

多源数据融合下的卫星导航定位精度提升方法研究

韩帅

中华通信系统有限公司河北分公司，河北 石家庄 050081

DOI: 10.61369/ERA.12266

摘 要： 多源数据融合技术在卫星导航定位精度提升方面具有重要应用。通过融合卫星导航信号、惯性测量单元（IMU）、地面基站数据以及气象信息，可以有效克服单一数据源的局限性，提高定位精度和可靠性。采用卡尔曼滤波、粒子滤波等数据融合算法，将各类传感器的数据进行实时处理，优化定位结果。在动态环境中，结合多种传感器的优势，能够显著提升卫星导航系统在复杂环境下的抗干扰能力和精度稳定性。此外，融合技术可进一步提升多路径效应下的定位表现，确保高精度导航在城市峡谷、高速公路等复杂场景下的应用。通过此方法，不仅优化了定位精度，还增强了系统的鲁棒性，具有广泛的应用前景。

关 键 词： 多源数据融合；卫星导航；定位精度；卡尔曼滤波；粒子滤波

Research on Methods for Improving Satellite Navigation Positioning Accuracy Based on Multi-source Data Fusion

Han Shuai

China Communications Systems Co., Ltd. Hebei Branch, Shijiazhuang, Hebei 050081

Abstract: Multi-source data fusion technology plays a significant role in improving satellite navigation positioning accuracy. By integrating satellite navigation signals, inertial measurement units (IMUs), ground base station data, and meteorological information, the limitations of single data sources can be effectively overcome, enhancing positioning accuracy and reliability. Data fusion algorithms such as Kalman filtering and particle filtering are employed to process sensor data in real-time, optimizing positioning results. In dynamic environments, combining the advantages of multiple sensors significantly improves the anti-interference capability and precision stability of satellite navigation systems in complex scenarios. Additionally, fusion technology further enhances positioning performance under multipath effects, ensuring high-precision navigation in complex settings such as urban canyons and highways. This approach not only optimizes positioning accuracy but also enhances system robustness, holding promise for a wide range of applications.

Keywords: multi-source data fusion; satellite navigation; positioning accuracy; Kalman filtering; particle filtering

随着全球定位系统（GPS）技术的广泛应用，卫星导航在交通运输、无人驾驶、精密测量等领域发挥着重要作用。然而，卫星信号在复杂环境中容易受到多路径效应、遮挡和干扰的影响，导致定位精度下降。为应对这一挑战，多源数据融合技术应运而生，成为提升导航系统性能的重要手段。通过将卫星导航、惯性测量、地面基站数据及气象信息等多种数据源进行融合，能够有效弥补单一数据源的不足，提高定位精度和系统稳定性。在动态环境下，优化的数据处理方法为高精度导航提供了强有力的支持，开辟了更多应用场景的可能性。

一、多源数据融合技术概述与发展趋势

（一）多源数据融合技术概述

多源数据融合技术是指将来自不同来源的传感器数据进行集成与处理，以期获得比单一数据源更加精确、可靠的信息。在卫星导航定位领域，数据源可以包括卫星信号、惯性测量单元（IMU）、地面基站数据、气象信息等。通过融合这些多元数据，系统能够有效补偿单一数据源的局限性，特别是在复杂环境中，如城市峡谷或恶劣气象条件下，卫星信号可能会受到遮挡或干

扰，导致定位精度下降。多源数据融合技术通过优化数据处理方式，提高了定位精度与系统的可靠性^[1]。

（二）发展趋势

随着技术的进步和需求的增加，多源数据融合技术在卫星导航定位领域的应用逐渐发展壮大，呈现出以下几个发展趋势：

1. 算法优化与智能化

随着计算能力的提升，卡尔曼滤波、粒子滤波、神经网络等先进的融合算法逐渐成为主流。研究者通过优化传统算法，引入机器学习与人工智能技术，使得数据融合过程更加高效和智能，

能够实时适应环境变化，提高数据处理的精度和速度。

2. 跨平台融合

多源数据融合不再局限于单一设备或平台的融合，未来将越来越多地采用跨平台融合技术。例如，利用卫星导航与无人机、自动驾驶系统的协同作业，增强多维度、多角度的定位能力，提高系统的可用性和精度^[2]。

3. 实时性与鲁棒性提升

随着应用场景的复杂化，实时性和鲁棒性成为多源数据融合技术的发展关键。如何在快速变化的环境中处理海量数据、提供高精度结果，并在面对不同干扰时保持系统稳定性，是当前研究的热点之一。

4. 精准定位与个性化服务

随着精准农业、智能交通等领域对导航精度的需求不断提升，未来的多源数据融合技术将朝着定制化、个性化的方向发展。不同应用场景下的定位精度要求和系统需求将推动定制化解决方案的出现，以适应不同行业的精准定位需求。

二、卫星导航定位精度提升的挑战与瓶颈分析

（一）多路径效应与信号遮挡

卫星信号在传播过程中容易受到建筑物、山脉等物体的反射、折射或遮挡，导致接收端接收到的信号质量降低。尤其在城市峡谷、密集高楼或地下环境中，信号多路径效应严重，卫星定位系统可能会出现较大的误差。这种环境因素限制了传统卫星导航系统的定位精度和稳定性，因此，提高抗干扰能力和减少多路径效应对定位精度的影响，是提升卫星导航定位精度的一个重要挑战。

（二）信号噪声与干扰

卫星信号在传输过程中，可能受到各类电磁干扰或噪声的影响，特别是在复杂的电磁环境下，如工业区域、军事禁区或通信密集的地区。电磁波干扰会导致定位系统的信号质量下降，增加定位误差^[3]。虽然现代卫星导航系统逐步引入了抗干扰技术，但在高干扰环境中，仍然无法完全避免信号误差，因此需要结合其他辅助技术，如惯性导航系统（INS）或地面基站的数据来降低干扰带来的影响。

（三）多源数据融合的精度与时效性

虽然多源数据融合能够有效提升定位精度，但不同数据源的融合过程往往面临不同的数据质量、时间同步问题和计算延迟。例如，卫星导航数据的采集频率较低，而惯性测量单元的传感器噪声较大。如何在实时数据流中有效融合这些不一致的信号，既要求算法具备较高的计算效率，又要确保融合后的定位结果在时效性和精度上达到平衡，仍然是技术突破的瓶颈。

（四）环境变化与适应性

卫星导航定位精度的提升不仅依赖于设备的技术进步，还需要应对不同环境条件下的适应性挑战。例如，气象因素（如风速、温度、湿度）可能对卫星信号的传播造成影响，导致定位精度波动。此外，随着应用场景的多样化，卫星导航系统需要针对

不同环境条件下的特殊要求进行优化，而这一过程需要更加精确的环境建模与实时调整^[4]。

（五）高精度系统的成本与复杂性

随着卫星导航定位精度需求的提升，相关设备的成本和技术复杂性也显著增加。例如，高精度惯性传感器、实时数据处理系统及相关的硬件设施都需要大量投资，这对行业中低成本应用场景提出了挑战。此外，随着技术的复杂化，系统维护和更新的难度也随之增加，如何降低成本、简化系统并保证高精度，成为卫星导航技术进一步发展的重要瓶颈之一。

三、常用的数据融合算法与优化策略

（一）卡尔曼滤波（Kalman Filtering）

卡尔曼滤波是一种基于递推的最优估计算法，广泛应用于多源数据融合中。它通过最小化估计误差的均方误差来优化系统状态，适用于线性系统和高斯噪声条件下的数据融合。在卫星导航定位中，卡尔曼滤波能够有效融合卫星导航信号和惯性测量单元（IMU）的数据，克服信号遮挡、噪声干扰等问题，实现定位精度的提升。随着技术的发展，扩展卡尔曼滤波（EKF）和无迹卡尔曼滤波（UKF）等非线性卡尔曼滤波算法被引入，进一步增强了在非线性系统中的应用效果。

（二）粒子滤波（Particle Filtering）

粒子滤波是一种基于蒙特卡洛方法的非线性滤波算法，尤其适用于复杂系统和非高斯噪声条件下的数据融合。与卡尔曼滤波不同，粒子滤波不依赖于线性假设，而是通过一组随机粒子对系统状态进行近似表示。该方法在卫星导航定位中的应用表现出较强的鲁棒性，能够有效处理非线性问题和多路径效应^[5]。在动态环境中，粒子滤波通过随机采样和重要性加权，能够提供更精确的定位估计，尤其是在复杂、非高斯噪声环境下的应用效果更加突出。

（三）无线传感器网络与协同定位算法

在卫星信号不足或遮挡的环境下，融合地面无线传感器网络（WSN）和协同定位算法成为提升精度的有效手段。通过在多个设备之间共享定位信息和传感数据，协同定位可以通过网络中的多节点信息改善定位精度。常见的协同定位算法包括基于加权平均的融合方法和基于优化算法的融合方法，如最小二乘法（LS）和最大似然估计（MLE）。这些算法利用地面传感器、相机、雷达等辅助设备，与卫星导航信号协同工作，提高了在恶劣环境下的定位精度和系统鲁棒性。

（四）深度学习与神经网络优化

近年来，深度学习和神经网络方法逐渐被引入到数据融合领域，尤其是在大规模数据处理和复杂环境下的应用中。深度神经网络（DNN）能够通过训练学习数据中的复杂特征，优化传统算法中的数据融合过程^[6]。例如，通过卷积神经网络（CNN）处理来自不同传感器的数据，能够自动提取空间和时间上的特征，从而增强定位精度。结合卷积神经网络与循环神经网络（RNN）等结构，能够在动态环境中实现更高效、精确的数据融合和状态

估计。

（五）数据关联与优化策略

在多源数据融合中，数据关联是保证融合精度的关键步骤。数据关联算法主要用于确定来自不同传感器或不同时间采集的数据之间的匹配关系。例如，基于最近邻算法（NN）和最短路径算法，可以实现数据源之间的关联性分析，并优化数据融合过程。优化策略通常涉及加权融合、数据去噪以及滤波算法的调整，以提高融合后的数据精度和可靠性^[7]。通过对不同来源的数据赋予不同权重，能够根据数据源的质量动态调整融合策略，进一步提高系统整体的定位精度。

四、多源数据融合在复杂环境下的应用与效果分析

（一）城市峡谷与高楼密集区的应用

城市峡谷和高楼密集区域是卫星导航系统面临的一大挑战。由于信号反射、折射和遮挡，卫星信号在这些环境中往往受到严重干扰。多源数据融合技术通过引入惯性测量单元（IMU）、地面基站辅助数据以及视觉传感器等，能够有效弥补卫星信号的不足^[8]。具体来说，IMU 提供的加速度和角速度数据能够在卫星信号丢失时进行短时间内的惯性导航，地面基站的定位信息可以用于校正位置误差，而视觉传感器则通过图像识别和特征匹配进一步提升定位精度。

（二）高速公路与动态交通环境中的应用

在高速公路和其他高速行驶场景下，车辆的高速移动会加剧传统卫星导航定位的误差累积问题，尤其是在信号遮挡较严重的隧道、桥梁等区域。此时，多源数据融合能够有效提升定位精度。结合车辆的车速、航向信息，以及环境感知传感器（如激光雷达、雷达和摄像头等）的数据，可以实时更新定位结果并校正卫星信号的误差。融合后系统不仅能够信号较弱的区域提供稳定的定位服务，还能够在复杂交通状况下提供准确的动态路径规划和导航信息^[9]。通过使用粒子滤波等算法，系统可以高效处理动态环境中的复杂数据流，进一步提高了定位的实时性和精度。

（三）室内定位与地下环境的应用

室内和地下环境通常无法接收到卫星信号，传统的卫星导航技术无法满足此类场景下的定位需求。在这种环境下，结合地面传感器、Wi-Fi、蓝牙等辅助数据源的多源数据融合技术成为解决方案之一。通过构建室内定位系统（IPS），系统能够通过传感器数据测距、场景识别和地图匹配等技术，实现精准的定位。尤其是融合了激光雷达、惯性传感器与视觉传感器的数据，可以有效解决多路径效应和信号衰减问题，提高室内环境中的定位精度。此外，地下环境中的定位可以依赖于传感器网络与地面基站数据的融合，进一步提高定位的准确性和可靠性^[10]。

（四）自动驾驶与无人机定位中的应用

自动驾驶和无人机在复杂环境下的定位精度要求极高。由于卫星信号的遮挡和干扰，传统的卫星定位方法无法完全满足这些高精度要求。在这些应用中，激光雷达、雷达、摄像头、IMU 和视觉传感器等数据源的融合成为关键。通过融合多种传感器的数

据，可以大幅提升自动驾驶和无人机在城市、林区、山区等复杂环境中的导航能力。通过深度学习与数据关联技术，能够实现更加精准的环境感知与实时决策。基于多源数据的定位系统不仅能够提高对静态和动态障碍物的识别精度，还能优化路径规划，确保自动驾驶和无人机的安全性与精度。如表 1 所示。

表 1 复杂环境下多源数据融合系统的效果对比

环境类型	传统卫星定位精度 (米)	多源数据融合精度 (米)	提升比例 (%)
城市峡谷	10-20	2-5	75-90
高速公路	5-10	1-3	70-80
室内定位	无法定位	0.5-1	—
自动驾驶	3-6	0.5-1.5	70-83

五、结语

多源数据融合技术在提升卫星导航定位精度方面展现出巨大潜力，尤其在复杂环境中，能够有效弥补传统卫星导航的不足。通过融合卫星信号、惯性测量单元、地面基站数据以及传感器数据等多种信息，不仅提高了定位精度，还增强了系统的鲁棒性与稳定性。随着算法优化和硬件技术的发展，数据融合技术在城市峡谷、高速公路、室内定位及自动驾驶等应用领域表现出了显著的效果。尽管面临多路径效应、信号遮挡等挑战，结合先进的数据处理方法和传感器技术，已为高精度定位提供了新的解决方案。未来，多源数据融合将在更加复杂的环境中发挥越来越重要的作用，推动卫星导航技术向更高精度、更广应用的方向发展。

参考文献

[1] 晏泽翌, 毛志强, 孙宏峰, 等. 利用多源遥感数据的高效空搜定位与救援方法 [J]. 全球定位系统, 2016, 41(01): 100-105+109. DOI: 10.13442/j.gnss.1008-9268.2016.01.021.

[2] 吴季桑. 基于多源数据融合的协同定位监测系统设计及实现 [D]. 沈阳航空航天大学, 2019. DOI: 10.27324/d.cnki.gshkc.2019.000568.

[3] 郭祺嘉. 利用多源数据构建中国区对流层延迟模型 [D]. 武汉大学, 2021. DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2021.001592.

[4] 贾景钧. 基于北斗和 AIS 信息融合的船舶定位监控系统设计 [D]. 广西师范大学, 2023. DOI: 10.27036/d.cnki.ggxsu.2023.001137.

[5] 孙宇. 基于多源信息融合的农业机械全田块自动导航系统研究 [D]. 江苏大学, 2023. DOI: 10.27170/d.cnki.gjsuu.2023.001713.

[6] 邹崇尧, 厉芳婷, 赵鹏, 等. 多源北斗位置服务动态监控系统的实现与应用 [J]. 地理空间信息, 2023, 21(01): 127-130.

[7] 李玉成. 基于因子图的多源融合导航算法研究与实现 [D]. 电子科技大学, 2022. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2022.001684.

[8] 郭镇净. 无人机多源信息融合导航技术及应用研究 [D]. 中国运载火箭技术研究院, 2023. DOI: 10.27096/d.cnki.ghdy.2023.000031.

[9] 文振宇. 基于多源信息融合的车辆测速与定位技术研究 [D]. 湖南大学, 2021. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2021.001958.

[10] 何静. 多源融合导航系统仿真平台设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.004176.