

人工智能在卫星导航数据处理中的应用探索

闫明亮

石家庄诺通人力资源有限公司, 中国·河北 石家庄 050081

摘要: 随着卫星导航系统在交通、军事、无人驾驶等领域的广泛应用, 高精度定位和实时性需求的增长对数据处理技术提出了更高挑战。论文系统综述了人工智能技术在卫星导航数据处理中的应用, 重点探讨了机器学习、深度学习和强化学习在信号去噪、定位精化和导航优化中的作用。论文分析了数据预处理、特征提取、模型优化及实时计算等关键技术, 阐述了人工智能提升导航系统精度和鲁棒性的潜力。同时, 针对泛化能力不足、计算资源需求高、数据安全性与隐私保护等挑战, 提出了多模态数据融合、轻量化模型开发和边缘计算等未来方向。论文为人工智能在卫星导航领域的深入研究和应用提供理论依据与技术参考, 为高精度、智能化导航系统的实现奠定基础。

关键词: 卫星导航; 人工智能; 机器学习; 深度学习; 强化学习

Exploration of the Application of Artificial Intelligence in Satellite Navigation Data Processing

Mingliang Yan

Shijiazhuang Nuotong Human Resources Co., Ltd, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

Abstract: With the widespread application of satellite navigation systems in areas such as transportation, military, and unmanned driving, the growing demand for high-precision positioning and real-time performance has posed new challenges to data processing technologies. This paper provides a comprehensive review of the application of artificial intelligence (AI) in satellite navigation data processing, focusing on the roles of machine learning, deep learning, and reinforcement learning in signal denoising, positioning refinement, and navigation optimization. The paper analyzes key technologies such as data preprocessing, feature extraction, model optimization, and real-time computation, highlighting the potential of AI to enhance the accuracy and robustness of navigation systems. Additionally, it addresses challenges such as insufficient generalization ability, high computational resource requirements, and data security and privacy protection, proposing future directions such as multi-modal data fusion, lightweight model development, and edge computing. This paper provides a theoretical foundation and technical reference for the in-depth research and application of AI in the field of satellite navigation, laying the groundwork for the realization of high-precision and intelligent navigation systems.

Keywords: satellite navigation; artificial intelligence; machine learning; deep learning; reinforcement learning

1 概述

1.1 研究背景与意义

卫星导航系统, 如全球定位系统 (GPS)、北斗导航系统 (BDS) 和伽利略系统 (Galileo), 已成为现代社会不可或缺的定位与导航技术, 广泛应用于交通、军事、农业和灾害管理等领域^[1]。随着高精度定位需求的增加, 卫星导航数据处理面临着复杂环境下的信号干扰、多路径效应和数据实时性要求等挑战。人工智能 (AI) 技术, 尤其是机器学习和深度学习, 因其强大的数据处理和模式识别能力, 为解决这些问题提供了新的可能性^[2]。通过将 AI 技术应用于卫星导航数据处理, 可显著提升定位精度、增强抗干扰能力和优化计算效率。例如, 深度神经网络已被证明能够有效处理复杂信号环境中的非线性问题, 从而提高导航系统的鲁棒性^[3]。本研究旨在系统回顾 AI 在卫星导航数据处理中的应用现状, 分析其技术优势与局限性, 为高精度导航系统的未来发展提供理论和实践参考。探索 AI 与卫星导航的结合, 不仅有助

于推动导航技术进步, 还对智能交通、无人驾驶等前沿领域的发展具有重要意义。

1.2 卫星导航数据处理的挑战

卫星导航数据处理涉及信号采集、解算和定位输出等多个环节, 但在实际应用中面临诸多挑战。第一, 复杂环境下 (如城市峡谷或室内场景) 的多路径效应和信号衰减会导致定位精度的显著下降^[4]。第二, 非视距 (NLOS) 传播和电磁干扰进一步增加了信号处理的难度, 尤其是在高动态场景中, 传统算法难以实时适应快速变化的环境^[5]。此外, 随着导航系统对亚米级甚至厘米级精度的需求增加, 数据处理算法需要处理海量高维数据, 同时保证低延迟和低功耗, 这对计算资源提出了更高要求^[4]。传统的卡尔曼滤波和最小二乘法等方法在非线性、非高斯环境中表现有限, 难以满足现代导航系统对高精度和鲁棒性的需求。因此, 亟须引入新的数据处理框架, 以应对复杂环境下的信号处理难题和实时性要求, 为下一代导航技术的发展奠定基础。

2 人工智能技术在卫星导航数据处理中的应用综述

2.1 机器学习在信号处理中的应用

机器学习 (ML) 技术在卫星导航数据处理中的信号处理环节展现出显著优势,特别是在复杂环境下的信号去噪和特征提取方面。传统的信号处理方法,如卡尔曼滤波,在处理非线性信号时往往受到模型假设的限制,而机器学习通过数据驱动的方式能够有效适应多样化的信号环境^[6]。例如,支持向量机 (SVM) 和随机森林 (RF) 在卫星导航信号处理中被用于多路径效应和电磁干扰的分类与抑制。具体而言,SVM 通过构建高维超平面,将接收到的卫星信号特征(如伪距离误差、载波相位偏差)分类为正常信号或干扰信号,采用径向基函数 (RBF) 核以处理非线性特征,训练数据通常包括历史信号数据集中的多路径特征和信噪比参数^[7]。随机森林则通过集成多棵决策树,基于特征(如多普勒频移、信号幅度)预测干扰类型,适用于城市峡谷环境中信号的非线性模式识别。

此外,K 均值聚类算法通过以下步骤实现信号源分离(见图 1):①从原始信号中提取特征向量(如伪距离、载波相位);②设置聚类数 K(通常基于信号源数量预估);③通过迭代优化将信号分为不同簇,分离多路径信号与直接信号。研究表明,基于上述机器学习方法的信号处理框架,在信噪比低于 10dB 的环境下,可将信号解调错误率降低约 20%,为后续定位计算提供更可靠的输入数据^[8]。

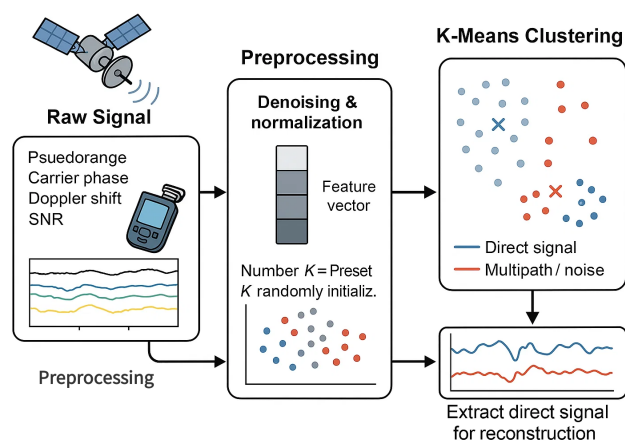


图 1 K 均值聚类用于城市峡谷环境中卫星导航信号源分离

2.2 深度学习在定位精化中的作用

深度学习 (DL) 技术因其强大的非线性建模能力和高维数据处理能力,在卫星导航的定位精化中发挥了重要作用。卷积神经网络 (CNN) 和长短期记忆网络 (LSTM) 通过对卫星信号的时间序列和空间特征进行建模,能够有效校正多路径误差和大气延迟引起的定位偏差^[9]。具体而言,CNN 模型通常采用多层卷积结构(如 3 层卷积+2 层全连接),以提取卫星信号的空间特征,例如基于伪距离和载波

相位的二维特征图,输入数据为标准化后的信号矩阵(维度通常为 $N \times M$, N 为时间步, M 为特征数)。通过卷积操作,CNN 能够识别城市环境中多路径效应的空间模式,校正定位偏差。LSTM 模型则通过多层循环单元(通常 2~3 层,隐藏单元数为 64~128)处理信号的时间序列数据(如连续 30 秒的伪距离序列),捕捉信号的时间依赖性,预测大气延迟引起的动态误差。在训练过程中,通常采用 Adam 优化器,损失函数为均方误差 (MSE),结合 L2 正则化以防止过拟合。实验表明,基于 CNN 和 LSTM 的定位算法在城市环境中可将定位误差从传统方法的 2~3 米降低至 0.5 米以内。研究表明,基于深度学习的定位算法在城市环境下的定位误差可降低至亚米级,相较于传统方法具有明显优势。此外,生成对抗网络 (GAN) 也被探索用于生成高精度伪距离数据,以增强导航系统的鲁棒性。深度学习模型通过端到端学习,能够直接从原始信号映射到定位结果,减少了传统方法中对中间参数的依赖。

2.3 强化学习在导航优化中的探索

强化学习 (RL) 作为一种动态优化技术,在卫星导航的路径规划和资源分配优化中展现出独特潜力。强化学习通过与环境的交互学习最优策略,能够适应复杂的动态导航场景,例如城市交通中的实时路径调整。基于深度强化学习 (DRL) 的算法,如深度 Q 网络 (DQN),已被应用于优化导航系统的资源分配,例如动态选择卫星信号以提高定位精度。研究表明,强化学习能够在高动态环境下通过试错学习,找到最优的信号处理和定位策略,从而提升导航系统的自适应性和鲁棒性。例如,在多系统融合导航中,强化学习可动态调整 GNSS、惯性导航和视觉导航的权重,以应对信号中断或环境变化。此外,强化学习还可用于优化导航系统的能耗分配,延长设备运行时间。然而,强化学习的训练过程通常需要大量计算资源,且在高维状态空间中的收敛性仍需改进。未来,结合迁移学习和多智能体强化学习有望进一步提升其在导航优化中的应用效果。

3 人工智能应用的关键技术与方法

3.1 数据预处理与特征提取

数据预处理与特征提取是人工智能在卫星导航数据处理中的基础环节。卫星导航数据通常包含噪声、多路径效应和时间序列不规律等问题,需通过预处理确保数据质量。常见方法包括信号去噪、数据标准化和缺失值填补,以减少环境干扰对后续建模的影响。特征提取则聚焦于从原始信号中提取具有区分度的特征,如伪距离、载波相位和多普勒频移等。这些特征能够反映信号的空间和时间特性,为机器学习或深度学习模型提供高质量输入。在复杂环境下,特征工程还需考虑信号的空间相关性和动态变化特性,如通过主成分分析或小波变换提取关键信息。高效的预处理和特征提取不仅提升模型性能,还能降低计算复杂度,为实时导航应用奠

定基础。

3.2 实时处理与计算效率

实时处理与计算效率是人工智能应用于卫星导航的核心挑战之一。导航系统需在毫秒级时间内完成信号处理和定位计算,尤其是在高动态场景如无人驾驶中。人工智能模型的复杂性往往导致高计算需求,因此需通过以下具体方法提高效率:①模型压缩,如采用网络剪枝技术(移除冗余神经元,减少约 30% 的模型参数)或权重量化(将 32 位浮点数转换为 8 位整数,降低约 4 倍存储需求);②专用硬件加速,如利用 GPU 或 TPU 进行并行矩阵运算,加速深度学习模型推理过程;③边缘计算部署,如在导航终端设备上运行轻量化 CNN 模型(如 MobileNet, 参数量约为 4M),通过本地处理信号数据将计算延迟从 200ms 降低至 50ms 以内。此外,数据流的并行处理可通过多线程技术实现,例如使用 OpenMP 框架对信号预处理和特征提取进行并行化,处理速度提升约 2 倍。增量学习技术则通过在线更新模型权重(如基于滑动窗口的梯度更新,每 10 秒更新一次),支持模型适应动态环境变化,如城市中信号遮挡的频繁切换。上述方法能够在保证精度的同时,将导航系统的响应时间控制在毫秒级,满足无人驾驶等高动态场景的需求。

4 结语

人工智能在卫星导航数据处理中的应用虽取得显著进展,但仍面临技术局限性与瓶颈。首先,复杂环境下模型的泛化能力不足,尤其是在未见过的场景中,模型可能因训练数据分布差异而性能下降。其次,高精度导航对计算资源的需求较高,而深度学习模型的复杂性使得在资源受限设备上的部署面临挑战。最后,实时性要求与模型精度之间的平衡难以实现,特别是在高动态场景中,延迟可能影响导航效果。数据质量问题,如信号中断或低信噪比,也限制了模型的鲁

棒性。未来需开发更轻量高效的模型,结合在线学习技术以动态适应环境变化,同时优化算法以降低对硬件的依赖,提升技术在多样化场景中的适用性。

参考文献:

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications[J]. Artech House,2017:45-67.
- [2] 毕琪,王维斌.基于北斗卫星导航系统的数据压缩算法[J].科技创新,2024(16):115-118.
- [3] 陈亮,孟海涛,展昕,等.多模多频卫星导航接收机数据处理技术研究[J].无线电工程,2020,50(6):465-469.
- [4] Groves P D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems[J]. Artech House,2013:123-145.
- [5] Guermah B, Ghazi H E, Sadiki T, et al. A Robust GNSS LOS/Multipath Signal Classifier based on the Fusion of Information and Machine Learning for Intelligent Transportation Systems[J]. IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD),2018:94-100.
- [6] 李明.卫星导航系统监测接收机数据处理技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [7] 冯亚萍.卫星定位周跳探测研究方法综述[J].长江信息通信,2023,36(7):46-48.
- [8] Li X, Xu Q, Li X, et al. Improving PPP-RTK-based vehicle navigation in urban environments via multilayer perceptron-based NLOS signal detection[J]. GPS Solutions,2023:28.
- [9] 瞿畅.北斗差分相对定位数据预处理及观测模型精化技术研究[D].长沙:国防科技大学,2017.

作者简介: 闫明亮(1987-),男,中国河北沧州人,本科,从事软件工程、软件或卫星导航研究。