

军用飞机惯导系统的多传感器融合技术研究

姚鹏飞 王佳伟 金思雨

石家庄海山航空电子科技有限公司, 河北 石家庄 050200

[摘要]随着现代战争环境日益复杂, 军事任务对军用飞机导航系统的精度、可靠性和抗干扰能力提出了更高的要求。针对单一传感器导航系统存在固有局限的问题, 开展多传感器融合技术的研究工作, 已经成为提升导航系统整体性能的一个重要方法。文中系统地研究了军用飞机导航领域中的多传感器融合技术。首先, 详细分析了现代军事需求和单一导航系统的不足之处, 清楚说明了多传感器融合的必要性和显著优势。接下来, 详细剖析了惯性导航系统、全球卫星导航系统以及天文导航、视觉导航等辅助传感器的基本原理、数据特性和各自的误差或脆弱性。重点讨论多传感器融合的关键算法, 阐述卡尔曼滤波及其改进算法(如联邦卡尔曼滤波、自适应滤波)的应用, 并探讨传感器故障检测与隔离方法。接着, 比较了松耦合和紧耦合这两种主要的融合架构的特点, 详细分析了在复杂电磁环境下如何确保系统具备良好的鲁棒性和抗干扰能力的具体工程实现措施。最后, 借助设计一些典型的仿真实验场景, 全面评估了多传感器融合导航方案的精度、稳定性等关键性能指标。有效的多传感器融合技术可以明显改善军用飞机导航系统在各种复杂环境中的整体表现, 展现出非常重要的军事应用价值。

[关键词]多传感器融合; 军用飞机导航; 卡尔曼滤波; 抗干扰能力; 系统鲁棒性

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20022

中图分类号: V249

文献标识码: A

Research on Multi-sensor Fusion Technology for Military Aircraft Inertial Navigation System

YAO Pengfei, WANG Jiawei, JIN Siyu

Shijiazhuang Haishan Aviation Electronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050200, China

Abstract: With the increasingly complex modern warfare environment, military missions have put forward higher requirements for the accuracy, reliability, and anti-interference ability of military aircraft navigation systems. Research on multi-sensor fusion technology has become an important method to improve the overall performance of navigation systems, addressing the inherent limitations of single sensor navigation systems. The article systematically studies multi-sensor fusion technology in the field of military aircraft navigation. Firstly, a detailed analysis was conducted on the shortcomings of modern military requirements and single navigation systems, clearly demonstrating the necessity and significant advantages of multi-sensor fusion. Next, a detailed analysis was conducted on the basic principles, data characteristics, and respective errors or vulnerabilities of inertial navigation systems, global satellite navigation systems, as well as auxiliary sensors such as astronomical navigation and visual navigation. Focus on discussing the key algorithms of multi-sensor fusion, elaborating on the application of Kalman filtering and its improved algorithms (such as federated Kalman filtering and adaptive filtering), and exploring methods for sensor fault detection and isolation. Next, the characteristics of the two main fusion architectures, loose coupling and tight coupling, were compared, and specific engineering implementation measures were analyzed in detail on how to ensure good robustness and anti-interference ability of the system in complex electromagnetic environments. Finally, by designing some typical simulation experimental scenarios, the key performance indicators such as accuracy and stability of the multi-sensor fusion navigation scheme were comprehensively evaluated. Effective multi-sensor fusion technology can significantly improve the overall performance of military aircraft navigation systems in various complex environments, demonstrating significant military application value.

Keywords: multi-sensor fusion; military aircraft navigation; Kalman filter; anti-interference ability; system robustness

引言

现代战争形态迭代,对武器装备的智能化、精准度提出前所未有的要求。导航作为军机核心模块,直接决定战场态势感知、精准打击与突防生存能力。复杂战场下,军机常面临强电磁干扰、信号遮挡、卫星失联等极端工况,单一惯导易随时间累积误差,卫星导航抗干扰能力弱,均无法独立满足实战需求。多传感器融合导航已成为破局核心路径,本文梳理该技术的核心关键环节,设计高效融合架构与优化算法,为提升未来航空作战平台导航保障能力提供理论支撑,推动相关领域技术落地迭代。

1 军用飞机导航系统发展现状与挑战

1.1 现代战争对导航系统的需求分析

现代战争环境表现出非常严重的信息化、网络化以及复杂化特点,作战任务需要达到很高的精准度、及时性和团队配合水平,这些方面的要求变得特别严格,给军用飞机导航系统带来了很大压力。导航系统必须能够一直提供准确无误又非常精准的位置、速度和方向数据,同时还需要拥有面对强烈电磁干扰、卫星信号突然消失、崎岖山地以及各种恶劣天气等各种困难环境时依然能够正常工作的能力和独立完成导航的能力^[1]。尤其是在进行远距离精

确打击、隐藏起来突然发起攻击、队伍之间互相配合作战以及遇到复杂电磁环境对抗这些常见的军事活动场景中,导航系统具有高精度、稳定可靠、很强的抵抗破坏能力以及很好的抗干扰能力,已经变成决定战斗结果好坏的核心技术支持手段。

1.2 单一传感器导航系统的局限性

现在常用的单独使用传感器的导航系统都存在很难解决的基本问题。惯性导航系统 INS 可以完成自主并且不间断地提供导航数据输出,但是位置计算错误会随着时间增加而越来越严重,很难达到长时间高精度导航的要求(如图1所示)。全球卫星导航系统 GNSS 能够提供持续稳定而且精确的绝对位置数据,但是信号特别微弱,容易受到外界阻挡、电磁干扰以及欺骗攻击的影响,在危险环境中容易出现信号突然停止或者完全失灵的情况。另外,天文导航、视觉导航这些辅助方法虽然可以起到一定帮助作用,但每种方法都受到天气情况、可见度高低、数据库依赖等多种限制条件的约束,无法成为全天候、全时段都能独立使用的导航基础来源。以上各种缺点导致单独使用传感器很难适应现代战争中那些复杂且经常变化的环境要求。

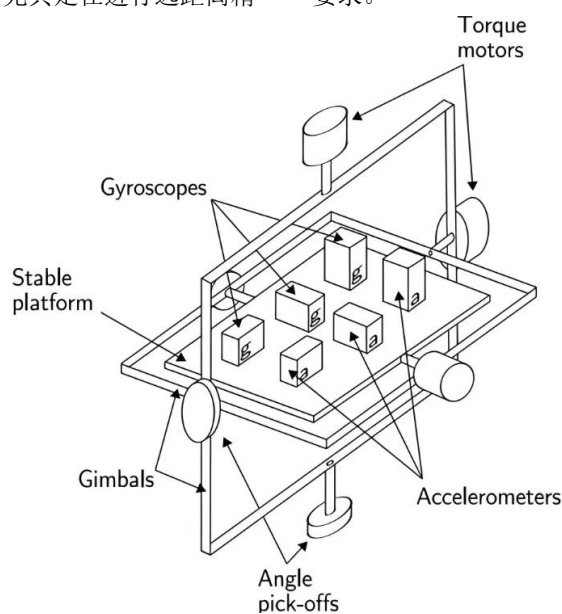


图1 惯性导航结构图

1.3 多传感器融合的必要性与优势

想要解决单独使用一个传感器带来的问题,提升导航系统的整体表现水平,就必须采用多种传感器互相配合的技术方法。这种方法依靠把各种物理特点不同的传感器合理地组合起来,利用各种传感器之间互相补充以及存在多余备份的特点,来完成导航信息的共同分析和不断改进。

其中最关键的好处体现在几个方面:首先,可以很好地减少因为某个单独传感器出现错误或者信号突然中断而导致的整体导航误差不断累加的情况,通过让各个传感器的优势互相帮助来明显提高整个导航系统的精确度和运行的稳定性;其次,通过把信息备份起来的方式,能够让多个传感器互相检查对方的工作状态并提前发现可能出现

的问题,从而大幅增强整个系统的稳定程度和抵抗损坏的能力;最后,还能利用来自很多不同来源的信息,即使遇到特别复杂的电磁环境或者非常恶劣的天气条件导致通信受到阻碍的时候,依然能够提供足够好的导航支持,表现出很强的应对各种环境变化的能力以及抵御外界干扰的能力。所以,采用多种传感器互相配合的方法,已经成为提升军用飞机导航系统整体性能的重要手段和主要方向。

2 军用飞机导航系统中的主要传感器与数据特性

2.1 惯性导航系统(INS)原理与误差特性

惯性导航系统依靠测量物体移动时产生的加速度和转动速度,根据牛顿定律自行计算出位置、速度和方向的具体数据。关键部件包括惯性测量单元和导航计算机,整个运行过程不需要外界提供帮助,拥有很强的独立能力和持续输出的特点。惯性导航系统的定位误差会随着时间慢慢积累起来,主要原因来自陀螺仪和加速度计内部存在的问题,比如零偏、标度因数误差以及各种随机噪声干扰^[2]。开始定位时出现的偏差、计算过程中出现的小失误,还有周围环境带来的各种影响,都会对最终的导航准确度造成不利作用,所以单纯依靠惯性导航很难达到现代军事任务对于长时间高精度导航的要求。

2.2 全球卫星导航系统(GNSS)原理及脆弱性分析

全球卫星导航系统借助捕获多颗卫星发射的测距信号,依据时间测距原理推算出用户的三维位置、速度和时间信息。其优势体现在能够在全球大部分区域提供全天候、高精度的绝对定位。然而 GNSS 信号非常微弱,容易受到干扰和欺骗。系统的脆弱性主要表现在:信号容易被人为或自然因素遮挡造成失锁;在复杂地形或城市环境中多径效应显著;更加重要的是,在强电磁干扰或欺骗式干扰环境下,系统可能性能急剧恶化乃至彻底崩溃,这在军事对抗环境中形成了严重的安全隐患。

2.3 天文导航与视觉导航等辅助传感器简介

天文导航依靠观察天体比如恒星跟载体之间的相对位置来计算位置和方向,拥有独立性高、不会出现累计错误的优势,但是受到天气状况以及观测范围的限制。视觉导航使用安装在飞机上的摄像头拍摄外面的画面,通过寻找特征或者对比景象的方式来帮助确定位置,特别适合在接近地面或者没有卫星信号的情况下发挥作用,但精确度会因为光线变化、表面纹理特点以及处理算法的效果好坏而产生很大差别。各种辅助传感器与惯性导航系统和全球导航卫星系统在数据类型上形成了很好的补充作用,为提高复杂环境下的导航系统稳定性和可靠性提供了多种多样的信息来源。

3 多传感器融合的关键技术与核心算法

3.1 卡尔曼滤波及其在导航融合中的基础应用

卡尔曼滤波是一种计算方法,专门用来处理多传感器融合技术的基础问题。其核心想法是通过预测未来的状态和根据实际测量结果进行调整这两个步骤,不断融合预先估算出来的状态信息以及来自不同来源的数据,最终得到一个尽可能精确的状态估计结果。在导航系统的设计中,惯性导航系统(INS)会先计算出当前位置、移动速度和方向的具体数值,这些数值被视为预测状态的基础。然后,把全球卫星导航系统(GNSS)或者其他相关传感器传来的观测数据当作需要调整的部分,依靠卡尔曼滤波算法来完成对 INS 计算结果的优化和改进工作^[3]。这样的融合机制能够很好地控制住 INS 设备内部积累起来的误差问题,同时充分利用 GNSS 提供出来的高精度位置数据,最终使得整个导航系统的运行表现更加稳定可靠,同时也大大提高了定位的精确度和使用的持久性。

3.2 联邦卡尔曼滤波与自适应滤波等改进算法

对于标准 KF 在复杂应用中显现出来的局限,出现了许多优化算法。联邦卡尔曼滤波 FKF 属于一种分布式的整合架构,把各个子传感器滤波器的局部估算结果汇总到主滤波器里面进行处理,拥有结构灵活、容错性好的特点。自适应滤波比如自适应扩展卡尔曼滤波 AEKF 依靠实时估算并且调节系统噪声或者观测噪声的统计属性,可以解决环境不断变化或者传感器精度不足的问题。这些优化算法提高了整合系统的适用范围和稳定水平。

3.3 针对传感器故障的检测与隔离策略

于繁杂的实战环境中,传感器有可能出现短暂失灵或者遭到重大干扰。以保证融合系统的可靠性,应当执行高效的故障检测与隔离策略。常见方法涵盖依托残差卡方检验的检测法,也就是通过研究滤波器估算残差序列的统计特性来评估传感器观测是否不正。一旦发现某个传感器数据不正常,系统将开启隔离机制,暂且减少其权重或者将其从融合进程中移除,进而依赖其余正常传感器保持导航解算,从而确保系统在局部故障情形下的连续可用性。

4 融合导航系统架构设计与工程实现问题

4.1 基于松耦合与紧耦合的融合架构对比

融合导航系统架构的核心在于建立各种传感器数据融合的逻辑层级和交互方式。松耦合和紧耦合是两种主要的架构设计思路,分别适合不同的应用场景和性能需求。松耦合架构中,各个导航传感器各自工作,并把导航结果,比如位置和速度,发送到融合中心进行信息整合。这种架构设计非常简便,容易集成,对各个传感器输出接口的形

式要求比较宽松。因为没有充分利用原始观测数据,而且各个传感器产生的误差各自独立处理的局限性,所以提高精度和纠正误差的能力都受到很大限制,通常更适合精度要求不高的应用场景或者作为初步解决方案使用。

紧耦合架构就深入到传感器内部,把惯性导航系统 INS 以及全球卫星导航系统 GNSS 这些传感器产生的原始观测数据,比如伪距、伪距率,直接送到融合滤波器里面进行处理。这样的架构可以更好地利用各种信息,在模型层面上针对可能出现的问题采取措施加以应对,从而有效减少惯性导航系统积累下来的误差,同时大幅提高抵抗外界干扰的能力。不过想要真正落实这个架构会遇到不少困难,传感器内部的接口设计必须非常精确才行,而且需要配备性能很强的处理器来完成计算任务,这两点都比较难以实现。因此,高性能军用飞机的导航系统通常会倾向于采用这种架构。到底应该选择哪种架构,需要从性能表现、成本投入以及工程实际操作的可行性等多个方面进行全面的仔细的考量和权衡。

4.2 复杂电磁环境下的抗干扰与鲁棒性保障措施

军用飞机处在复杂电磁环境里作战,导航系统务必拥有优秀的抗干扰和鲁棒性。保障措施应当覆盖到系统设计、信息处理以及决策各个层面^[4]。在传感器方面,针对 GNSS 容易受到破坏的问题,可以安装能够自动调整方向的天线、接收设备自带的完好性监测功能(简称 RAIM),以及使用先进的信号处理方法,用来阻挡或者减弱来自外部的干扰。惯性导航系统属于一种独立工作的传感器,如果想要抵抗干扰就必须依靠非常精确的元器件,并且还要定期进行校准工作,这样才能确保整体表现达到预期目标。对于天文观测和视觉识别这些辅助传感器来说,应该研发出利用红外光线或者多种波段组合的抗干扰探测方式,从而提升整体防御能力。在信息融合与系统层面,构造多层防护体系极其关键。应当规划坚固的故障检测与隔离(FDI)机制,整合残差检验与多假设检验等方法,迅速辨识并隔离故障或受到干扰的传感器信息。融合算法须拥有自适应能力,若察觉到某些传感器性能下降之际,可以自行调节滤波参数或者融合权重,减少其对融合结果的负面影响。系统应当具有在 GNSS 等关键信号彻底丧失时的纯惯性导航或依托其他传感器的备用导航能力,保证任务不中断。

5 融合方案验证与性能评估

5.1 仿真实验设计与典型场景设置

为了检验这篇论文里面提出的导航方法到底好不好用,专门搭建了一套用 MATLAB 和 Simulink 这两个软件结合在一起的半实物仿真系统。这个仿真系统的整体结构

包含了惯性导航系统、全球导航卫星系统仿真接收设备,还有假定安装在飞机上的天文导航仪器和视觉辅助探测装置,共同组成了一个可以不断循环运转的试验场所。飞机动态模型模拟出了几种常见的战术机动路径,具体包括上升阶段、向左或者向右转弯、加速前进,还有从很低的高度快速突破敌方防线这些操作步骤^[5]。各种各样的场景规划都特别关注模拟出非常复杂的战斗环境,主要分成三种不同类型的情况:第一种情况是全球导航卫星系统信号一直都能正常使用并且质量很高的普通飞行环境,用来检验整个导航融合系统的基本工作能力;第二种情况是全球导航卫星系统信号突然遭到部分阻挡或者彻底消失,这种情况发生在穿过山体或者城市狭窄街道的时候,这时候必须依靠惯性导航系统加上视觉辅助探测设备来继续完成定位和导航任务;第三种情况是遭遇强烈的电磁波干扰条件,比如假定有人故意发射出误导性的信号或者把大量噪声加到信号上去,这样就要求导航融合系统具备及时发现故障并进行稳定处理的能力。如表 1 所示。

表 1 某融合方案应用效果研究

测试场景类型	核心测试条件设定	导航性能实测结果
GNSS 信号良好基准场景	飞行器速度 300m/s、 采样频率 100Hz	位置误差 RMSE 2.4m, 速度 误差 0.05m/s
山区 GNSS 完全阻断场景(60s)	无卫星信号、飞行器 执行机动动作	视觉辅助下水平位置误差 ≤15m, 姿态角误差<0.08°
强电磁干扰场景	信噪比降至 20dB、存 在故障卫星信号	成功隔离故障信号, 位置解 算精度维持在 5m 左右
全场景综合验证 结论	覆盖爬升、90°急转 弯、低空突防机动	多源融合架构鲁棒性优异, 满足战术机动需求

5.2 融合导航精度与稳定性评估指标

为了全面评估融合导航系统的性能,采用了多种量化指标开展比较研究。关键精度指标涵盖定位误差以及姿态误差,具体通过融合系统输出结果与预先设定的真实值进行对比计算得出,比如均方根误差 RMSE 和最大误差这两个统计量。在 GNSS 信号正常工作的情况下,重点关注融合之后的位置数据和速度数据的精确度是否比单独使用惯性导航系统有明显提高。当 GNSS 信号突然中断或者无法使用的时候,重点观察系统在位置上的误差变化速度到底有多快,也就是导航精度下降的具体表现,这种情况能够清楚地体现系统的稳定水平和独立运行能力。稳定性的判断主要依靠监测融合滤波器产生的新息序列或者协方差矩阵的变化情况,间接反映出整个融合过程的收敛速度和结果的一致程度。所有仿真数据都用比较曲线的形式展示出来,这样很容易看出各种多传感器融合方法相比于单纯依靠某一种传感器或者采用松散连接方式,在维持精

度、控制误差以及抵抗外界干扰能力这些方面到底获得了多大的整体提升效果。

6 结束语

研究如何提高军用飞机导航系统的整体表现,仔细考察了多种传感器融合的技术应用方式。通过分析惯性导航、卫星导航、天文导航以及视觉导航这些不同传感器的工作原理和独特优点,清楚地说明了融合各种传感器可以互相补充的重要作用。认真研究了以卡尔曼滤波及其改进算法为核心的导航数据融合方法,详细对比了松耦合和紧耦合这两种架构的设计思路 and 实际效果,特别关注了在复杂电磁环境中如何提高系统的稳定性和抗干扰能力的具体措施。通过仿真实验的结果可以看出,设计出来的融合方案能够明显改善导航的准确度、稳定性以及面对环境变化时的适应能力。多种传感器融合技术通过整合和协调来自不同来源的导航信息,很好地解决了单一系统存在的不足之处,成为打造高性能、高可信度、抗干扰能力强的军用飞机导航系统不可或缺的关键手段和核心技术方向。随着传感器技术的不断进步和人工智能算法的深度融合,多源信息融合将会朝着更加智能、更加自动化的方向迈进。新开发出来的传感器会显著增加融合信息的种类和多样性,而

依靠深度学习的自适应融合算法,能够更加精确地解决各种不确定因素带来的问题,并且及时应对突发故障。深入挖掘和推进多种传感器融合领域的理论创新和工程实践探索工作,对于满足未来智能化战争中对航空导航保障提出的高标准要求,保持并加强我国军队航空作战平台在导航领域的领先优势,具有非常重要的战略价值和广泛的军事应用潜力。

[参考文献]

- [1]曹怀建.基于多传感器融合的定位定姿技术研究[J].煤矿机械,2021,42(12):180-184.
- [2]林晓彬,杨志敏.多传感器信息融合的防波堤结构检测技术研究[J].人民珠江,2022,43(5):114-120.
- [3]王小阳,李骏,赵琛.军用飞机惯性导航技术的发展[J].中国军转民,2021(17):31-33.
- [4]王楠,李霞.军用飞机基层级维修任务优化技术研究[J].航空维修与工程,2023(4):59-62.
- [5]陈勇,张新慧,耿延升,等.飞机飞控系统指令异构力传感器技术研究[J].航空科学技术,2023,34(4):55-60.

作者简介:姚鹏飞(1989—),男,汉族,河北灵寿县人,本科,研究方向为激光捷联惯性导航系统方向。