详细展开。

首先,无人机*b*和无人机*i*之间的基线可以通过其他无人机和这两者的观测得到如下公式:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{bi} \\ \boldsymbol{e}_{bu} + \boldsymbol{e}_{ui} \\ \vdots \\ \underline{\boldsymbol{e}_{bN}} + \boldsymbol{e}_{Ni} \\ \underline{\boldsymbol{f}_{ir}} \\ \underline{\boldsymbol{f}_{ir}} \\ \underline{\boldsymbol{m}_{bi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \vdots \\ \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \underline{\boldsymbol{H}_{ir}} \\ \underline{\boldsymbol{H}_{$$

其中, e为基线估计向量的观测值; $I_{3\times 3}$ 是一个 3×3 阶的单位矩阵; \hat{e} 是一个 3×1 阶的基线估计误差矩阵。

基线向量解 x_{bi} 通过牛顿迭代法求解方程组(3-21)得到,在每次迭代过程中通过加权最小二乘法更新 $\Delta \hat{x}_{bi}$:

$$\Delta \hat{\boldsymbol{x}}_{bi} = (\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{M}} \boldsymbol{G})^{-1} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{M}} \cdot \Delta \boldsymbol{y}_{bi}$$
(3-22)

其中, Δy_{bi}如公式(3-21)所示的分块矩阵由三部分组成,是观测值和预测值的差值;基线 初值可由 3.4 节所解算的估计值给出;基线解由上一步迭代得到; W_M为权重矩阵,是一个 对角阵,由观测量相关的协方差给出:

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{M}}(l,l) = \left(\boldsymbol{C}_{\mathrm{M}}(l,l)\right)^{-1} \tag{3-23}$$

协方差C_M矩阵由各个观测量对应协方差组成:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{M}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bi)} & & & \\ & \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(1u+ui)} & & \\ & & \ddots & \\ & & \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(1N+Ni)} & \\ & & & \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{f}(ir)} & \\ & & & \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{uwb}}^2 \end{bmatrix}$$
(3-24)

其中,下标e(bi)指的是无人机b到无人机i之间的基线估计;下标e(bu + ui)指的是两个基线估计的和,即e_{bu} + e_{ui};下标f(ir)指的是无法直接解算的无人机i和无人机r之间的信息融合方程。对应的协方差估计将在 3.5.2 节中给出。

无人机b到无人机i的基线解**x**_{bi}将用以更新无人机b到无人机i的基线估计观测。同时, 其他无人机到无人机i的基线估计将被更新:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{ji} \\ \boldsymbol{e}_{bi} - \boldsymbol{e}_{bj} \\ \boldsymbol{m}_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \boldsymbol{1}_{x,ji} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{y} \\ \boldsymbol{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ji} \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bi} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bj} \\ \boldsymbol{\omega}_{ji} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{\Leftrightarrow} \boldsymbol{y}_{ji} = \hat{\boldsymbol{G}} \cdot \boldsymbol{x}_{ji} + \boldsymbol{\epsilon}_{ji}$$
(3-25)

基线解xii通过加权最小二乘法估计,每次迭代更新为:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_{ji} = (\hat{\mathbf{G}}^{\mathrm{T}} \widehat{\mathbf{W}} \hat{\mathbf{G}})^{-1} \hat{\mathbf{G}}^{\mathrm{T}} \widehat{\mathbf{W}} \cdot \Delta \mathbf{y}_{ji}$$
(3-26)

其中, Δy_{ji} 为对应观测量和预期值的差值;得到的基线解 x_{ji} 将用以更新无人机编队的对应基线的观测。权重矩阵 \widehat{W} 由对应观测量的协方差决定:

$$\widehat{\boldsymbol{W}}(l,l) = \left(\widehat{\boldsymbol{C}}(l,l)\right)^{-1} \tag{3-27}$$

第 15 页 共 40 页



其中,协方差矩阵**ĉ**为对角阵,对应观测量:

$$\widehat{\boldsymbol{C}} = diag[\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(ji)}, \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bi-bj)}, \sigma_{\text{uwb}}^2]$$
(3-28)

3.5.2 协方差估计 对任意基线,如*e_{ui}*,其协方差矩阵如下:

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(ui)} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{D},ui} \boldsymbol{C}_{\mathrm{OB},ui} \boldsymbol{S}_{\mathrm{D},ui}^{\mathrm{T}}$$
(3-29)

其中, $S_{D,ui} = (A_{ui}^{T} W_{D,ui} A_{ui})^{-1} A_{ui}^{T} W_{D,ui}$ 由公式 (3-15) 给出。

对于两个任意基线的和 (例如, $e_{bu} + e_{ui}$)以及两个任意基线的差 (例如, $e_{bi} - e_{bu}$), 其协方差模型如下:

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bu+ui)} = \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bu)} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(ui)} + 2 \times \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bu,ui)}$$
(3-30)

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bi-bu)} = \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bi)} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bu)} - 2 \times \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bi,bu)}$$
(3-31)

其中, $C_{e(bu,ui)}$ 表示两个基线 (e_{bu} 和 e_{ui}) 之间的协方差,由这两个观测量组成,即 $C_{e(bu,ui)} = S_{D,bu}C_{OB(bu,ui)}S_{D,ui}^{T}$, $C_{OB(bu,ui)}$ 表达式为:

$$\boldsymbol{C}_{OB(bu,ui)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{DD(bu,ui)} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(3-32)

其中, $(n-1) \times (m-1)$ 阶矩阵 $C_{DD(bu,ui)}$ 如下:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{DD}(bu,ui)}(p,q) = \begin{cases} \left(\sigma_{\mathrm{user},u}^{k}\right)^{2}, & p \neq q \\ \left(\sigma_{\mathrm{user},u}^{k}\right)^{2} + \left(\sigma_{\mathrm{user},u}^{p}\right)^{2}, & p = q \end{cases}$$
(3-33)

其中, n是无人机b和无人机u的共视卫星数, m是无人机u和无人机i的共视卫星数, 因此双 差测量量分别有(n-1)个和(m-1)个; 上标k表示参考星, $\sigma^p_{user,u}$ 为无人机u上搭载的接收 机关于卫星p的设备误差, 由多路径误差和接收机噪声的标准差给出, 其表达式为:

$$\sigma_{\text{user},u}^{p} = \sqrt{\left(\sigma_{\text{MP}}^{p}\right)^{2} + \left(\sigma_{\text{RN}}^{p}\right)^{2}} \tag{3-34}$$

由此,由多机信息解算的基线协方差估计将被更新为:

- (1) -

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{e}(bu)} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{M},bu} \boldsymbol{C}_{\mathrm{M},bu} \boldsymbol{S}_{\mathrm{M},bu}^{\mathrm{T}}$$
(3-35)

其中, $S_{M,bu} = (G_{bu}^{T}W_{M,bu}G_{bu})^{-1}G_{bu}^{T}W_{M,bu}$ 由公式 (3-22) 给出, $C_{M,bu}$ 由公式 (3-24) 给出。

3.6 UWB/气压计辅助 GNSS 观测量的协同相对导航算法

气压计提供相对高度信息,其融合方式与 UWB 提供相对测距融合的方式类似(如 3.4 节),公式(3-14)改写为:

$$\begin{bmatrix} \rho^{(1)} \\ \rho^{(2)} \\ \vdots \\ \rho^{(N-1)} \\ m_{rb} \\ \Delta H_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{b}^{(1)} \\ \mathbf{1}_{b}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{1}_{b}^{(N-1)} \\ \mathbf{1}_{x} \\ \mathbf{1}_{h} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \varepsilon^{(1)} \\ \varepsilon^{(2)} \\ \vdots \\ \varepsilon^{(N-1)} \\ \omega_{rb} \\ \delta_{rb} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{\Leftrightarrow} \rho_{rb} = A \cdot \mathbf{x} + \varepsilon_{rb}$$
(3-36)

第 16 页 共 40 页



其中, $\mathbf{1}_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 对应提供相对高度信息。 其协方差矩阵以公式(3-18)为基础,加入气压计的误差标准差 σ_{bar} :

$$\boldsymbol{C}_{\rm OB} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{\rm DD} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \sigma_{\rm uwb}^2 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \sigma_{\rm bar}^2 \end{bmatrix}$$
(3-37)

同理,在多机协同部分(3.5节)中,气压计的融合基于公式(3-21):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{bi} \\ \mathbf{e}_{bu} + \mathbf{e}_{ui} \\ \vdots \\ \underline{\mathbf{e}_{bN} + \mathbf{e}_{Ni}} \\ \underline{\mathbf{m}_{bi}} \\ \underline{\Delta H_{bi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3\times3} \\ \mathbf{I}_{3\times3} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{3\times3} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{3\times3} \\ \underline{\mathbf{I}_{3\times3}} \\ \mathbf{I}_{3\times3} \\ \underline{\mathbf{I}_{3\times3}} \\ \underline{\mathbf{I}_{3\times3}}$$

对应的协方差矩阵以公式(3-24)为基础,加入气压计的误差标准差σ_{bar}:

$$\boldsymbol{C}_{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{e(bi)} & & & \\ & \boldsymbol{C}_{e(1u+ui)} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & \boldsymbol{C}_{e(1N+Ni)} & & \\ & & & \boldsymbol{C}_{f(ir)} & \\ & & & & \boldsymbol{\sigma}_{uwb}^{2} \\ & & & & \boldsymbol{\sigma}_{bar}^{2} \end{bmatrix}$$
(3-39)

以上公式(3-36)和(3-39)均通过加权最小二乘法进行解算,加权矩阵为对角线矩阵, 对应协方差矩阵的对角线元素倒数。

3.7 本章小结

本章的主题是基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法设计,主要完成了以下内容:首先,介绍 GNSS 卫星导航概念与基础算法;然后,分别介绍了 GNSS 观测量的 模型、相对测距模型和气压计相对测高模型,即算法的观测量基础;随后,设计了相对测距 辅助 GNSS 伪距双差的无人机编队协同相对导航算法,这也是本文讨论的核心算法,该算 法由本文作者作为合作作者申请发明专利并已于 2020 年 6 月公开,该算法由两部分组成, 第一部分是双机之间利用相对测距辅助 GNSS 相对差分初步估计机间基线,第二部分是在 双机估计基线的基础上进一步通过多机的基线观测和其他观测量进行协同相对导航;最后, 进一步考虑加入其他传感器,如使用气压计来辅助机间相对高度的测量,实现多源信息融 合。



第四章 计算机 MATLAB 平台仿真实验及仿真结果分析

本章建立了基于 MATLAB 的计算机仿真平台,并对算法进行了仿真实验。4.1 节介绍 了 MATLAB 仿真平台的设计与搭建; 4.2 节对仿真实验的条件进行了设置; 4.3 节对算法的 性能进行了评估与分析; 4.4 节对影响算法表现的因素进行了灵敏度分析; 4.5 节为本章小 结。

4.1 仿真平台搭建

本文第三章研究了基于多源信息融合的无人机编队协同导航算法,为此基于 MATLAB 搭建了计算机算法仿真平台。该平台由两部分构成:基于多源信息融合的无人机编队协同导航仿真平台和算法性能评估平台。整个平台的框架如图 4-1 所示。



图 4-1 基于 MATLAB 的多源信息融合多机协同相对导航算法仿真与评估平台框架

该仿真平台的功能为:

- (1) 无人机位置生成与仿真;
- (2) GNSS 伪距观测量数据和 UWB 相对测量数据仿真;
- (3) GNSS 伪距双差相对导航;
- (4) 相对测距辅助 GNSS 差分的双机基线估计;
- (5) 基于多源信息融合的多机协同相对导航;

(6) GNSS 伪距双差相对导航、相对测距辅助 GNSS 差分的双机基线估计、基于多源信息融合的多机协同相对导航的性能对比、验证与评估。

4.2 仿真条件设置

4.2.1 算法仿真基础条件

本文构建了一个基于 MATLAB 的由 5 架无人机组成的编队的相对导航性能评估的仿真 平台。仿真时间为 1000 秒,考虑单频 GNSS 接收机。表 4-1 对三种所仿真对比的算法进行 了描述,用以区分所需测量量以及是否协同。表 4-2 中给出了 GNSS 接收机的非公共测量误 差的标准偏差。本文仿真未考虑多路径(NLOS)的误差,这将作为后续研究工作进行展开。 由 UWB 模块获得的相对测距的标准差σ_{uwb}设置为 0.1m。图 4-2 给出了仿真中所使用的卫 星的天空视图(G-GPS, C-BDS)。此外,选择各星座中仰角最大的卫星作为参考卫星,即 GPS 的 G27 和北斗的 C07 作为参考卫星。

编号	测量量	是否协同?	注释 (算法简写)		
1	伪距	不协同(双机)	DD		
2	伪距、相对测距	不协同(双机)	DD&P2P		
3	伪距、相对测距	协同(多机)	CRN		

表 4-1 仿真算法的比较描述

注:DD(Double Difference)指伪距双差,P2P(Peer-to-Peer)指机间相对测距,CRN(Cooperative Relative Navigation)指协同相对导航。

农于2 中频设计加非公式调量误差的称准调差				
误差源	标准差 (单位:米)			
接收机噪声	0.3			
多路径	0.5			

表 4-2 单频接收机的非公共测量误差的标准偏差 [51]



图 4-2 所用卫星的天空视图

4.2.2 城市环境设置

在无人机编队的东、西两侧竖立围墙(如图 4-3 所示,考虑一个由五架无人机组成的编队,蓝色标记代表无人机,灰色部分代表墙面)以遮挡卫星,图 4-4 为加入遮蔽后高度最低的无人机的卫星天空视图(红色实心点标记代表可视卫星,灰色阴影代表遮蔽范围,黑色空心点标记代表被遮挡的卫星)。无人机以高度从高到低为顺序进行编号。在这种环境下,高度最高的无人机(即无人机1)有着最好的卫星可视条件,而高度最低的无人机(即无人机5)的卫星可视条件最差。具体的各无人机的卫星可视情况如表 4-3 所示。根据可视卫星数,



可以将场景分别定义为开阔环境、中度城市和深度城市^[52]。





图 4-3 城市峡谷示意图

图 4-4 城市峡谷下的卫星天空视图

星座	PRN	UAV1	UAV2	UAV3	UAV4	UAV5
	08			×	×	×
CDC	09			×	×	×
GPS	26					
(\mathbf{G})	27					
	31				×	×
	07					
DDC	09					
BDS	10				×	×
(\mathbf{C})	11					
	16					
可视卫星	星总数	10	10	8	6	6
场景	R R	开阔环境	开阔环境	中度城市	深度城市	深度城市

表 4-3 城市峡谷设定下编队中各无人机可视卫星统计

4.3 性能评估仿真分析

首先,考虑同为双机信息解算基线的两种算法(DD 和 DD&P2P),来评估相对测距对 传统伪距双差的性能提升效果。图 4-5 (a) 表示了无人机 1 到无人机 2 之间(开阔环境)的 基线相对定位误差。直方图显示,与传统的伪距双差相比,加入相对测距辅助可以将误差从 2.22 米降低至 1.70 米,精度提升 23.42%。图 4-5 (b) 表示了无人机 1 到无人机 5 之间(深 度城市环境)的基线相对定位误差,图中可以看出相对测距可以明显提升城市峡谷中 GNSS 相对定位的性能,将原本 14.15 米的大误差降低到 2.58 米,性能提升 81.77%。两种算法的 详细比较如表 4-4 所示。仿真结果表明,总体的 GNSS 相对导航性能会受到城市环境的严重 影响,这是由于城市峡谷中可视卫星数少、可视卫星几何分布差,观测量的精度也随之大大 降低。相对测距的加入可以显著提升传统 GNSS 伪距双差的性能,尤其是在 GNSS 挑战环 境中效果更为明显。





基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航技术



(a) 无人机1和2间基线(开阔环境)
 (b)无人机1和5间基线(深度城市)
 图 4-5 有无相对测距辅助 GNSS 伪距双差的基线定位精度对比图

甘化	÷	精度(米)		坦北店 (火)	
举线	刀凹	DD	DD&P2P	远月恒 (木)	
	Е	0.80	0.66	0.14	17.50%
无人机1-2 开阔环境	Ν	0.65	0.64	0.01	1.54%
	U	1.97	1.40	0.57	28.93%
	3D	2.22	1.70	0.52	23.42%
	Е	7.45	2.42	5.03	67.52%
无人机1-5 深度城市	N	2.28	0.81	1.47	64.47%
	U	11.81	0.41	11.4	96.53%
	3D	14.15	2.58	11.57	81.77%

表 4-4 相对定位性能对比

其次,考虑多机是否协同对无人机编队内相对定位的影响,对比两种算法(DD&P2P和CRN),其中协同相对导航算法(CRN)是在相对测距辅助双差的双机基线估计(DD&P2P)的基础上进行的。图 4-6 (a) 表示了无人机 1 到无人机 2 之间(开阔环境)的基线相对定位误差。与仅利用双机信息进行传感器信息融合相比,多机协同可以将误差从 1.70 米进一步降低至 1.02 米,精度再提升 40.00%。图 4-6 (b) 表示了无人机 1 到无人机 5 之间(深度城市环境)的基线相对定位误差,显示多机协同将 2.58 米的误差降低至 1.76 米,性能提升 31.78%。两种算法的详细比较如表 4-5 所示。仿真结果表明,多机信息协同可以有效提升无人机编队的相对导航性能。因此,在无人机编队的相对导航中采取协同导航是有其必要性的,并且在城市环境中更加需要多机协同来进一步提升精度。







(a) 无人机1和2间基线(开阔环境)
 (b) 无人机1和5间基线(深度城市)
 图 4-6 有有无采取多机协同的基线定位精度对比图

其供	宝向	精度(米)		_ 担升估(米)	担升比例(04)
蚕线 八	刀凹	DD&P2P	CRN	远, 但 (木)	
	Е	0.66	0.55	0.11	6.67%
无人机1-2	Ν	0.64	0.59	0.05	7.81%
开阔环境	U	1.43	0.62	0.81	56.64%
	3D	1.70	1.02	0.68	40.00%
	Е	2.42	1.56	0.86	35.54%
无人机1-5	Ν	0.80	0.74	0.06	7.50%
深度城市	U	0.40	0.38	0.02	5.00%
	3D	2.58	1.76	0.82	31.78%

表 4-5 相对定位性能对比

另外,图 4-7 通过累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)的形式提供了 三种算法的直观对比。累积分布函数用以表示一个随机变量 X 小于等于某个特定值 x 的概 率。图中可以看出,应用相对测距可以有效改善传统伪距双差的定位精度,尤其在 U 方向 效果最为显著,E 和 N 方向其次。另外,多机协同可以在双机多源信息的融合上进一步提升 相对定位的性能。



(a) E(东)方向

(b) N(北)方向

第 22 页 共 40 页





(c) U(天)方向
 (d) 3D(整体)方向
 图 4-7 三种算法的累积分布函数对比图

总结以上仿真结果,城市应用下的无人机编队有必要采用协同相对导航技术来提升机间 相对定位性能。结果表明机间测距可以初步提升传统的 GNSS 伪距双差定位,多机信息协同 可以进一步降低相对定位的误差。特别地,当环境条件越差时,多源信息融合的辅助效果越 显著。

为了验证本文的协方差模型的可用性,以下进行了协方差根值与统计标准差值的对比。 统计值与估计值的对比如图 4-8 所示,其中(a)代表中度城市环境,(b)代表深度城市环境。对 比结果表明,所提出的算法及其协方差模型可以用以估计基线,同时也证明了协方差模型的 适用性。



4.4 灵敏度分析

从以上仿真实验可以看出,虽然应用多源信息和协同多机对整体的提升效果很显著,但 是反映在 ENU 三个方向上的效果却各不相同,考虑原因是受到了编队几何分布的影响,为 进一步究其原因,进行了对影响性能的因素的灵敏度分析。灵敏度分析中除了无人机几何分 布以外,还另外考虑了相对测距模块精度的影响和无人机编队规模的影响。

在进行灵敏度分析前,根据原先的仿真结果和其他的一些仿真测试以及对算法的理论理解,可以推测:

(1) 如果两架无人机在某个方向上绝对位置存在较大差距,则算法在这一方向上的提升也会比较明显;

(2) 从融合方程角度来看,相对测距的加入其实是提高了冗余度,因此相对测距越精准,



算法的提升效果越好;

(3) 同理,无人机数量越多,则可协同的信息越多,协同的提升效果也会越好。

为研究无人机几何分布、无人机编队规模、相对测距模块精度对算法性能的影响,考虑 了 16 种仿真场景(如表 4-6 所示)。对每一种场景,通过蒙特卡洛模拟来生成 1000 个随机 场景,用以统计误差标准差。尽管 16 种场景中编队几何分布或者编队规模有所不同,但编 队中高度最高的无人机位置做了统一处理,即当地 ENU 坐标系原点统一。无人机编队的规 模即无人机的数量。无人机几何分布可以分别在 ENU 三个方向区分(对应场景 1、2、3, 如图 4-9 所示),保持两个方向上坐标不变,只改变一个方向的坐标。

场景编号	无人机数量	编队几何分布	UWB精度(米)	城市环境			
1		Е					
2	5	Ν	0.1	×			
3		U					
4			0.01				
5			0.05				
6			0.1				
7	5	T	0.5				
8	5	U	1.0	X			
9			2.0				
10			2.5				
11			3.0				
12	3						
13	5						
14	7	All	0.1				
15	10						
16	15						
14		14	14				
10	••••	10	10				
(E) 8		8 (III)	(iii) 8.	- N			
Heigh		Heio	6 Bigh				
2		2.	2				
0		0	0				
1:5 (1) -100	5 10	N'S (13) -5 4 -2 0	2 4 Nis 10 0 -104	-2 0 2 4			
(W-E(m) (a) 场景1	(b) 场景 2	(m) (c)	W-E(m) 场景 3			
	图 4-9 无人机编队几何分布示意图						

表 4-6. 不同场景的仿真条件

第 24 页 共 40 页



无人机编队几何分布对各方向的影响如图 4-10 所示,图 4-10 (a)中可以看出各场景下应用相对测距和多机协同在 E 方向上均有提升效果,但是对于场景 1 (编队在 E 方向位置区分)提升效果会更加显著,在 N、U 方向(图 4-10 (b)、图 4-10 (c))也有相同的规律。另外,不论是哪种几何分布,U 方向的提升敏感度都是最高的,E 方向其次,N 方向最不敏感。但是从初始精度角度考虑,N 方向的定位精度是最优的,因此提升效果相比初始精度较差的 U 方向会不显著。图 4-10 (d)显示整体的方向向量上,提升效果是一致的,几何分布的影响较小。因此无人机编队几何分布会对某一特定方向的定位精度产生较大影响。



 (a) E(东)方向
 (b) N(北)方向
 (c) U(天)方向
 (d) 3D(整体)方向

 图 4-10 无人机编队几何分布影响

相对测距模块的精度对算法结果的影响如图 4-10 所示,随着相对测距精度的下降,相 对测距辅助的算法得到的定位误差也随之增大,当相对测距精度差到一定程度(误差大于伪 距双差定位误差),相对测距信息将不能提供正面效果。如图 4-11 所示,当相对测距模块定 位精度达到 0.1 米甚至更高精度时,双机间相对测距辅助 GNSS 的基线估计可以相较于传统 双差提升 26%左右,而在此基础上的多机协同可以相较于传统双差提升 50%左右;当相对 测距模块定位精度为1 米时,分别可以提升约 25%和 40%,效果虽然相较于之前稍差一些, 但依旧可以提供较好的提升效果;当相对测距模块定位精度为2 米时,分别可以提升约 10% 和 17%,提升效果较弱;随着相对测距模块精度的继续下降,两者的效果区分逐渐趋近于 零,并且会降低原先的定位精度。通常情况下,UWB 模块可以提供 0.1 米的测距精度,因 此 1 米以上的误差可以被看作为错误数据,当误差较大的测距信息融合进方程时会提供反 面影响,因此这部分可以作为以后的故障探测与排除算法继续研究。







图 4-12 提升效果-相对测距模块精度关系图



无人机编队的规模对协同相对导航算法的影响和提升效果如图 4-13 和图 4-14 所示,随 着无人机规模的增大,即融合的信息增加,冗余度增加,多机协同的相对导航性能会表现更 优。



4.5 本章小结

本章为本文设计的算法搭建了基于 MATLAB 的计算机仿真平台,并进行了仿真实验评 估算法性能以及灵敏度分析来讨论影响算法定位性能的因素。仿真结果表明,相对测距可以 有效提升传统伪距双差的定位精度,尤其是在 GNSS 定位性能差的城市环境中,多传感器的 融合可以显著改善 GNSS 相对定位,而在无人机编队中,基于多源信息融合的协同算法可以 进一步优化仅利用双机信息的相对定位结果。灵敏度分析给出了无人机编队中几何分布、相 对测距模块精度、和无人机数量对本文算法性能产生的影响,进一步验证了本文所提出的算 法的性能效果。



第五章 无人机测试平台设计与实现

本章为本文的无人机测试平台的设计与实现部分。本章主要内容包括: 5.1 节介绍无人 机测试平台的设计与搭建; 5.2 节介绍基于无人机的测试平台的实现; 最后 5.3 节给出本章 的小结。

5.1 无人机测试平台的设计与搭建

利用 MATLAB 进行计算机仿真是一种便捷的算法验证方式,但由于计算机仿真环境与 真实环境会存在较大的差异,比如理想的标准差不能直接代替信号环境中多路径影响和非直 视信号的真实效果。因此本文搭建了一种基于无人机的算法测试平台。表 5-1 给出了该无人 机测试平台的功能,搭建完成的无人机平台如图 5-1 所示。

表 5-1 无人机测试平台功能清单			
功能	说明		
GNSS 仰角方位角采集	采集可见卫星视角信息		
RTK 位置基准	使用 RTK 高精度位置作为飞行平台参考位置		
伪距、中频、卫星位置采集	采集原始测量信息		
UWB 测量数据采集	采集 UWB 相对距离原始测量量		



图 5-1 无人机平台图示

 上海交通大学 SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航技术

该无人机平台的具体硬件(和软件)的构成如表 5-2 所示。 表 5-2 无人机测试平台硬件(软件)构成

硬件(软件)	功能	参数	
大疆 ZD680 平台	飞行平台	四旋翼, 自重 2.1kg, 最大载重	
(自组装)		3kg, 续航 30 分钟	
格氏电池	为飞行平台供电	16000mah, 6S	
大磚 N2 飞坊	无人机飞行控制系统,含	遥控飞行、智能飞行、智能返航、	
	GPS、IMU、飞控单元等	危险告警等	
大疆 Assistant 2	地面站,调参,	版木号,125 Windows 平台	
调参软件	监控和控制无人机飞行	1024 3 : 1.2.3, windows 1	
乐迪遥控器	无人机操纵	支持 SBUS 信号,支持旋翼	
Ublay FOD 接收机	CNSS 导航粉捉和盾始粉捉输出	支持 GPS、Galileo、GPS、BDS	
UDIOX I'PF J& YX 1/1	01135 寸加致近初初次知致近相口	多星座多频点信号	
GNSS 天线	接收卫星导航信号	品牌为中海达,支持多星座双频段	
	政权工生,所用了	卫星导航信号	
RTK 网络服务	提供高精度定位信息	千寻位置提供	
树莓派 3B plus	机载计算及数据存储单元	64 位,1.4GHz 四核,支持 WiFi	
分电板	为机载电脑供电	1入4出	
4G 无线路由器	远程连接树莓派	品牌为华为,支持 4G,150Mbps	
VD COC	空顶 扣 问语信	室内通信距离 60 米,室外通信距	
XBee S2C	头现机间通信	离 1200 米,2.4GHz 频带	
无线数传模块	空地数据链路,下传计算数据	433MHz,1km有效传输距离	
		蓝点无限科技设计,工作频率	
UWB DWM1000	提供相对测距信息	3~4Hz,最高工作频率40Hz,测距	
		精度 5cm,理想通信距离 50 米	

该平台由多个系统组成,各子系统之间的关系为: 大疆 ZD680 作为飞行平台,其上搭 载了 DJIN3 飞控、GNSS 接收机、机载计算电脑(树莓派 3B plus)、4G 无线路由器、UWB 模块、数传模块(天空端)等。该平台可以从"数据流"、"控制流"和"能量流"进行讨论。 "数据流"的工作原理为: 通过 Zigbee 实现机间通信,通过 GNSS 接收机获取数据后,输 入到机载的树莓派 3B plus,通过数传模块(天空端)将结果发送至地面,地面通过数传模 块(地面端)接收到数据后,输入到本文作者所制作的地面站编队演示系统(如图 5-2 所示) 中并将数据可视化,具体为可以显示无人机的二维轨迹、高度-时间曲线、二维相对坐标的 显示以及飞行器之间相对距离,用户可以通过此地面站软件来监视空中软件运行状态。"控 制流"的工作原理为:所制作的地面站编队演示系统不仅可以用来监视无人机编队中各无人 机的飞行状态,还可以用来控制无人机飞行,包含起飞、飞特定轨迹(圆形)、返航和降落, 或者也可以由遥控器手动控制无人机飞行。"能量流"的工作原理为:使用格氏电池为无人 机供电,通过分电板和降压器为树莓派供电。





图 5-2 无人机编队演示系统(地面站)示意图

5.2 无人机测试平台的实现

本实验系统共包含三架无人机(如图 5-3)和两个车载接收机(如图 5-4),其中两架无 人机分别由本文作者和同实验室的刘西雨同学独立组装,无人机平台(搭载如表 5-2 所示的 硬件、软件)由本文作者和刘西雨同学在王士壮硕士和池澄博士的协助下共同完成。两个车 载接收机用以扩展本次实验无人机编队规模,即由三架扩展至五架。



图 5-3 实验使用的三架无人机图



5-4 实验所用车载接收机示意图

基于此平台,在上海交通大学闵行校区文治大道电院大草坪(121.44019E,31.02649N)的开阔环境下开展飞行试验。图 5-5 为飞行实验记录。







(a) 无人机编队飞行



(b)完整编队实验

图 5-5 飞行实验记录

本次有效的实验数据采用的整个飞行时间约 10 分钟。本次飞行测试验证了此平台的飞行功能和数据采集功能,飞行测试采集了 RTK 定位数据、GNSS 伪距观测量、卫星星历(提供卫星位置以及卫星可见情况)等数据。算法作为后处理进行。

首先采用伪距双差进行相对定位测试数据(如图 5-6 所示),将伪距双差的相对定位解 与 RTK 相对定位做对比,由于 RTK 为高精度定位,故可将其作为真值进行参考。结果显 示,整体的数据可靠性较高,其中有小部分时间段 RTK 定位出现波动,同时伪距差分定位也 出现很大偏离,此种数据为不可用的大误差,是受到了严重的多路径的影响,故后续排除了 不可靠的数据区间,取 150 秒至 550 秒区间进行数据处理。



图 5-6 伪距双差相对定位与 RTK 相对定位对比图

随后,使用 UWB 数据对 GNSS 进行辅助,得到的相对定位如图 5-7 所示,将其与伪距 双差定位和 RTK 相对定位(真值)进行对比,可以看出加入 UWB 相对测距有效降低了定 位解和真值之间的偏差,在 GNSS 伪距双差定位结果偏差较大的 N 和 U 方向(图 5-7(a)、(b)),UWB 相对测距的辅助效果更为显著。







进一步,考虑多无人机的协同作用对相对定位精度的提升效果。如图 5-7 所示,利用相 对测距辅助 GNSS 伪距差分所估计到的基线与 RTK 定位解在散点图上不易区分,相对定位 散点图的形式已不适用于直观对比算法效果,故此处采用对相对定位误差的均方根值进行 直方图的对比讨论,如图 5-8 (a)所示。对比结果显示,协同多机信息进行进一步的相对定 位,将相对定位误差从 1.24 米降低至 1.01 米,性能提升 18.55%,其中 E、N 方向的定位精 度均达到 0.5 米以下。另外,根据数据结果进行了累积分布函数图分析,如图 5-8 (b)所示,



第 31 页 共 40 页





无人机平台飞行实验通过真实数据验证了本算法,并且反映了本协同相对导航算法对 无人机编队相对导航性能的有效提升。

本实验存在的不足有以下几点:1)算法是后处理而非实时性处理;2)实验的调试时间 较长,而无人机的续航时间有限,故采集到的数据不足,RTK 定位在部分时间段出现不可 靠数据点;3)实际数据的处理难度高于仿真实验,存在真实的多径环境,会带来较大的误 差。未来工作中将从以下几点对无人机平台实验进行改进:1)编写实时性处理代码及对应 的地面站可视化;2)增加可融合的传感器;3)优化算法代码的处理。

5.3 本章小结

本章为基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法搭建了无人机测试平台,进行了飞行测试,通过飞行试验的真实数据验证了本算法的可用性。该平台后续也可以用于算法拓展的测试,可拓展视觉传感器、IMU 等其他传感器,同时也适用于未来工作中研究的故障检测和排除算法的验证测试。



第六章 结论与展望

6.1 本文主要工作与创新点

精确可靠的相对导航信息是无人机编队准确执行密集集群控制的关键要素,尤其是在 GNSS 导航性能不足的复杂环境,相对导航是无人机编队的关注的重点问题。研究高效、低 成本的无人机编队相对导航算法对于提升无人机编队的安全性、经济性和工作效率具有重 要的意义。

本文研究了基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法,主要完成的工作内容 有:

(1) 研究了双机之间的多源信息融合(GNSS 伪距相对差分和 UWB 相对测距)的相对导航算法;(3.4 节)

(2) 在双机基线估计的基础上,研究了综合多机信息的协同相对导航算法,并推导了对应的协方差估计模型;(3.5节、3.6节)

(3) 搭建基于 MATLAB 的计算机仿真平台,进行了(3)和(4)中所述的算法的仿真验证 与评估,并进行了无人机编队中对算法性能产生影响的因素的灵敏度分析;(第四章)

(4) 搭建基于无人机的算法测试平台,进行了实际数据测试。(第五章)

本文的重点集中于基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法设计、基于 MATLAB 的算法仿真平台与基于无人机的测试平台上。本文的研究涵盖理论研究、算法设 计、测试实验三部分。

本文的算法设计和测试技术研究具有创新性,主要的创新点包括:

(1) 针对无人机编队的相对导航问题,提出了基于多源信息融合的多机协同相对导航 算法,改进了传统的协同导航算法和相对导航算法,实现了两者的结合统一;

(2) 搭建计算机仿真平台和无人机测试平台,仿真与实验的结果表明,该算法有效提高 了无人机编队的相对导航性能,尤其在复杂城市环境中的改善效果显著,对无人机编队的相 对导航性能保障和城市环境应用拓展具有重要意义。

本文的研究具有重要的工程意义和学术意义,具体而言,包括:

(1) 工程上,研究基于多源信息的无人机编队协同相对导航技术,有助于复杂环境应用 的无人机编队摆脱传感器搭载的限制,提高传感器的信息利用率,降低运行成本,具有显著 的经济意义;有助于增强城市环境中无人机编队的安全性,从而进一步拓展无人机编队在城 市环境的应用,同时有利于推进算法发展,缩短算法应用于产品的研究周期。

(2) 学术上,研究基于多源信息的无人机编队协同相对导航技术,有助于弥补当前相关研究的不足,从而在复杂环境下提供准确和可靠的相对导航信息,更好地满足无人机编队的基础性需求,增强导航系统在复杂环境下的鲁棒性,提高系统的安全性,有利于推进协同相对导航技术的研究内容。

6.2 未来研究展望

本文研究了基于多源信息融合的无人机编队协同相对导航算法,并搭建了基于 MATLAB的仿真平台和仿真实验,以及基于无人机的测试平台。在本文研究的基础上,后 续可以进行以下研究与工作:

第 33 页 共 40 页



(1) 在基于 MATLAB 的计算机仿真中引入更真实的多路径误差模型,并加入 NLOS 信 号影响,使城市环境的仿真更具有真实性和典型性;

(2) 由于引入大误差后将有可能出现导航信息错误等问题,因此需要设计一种无人机 编队协同的故障检测和排除算法;

(3) 除目前使用的传感器以外,加入其他传感器,如 IMU 和视觉等,进行多源信息融合;

(4) 优化基于 MATLAB 的仿真平台的实现代码,降低复杂度,以进行更大规模的无人 机编队仿真实验;

(5) 优化无人机测试平台,优化后处理算法,并加入实时性处理算法。

(6) 优化多源信息融合方式,研究扩展卡尔曼滤波在本算法的应用。



参考文献

- [1] 杜君南,王融,熊智,等.基于相对距离差模型的集群飞行器协同导航方法研究[C].//中国卫 星导航学术年会组委会.第十届中国卫星导航学术年会论文集.2019:1-5.
- [2] Chen Ansheng, Li Jianli, Chu Zhongyi. Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter[C]//8th International Symposium on Instrumentation and Control Technology, 2012: 178–182.
- [3] 蔡熙,刘松林,许承东.城市峡谷环境下 GNSS 卫星可见性快速预测方法[J].北京理工大学 学报,2017,37(06):595-601.
- [4] Wang L, Groves P D, Ziebart M K. Multi-Constellation GNSS Performance Evaluation for Urban Canyons Using Large Virtual Reality City Models[J]. Journal of Navigation, 2012, 65(3): 459-475
- [5] Groves P D, Jiang Z, Rudi M, et al. A portfolio approach to NLOS and multipath mitigation in dense urban areas[C]// Proceedings of ION GNSS. Nashville, TN, USA, 2013: 3231–3247.
- [6] J. Xiong, J. W. Cheong, Z. Xiong, A. G. Dempster, S. Tian and R. Wang, "Integrity for Multi-Sensor Cooperative Positioning," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. doi: 10.1109/TITS.2019.2956936
- [7] Space Use of GNSS-Based Positioning for Road Intelligent Transport Systems (ITS): BS 16803-1-2016 [S]. Britain: BSI, 2016.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO). Aeronautical telecommunications in annex10 to the convention on international civil aviation international standards and recommended practices (SARPs)[S]. Montreal: ICAO,2007: 3-67.
- [9] N. Zhu, J. Marais, D. Bétaille and M. Berbineau. GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(9):2762-2778.
- [10] Hermann Haken. Synergetics[M]. Springer, 1983.
- [11] 徐博,白金磊,郝燕玲,高伟,刘亚龙.多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展[J].自动化学 报,2015,41(03):445-461.
- [12] 李倩. 无人机编队飞行控制器关键技术的研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [13] 许晓伟,赖际舟,吕品,樊刘仡.多无人机协同导航技术研究现状及进展[J].导航定位与授时,2017,4(04):1-9.
- [14] 谢启龙,宋龙,鲁浩,周本川.协同导航技术研究综述[J].航空兵器,2019,26(04):23-30.
- [15] 曲法义,王小刚,崔乃刚,王常虹.基于惯导/GPS/视觉的无人机容错相对导航方法[J].中国 惯性技术学报,2013,21(06):781-785+821.
- [16] 王念曾,李荣冰,韩志凤,邱望彦,王智奇.基于惯性/GNSS/UWB 的小型无人机相对导航算 法研究[J].电子测量技术,2019,42(16):94-100.
- [17] Wang X G, Cui N G, Guo J F. INS/VisNav/GPS relative navigation system for UAV[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 28(1): 242-248.
- [18] 熊骏,熊智,于永军,许建新,王云舒.超宽带测距辅助的无人机近距离相对导航方法[J].中国惯性技术学报,2018,26(03):346-351.
- [19] 刘晓洋,李瑞涛,徐胜红.基于测距/测速信息的无人机协同导航算法研究[J].战术导弹技术,2019(02):73-77+112.



- [20] 袁杰波,杨峰,张共愿,梁彦.无人机编队飞行导航方法及其仿真研究[J].计算机仿 真,2011,28(11):64-67.
- [21] H. Wymeersch, J. Lien, and M. Z. Win. Cooperative localization in wireless networks[J]. IEEE, 2009, 97(2):427-450.
- [22] Sivaneri V O, Gross J N. UGV-to-UAV cooperative ranging for robust navigation in GNSSchallenged environments[J]. Aerospace science and technology, 2017, 71(dec.):245-255.
- [23] Sivaneri V O, Gross J N. Flight-testing of a cooperative UGV-to-UAV strategy for improved positioning in challenging GNSS environments[J]. Aerospace Science and Technology, 2018.
- [24] Zhou D, Zhang H. Pan Q. et al. An improved range parameterized square root cubature information filter algorithm for multi-UAV cooperative passive location[C]//IEEE International Conference on Information and Automation IEEE, 2015:1079-1084,
- [25] Suarez A, Heredia G, Ollero A. Cooperative sensor fault recovery in multi-UAV systems[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE, 2016:1188-1193
- [26] 方洋旺,欧阳楚月,符文星,程昊宇.无人机编队避障与控制技术研究现状及发展趋势[J].无 人系统技术,2019,2(02):32-38.
- [27] Ansheng C , Jianli L , Zhongyi C . Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter[C]// IEEE International Symposium on Instrumentation & Control Technology. IEEE, 2012.
- [28] Vetrella,, Fasano, Accardo. Differential GNSS and Vision-Based Tracking to Improve Navigation Performance in Cooperative Multi-UAV Systems[J]. Sensors, 2016, 16(12).
- [29] 唐大全,邓伟栋,柳向阳.无人机编队构建所面临的关键技术分析[J].自动化与仪器仪表,2019(08):85-90.
- [30] 刘晓洋,徐胜红.无人机编队分层式协同导航仿真研究[J].计算机仿真,2019,36(10):44-48.
- [31] Zhang Y , Mehrjerdi H . A survey on multiple unmanned vehicles formation control and coordination: Normal and fault situations[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. IEEE, 2013.
- [32] Tancredi U, Renga A, Grassi M. Carrier-based differential GPS for autonomous relative navigation in LEO[R].AIAA paper 2012-4707.
- [33] Felter S C, Wu N E. A relative navigation system for formation flight[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(3): 958-967.
- [34] Fourie D, Tweddle B, Ulrich S, et al. Vision-based relative navigation and control for autonomous spacecraft inspection of an unknown object[R]. AIAA paper 2013- 4759.
- [35] Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multirobot localization[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 2002, 18(5):781-795.
- [36] Mourikis A I , Roumeliotis S I . Performance Analysis of Multirobot Cooperative Localization[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(4):p.666-681.
- [37] Lu J, Xu D, Zhang F, et al. Research on cooperative navigation for multiple UUVs[C]// 2012 International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). IEEE, 2012.
- [38] Causa F, Vetrella A R, Fasano G, et al. Multi-UAV formation geometries for cooperative navigation in GNSS-challenging environments[C]// IEEE/ION Position, Location & Navigation Symposium. IEEE, 2018.
- [39] Vetrella A R , Fasano G , Renga A , et al. Cooperative UAV navigation based on distributed multi-antenna GNSS, vision, and MEMS sensors[C]// International Conference on Unmanned



Aircraft Systems. IEEE, 2015.

- [40] Gross J N, Gu Y, Rhudy M B. Robust UAV relative navigation with DGPS, INS, and peer-topeer radio ranging[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2015, 12(3): 935-944.
- [41] Nguyen T M , Zaini A H , Wang C , et al. Robust Target-Relative Localization with Ultra-Wideband Ranging and Communication[C]// International Conference on Robotics & Automation. 2018.
- [42] Kwasniak D L. Single Point Positioning Using GPS, Galileo and BeiDou System[C]// Baltic Geodetic Congress. 2018.
- [43] Wu J , Tang X , Ni S , et al. The effect of GNSS receiver clock biase on double differenced carrier phase measurement[C]// 2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). 2016.
- [44] Kaplan Elliott, Christopher Hegarty. Understand GPS/GNSS: Principles and Applications [M]. Third Edition, Artech House, 2017.
- [45] Salos D, Macabiau C, Martineau A, et al. Nominal GNSS Pseudorange Measurement Model for Vehicular Urban Applications[C]// Position Location & Navigation Symposium. IEEE, 2010.
- [46] Blanch J , Walker T , Enge P , et al. Baseline advanced RAIM user algorithm and possible improvements[J]. Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on, 2015, 51(1):713-732.
- [47] 邓世燕, 郭承军. 智慧城市建设中的室内定位现状与发展趋势分析[C]// 第十一届中国 卫星导航年会论文集——S02 导航与位置服务. 2020.
- [48] 刘歌群.利用 GPS 校准、带温度补偿的无人机气压高度测量[C].中国仪器仪表学 会.2004 全国测控、计量与仪器仪表学术年会论文集(下册).中国仪器仪表学会:中国仪 器仪表学会,2004:542-546.
- [49] 茹滨超, 鲜斌, 宋英麟,等. 基于气压传感器的无人机高度测量系统[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013(S2):94-97.
- [50] 杜晓辉, 裴军, 张丽荣,等. 基于地面移动通信基站的差分气压测高方法[J]. 北京航空航 天大学学报, 2013, 039(001):83-88.
- [51] Charles Jeffrey. An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems[M]. Second Edition, NovAtel Inc., 2015.
- [52] Hsu L T, Tokura H, Kubo N, et al. Multiple faulty GNSS measurement exclusion based on consistency check in urban canyons[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1909-1917.



谢辞

时光荏苒,大学本科四年转眼就要结束。从2016年9月刚踏入大学校园开始, 我总觉得毕业很遥远,但当我完成这篇文章时才意识到,我真的要结束大学本科生活了。本 科这四年的学习生活,我收获颇丰,真正地从一个高中生成长为一个大学生,并准备好成为 一名硕士研究生继续我的求学之路。这四年,我由衷地感激遇到的每一个人。

首先,非常感谢我的导师战兴群教授。感谢战老师在我表达读研意向后对我的接受,并 且一直鼓励我研究导航领域,为我未来的学业提出了规划与引导。进入导航实验室即将满一 年,期间在战老师的悉心栽培下,我的学术科研能力得到了很大的提升,在文献研读、学术 写作、动手实践等方面都有所进步。在战老师的指导和鼓励下,我第一次参与科研项目,第 一次自主搭建无人机,第一次操控无人机,第一次申请专利,第一次撰写自己的学术论文。 战老师也是一位和蔼可亲的师长,总是亲切并耐心地与我交流,为我指引方向。感激之情无 以言表。

感谢导航实验室的张炎华教授。张老师虽然已年过耄耋,但始终坚持在科研路上,令人 敬仰,对实验室的同学们也非常关照,在学术和人生上给予我们宝贵的建议。感谢张欣老师, 张老师每一次的报告讲解都体现了极强的专业性和国际化,对我们有许多的引导价值。感谢 翟亚慰老师,我的毕设与其他科研项目都得到了翟老师的悉心指导。感谢杨溶老师,杨老师 生活和学业上对我们给予关怀与鼓励。感谢汪建老师在科研事务上所提供的支持和帮助。

感谢王士壮师兄在科研过程中对我的大力指导与帮助,认真地回答我各种学术和学业问题。感谢池澄师兄在代码和技术方面的指导。感谢实验室潘伟川老师、涂家训师兄、郑凌 霄师姐、陈懋霖师兄、刘金玉师兄、袁文翰师兄、林魁师兄、张鹏宇师兄、陈元康师兄、吴 桐师兄、常琎师兄、刘婳婳师姐、刘小丫师姐、黄冀鸿师兄、宋欣师姐、付苑文师兄,感谢 大家对我的关照和支持。我衷心祝愿我们导航实验室的各位师兄师姐学业顺利,科研成功, 前程似锦!

感谢四年来陪伴我们的班主任徐武老师,党委副书记葛阳老师,学工办李灿老师、汪璟 琳老师、杲光伟老师,教务办周艳平老师,感谢各位老师在本科四年期间对我的支持与帮助。 感谢四年来传授我们专业课程知识的陈方老师、吴树范老师、余文胜老师、王福新老师、宋 文斌老师、张博老师、周翔老师、李伟鹏老师、李启夫老师、黄丹老师、于哲峰老师、余音 老师、滕金芳老师、羌晓青老师、杨永胜老师、龚德仁老师、程用胜老师、傅山老师、吴俊 琦老师等,感谢各位老师的辛勤付出。衷心祝愿学院越办越好!

感谢毕业设计信控组答辩委员会的邵晓巍老师、陆蓓老师、李元祥老师、庹红娅老师等, 感谢各位老师对我毕业设计过程中提出的宝贵建议,帮助我改进我的毕设工作。

感谢 F1641301 班级的各位同学们,大学四年来我们一起学习一起进步一起奋战课程大作业。感谢团支书谢名云同学的积极带领,感谢班长田沛东同学组织班级活动以及曾经担任过班长的王志波同学和王林东同学的付出,感谢生活委员梁耕同学四年来为我们带来的各种学校福利。祝愿同学们未来学业和工作顺顺利利,前程似锦!

感谢 X14-406 宿舍的刘西雨、戚玉倩、武霞三位仙女,我们是大一刚进入学院的班里仅 有的四个女生,感谢四年的互相照顾与陪伴,营造了一个和谐的寝室氛围,还有大二加入我 们的刘小鸟同学,接下来我们五个女生都将继续在学院进行研究生阶段的学习,希望我们继 续相互扶持一路走下去,越来越好!

第 38 页 共 40 页





感谢上海交通大学传授我基础课知识的邵国年老师、卢文发老师、李四平老师等以及传 授我通识课程知识的曹慧老师、汪国琴老师、陈霆老师等,感谢各位老师细致的讲解和引领。 感谢李昊勇同学一路的陪伴与照顾。

最后我要感谢父母22年来对我的悉心照顾和培养,感谢你们对我一直以来对我的鼓励, 从不给我压力,一直是我的港湾,感谢你们对我的牵挂和照顾,爸爸妈妈你们辛苦了!

大学四年转眼就要结束,但我的求学之路还在继续。上海交大对我四年的影响是潜移默 化的,"选择交大就是选择了责任",我为自己是上海交通大学学子而感到骄傲。未来我也将 更加努力学习,去实现自己的理想,走好自己的道路。

> 沈佳雯 2020年5月,于上海



作者在学期间取得的学术成果

本科期间已发表或录用的论文和专利

[1] 王士壮,战兴群,翟亚慰,池澄,**沈佳雯**. Highly reliable relative navigation for multi-UAV formation flight in urban environments [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020. (SCI 英文期 刊,于4月录用,已发表)

[2] 战兴群,王士壮,刘西雨,**沈佳雯**,翟亚慰.基于虚拟质心的多 GNSS 接收机协同导航 方法[P].(发明专利,已于 6 月公开)

[3] 战兴群,王士壮,**沈佳雯**,刘西雨,翟亚慰.基于 GNSS 观测量和机间测距的多无人机 协同相对导航方法[P].(发明专利,已于 6 月公开)

本科期间参与的科研项目

[1] 2019 年 7 月~2020 年 7 月,上海交通大学海外一流大学学术交流基金(2019 年上海交通大学-多伦多大学),无项目编号。



ABSTRACT

In recent years, multiple Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems have attracted extensive attention for their potential values both in military and civilian use. High accurate relative navigation information is a prerequisite to achieve multi-UAV formation flight. In open-sky areas, high-precision relative position is commonly assessed by Global Satellite Navigation System (GNSS) receivers. However, the overall relative navigation performance will be heavily degraded in urban environments. This is because the receivers encounter serious signal blockage, multipath interference, and NLOS reception owing to the presence of tall buildings. On the other hand, due to the limitations of cost, load, endurance and size, a UAV cannot be equipped with too many high precise sensors at the same time. The problems above bring great challenges to the relative navigation of multi-UAV systems in urban environments.

Accordingly, cooperative navigation is developed. It is a navigation technology that utilizes information communication from multiple vehicles. It can effectively solve the aforementioned problems by means of increasing the information redundancy and enhancing the robustness of the navigation system. Vehicle-to-Vehicle (V2V) connectivity allows vehicles to relay their information to each other with low latency by Bluetooth, ZigBee or even 5G technology. Data fusion combines the multiple sources of information including local observations from GNSS receivers and sensors.

The concept of cooperative navigation was firstly proposed in the field of multi-robot systems, and it has been recently extended to UAV with a great deal of strategies emerging. Nevertheless, most related researches put emphasis on the navigation and control of some specific vehicles rather than relative navigation in multi-UAV systems. From the perspective of relative navigation, information fusion has been a promising approach to improve the performance of GNSS. The sensors used for fusion includes Vision-Based Navigation System (VisNav), Peer-to-Peer (P2P) ranging radios, low-cost Inertial Measurement Unit (IMU), Ultra-Wide Band (UWB) and so on. However, these researches focused on a formation of two UAVs rather than a multi-UAV system. Therefore, to the best of our knowledge, a systematic understanding of how cooperating the information from multiple UAVs contributes to relative navigation is still lacking.

To bridge the gap, this paper proposes a cooperative relative navigation algorithm for multi-UAV systems by information fusion of different sensors and relative observations among UAVs. To be specific, the proposed algorithm firstly combines data from different sensors to estimate baselines between two UAVs, then cooperates information such as relative observations from multiple UAVs. Therefore, this paper takes the advantages of both cooperative navigation and relative navigation.

The paper is composed of three parts: theoretical study, algorithm design and testing technology. It is organized as follows: Chapter 1 is the introductory chapter, which briefs the research background, the research status, the research content, the related industry standards to follow, and the significance of the work; Chapter 2 is the chapter of theoretical study which reviews the cooperative relative navigation technology, including concepts, navigation performance requirements, and the gap in cooperative navigation and relative navigation; Chapter 3 proposes a



cooperative relative navigation based on information fusion of different sensors and relative observations among multiple UAVs, with some related measurement models introduced; Chapter 4 builds a MATLAB-based simulation platforms for the proposed algorithm, and conducts simulations and sensitivity analysis to evaluate and validate the algorithm; Chapter 5 builds the UAV-based flight platform and conduct flight tests. Chapter 6 concludes the paper, draws the conclusions and presents some perspectives for future work.

The significance of the study in this paper covers both academic and practical aspects:

(1) Academically, the study of cooperative relative navigation technology for UAV formations based on information fusion and relative observations can help to make up for the shortcomings of current research. It can provide accurate and reliable relative navigation information in complex environments so as to meet the basic needs of multi-UAVs systems better. It can also enhance the robustness of navigation systems in complex environments, improve the safety of the system, and help to promote the research content of cooperative relative navigation technology.

(2) Practically, the research on the cooperative relative navigation technology of multi-UAV systems based on information fusion and relative observations can help the multi-UAV systems for complex environmental applications to get rid of the limitations of sensor mounting. It can improve the utilization rate of the information from sensors and reduce operating costs, which has high economic significance. It can also help to enhance the safety of multi-UAV systems in urban environments, thus further expanding the urban applications, as well as promoting the development of algorithms and shortening the research cycle applied to products.

A brief summarization of each chapter in this paper is given as follows.

Chapter 1 is the introductory part. This chapter briefly introduce the research background, the research status, the research content, the related industry standards to follow, and the significance of the work.

Chapter 2 reviews the theoretical framework of cooperative relative cooperation. This chapter focuses on the concept of cooperative navigation and relative navigation, the relative navigation performance requirements and the need for multi-UAV systems to employ cooperative relative navigation, and gives the results of literature review about cooperative navigation and relative navigation. This chapter reviews that a systematic understanding of how cooperating the information from multiple UAVs contributes to relative navigation is still lacking. It is necessary to develop cooperative relative navigation approach for multi-UAVs systems, especially in urban environments.

Chapter 3 is the algorithm design part. A GNSS-based cooperative relative navigation algorithm aided by P2P range measurements for multi-UAV systems is the core of this chapter. The models of the measurements related to a GNSS-based relative navigation algorithm are described first. Next, the equations to obtain the baseline between two UAVs based on DD observations and P2P ranging are presented. Then, the mathematical model of the relative cooperative navigation algorithm which makes full use of the relative observations in the multi-UAVs system is derived. On the basis of the cooperative relative navigation algorithm for multi-UAV systems based on GNSS and P2P ranging, barometer is also introduced to improve the navigation performance in the relative height.

Chapter 4 builds a MATLAB-based simulation platform for multi-UAV systems relative navigation performance evaluation. Simulation experiments are conducted to evaluate the algorithm performance and sensitivity analysis is carried out to reveal the factors that affect the algorithm



positioning performance. Simulation results show that the overall relative navigation performance will be severely degraded due to limited satellite visibility and poor measurement accuracy in urban environment. Additionally, the performance can be enormously improved by employing P2P range measurements to pseudorange DD, especially in GNSS challenging situations. The sensitivity analysis reveals the impacts on the performance of the proposed algorithm includes the formation scale, the formation geometry, and the accuracy of the additional sensors. It further validates the performance effect of the algorithm.

Chapter 5 builds a UAV-based flight platform to validate the algorithms using real data. Flight experiments were carried out to verify the performance of the UAV-based platforms and the results show that the platforms are competent for their tasks. The platform is able to accelerate the process of applying the new algorithms in the products.

Chapter 6 concludes the whole thesis and shades light to future study. This chapter summarizes the main work done in this paper, the innovations and the significance of this research. Framework for future study includes introducing more realistic multipath and NLOS models into simulation, designing a cooperative fault detection and exclusion scheme, employing other sensors, such as IMU and vision, optimizing the code of the MATLAB-based simulation platform to reduce complexity for larger-scale drone formation simulation experiments, optimizing the UAV-based test platforms with the post-processing step and adapting real-time processing proposal.

To sum up, this paper focuses on the research about cooperative relative navigation for multi-UAV systems, including the theoretical study, the algorithm design and the test technologies. This study aims to improve the accuracy and availability for multi-UAV systems. The results and conclusions show that information fusion and cooperation of multiple UAVs can greatly improve the performance of relative navigation for multi-UAV systems.