

导航卫星信号干扰下的定位精度分析

张海平

山东省国土测绘院

DOI:10.12238/gmsm.v7i6.1846

[摘要] 本文分析干扰对卫星导航系统定位精度的影响,探讨不同干扰条件下的定位误差特性及对导航性能的影响,运用先进信号处理与统计分析方法对干扰源分类并建立误差模型,经模拟实验和实地测试验证模型,结果表明优化信号处理策略和采用抗干扰技术可提高导航系统鲁棒性和定位精度,为信号干扰防护和定位精度提升提供理论依据与技术支持。

[关键词] 导航卫星; 信号干扰; 定位精度; 误差模型; 抗干扰技术

中图分类号: P412.27 **文献标识码:** A

Analysis of positioning accuracy under navigation satellite signal interference

Haiping Zhang

Shandong Province Land Surveying and Mapping Institute, Shandong Province

[Abstract] This paper analyzes the influence of interference on satellite navigation system positioning accuracy, discusses the positioning error characteristics under different interference conditions and the influence on navigation performance, using advanced signal processing and statistical analysis method to interference source classification and establish error model, the simulation experiment and field test validation model, the results show that optimizing signal processing strategy and using anti-interference technology can improve the navigation system robustness and positioning accuracy, provide theoretical basis and technical accuracy for signal interference protection and positioning accuracy support.

[Key words] navigation satellite; signal interference; positioning accuracy; error model and anti-jamming technology

引言

在全球化时代,卫星导航系统作为人们日常生活不可或缺的部分,其精确性关乎交通安全、军事行动与个人隐私保护,然而技术发展使导航卫星信号干扰问题凸显,成为导航系统性能提升的关键制约因素。自然因素如太阳活动、电离层变化和人为因素如电子战、信号欺骗等干扰源,不仅影响信号接收质量,还会导致定位误差甚至导航能力丧失。本文深入分析此干扰对定位精度的影响并探讨抗干扰策略,对干扰源分类和误差模型构建为导航系统设计者和用户提供方法论以评估和改善抗干扰能力。

1 导航卫星信号干扰现象概述

1.1 干扰源的多样性与特性

导航卫星信号在传输过程中面临着来自不同来源的干扰,其中自然干扰如太阳风和地磁暴可引起电离层电子密度变化,致使信号传播路径上折射指数波动,影响信号传播时延和相位,大气条件如降水和对流层折射也会高频段信号传播造成影响。人为干扰更为复杂,包括有意的电子对抗行为如信号压制和

欺骗,以及无意的电磁干扰如来自地面通信基站、广播电台和日常电子设备的辐射,这些干扰源会产生宽带或窄带噪声,对导航信号的频率、幅度和相位产生不同程度影响。

1.2 干扰对信号接收的效应

在导航卫星信号接收过程中,干扰的存在显著降低信号与噪声比(C/N0),不仅直接影响信号的解调质量,还严重削弱定位的准确性。当信号因干扰而弱化时,接收机可能无法准确捕获或持续跟踪卫星信号,致使定位计算无法正常进行。多路径效应与干扰信号的叠加进一步增加信号处理难度,在复杂信号环境中,定位算法需更加精细和智能,以便准确区分直射信号和反射信号,从而确保定位结果的可靠性,这种对信号处理算法的高要求,促使研发人员不断探索和改进算法,以适应不断变化的干扰环境,提高导航系统的鲁棒性。

1.3 干扰对定位系统的影响

导航卫星系统设计须考虑干扰影响以确保在各种环境下的可靠性和有效性,干扰存在可能导致定位误差增加,在高动态或复杂电磁环境下更为明显,如航空和海上导航系统面对强烈干

扰时,其定位精度和可靠性会受到严重影响^[1]。对安全至关重要的应用领域是重大挑战,导航卫星信号干扰现象是涉及多个层面的复杂问题,不仅关系到信号接收质量,还直接影响定位系统性能。为提高导航系统抗干扰能力,需深入研究干扰源,发展有效信号处理技术和抗干扰策略,这些措施可最大限度减少干扰对导航定位精度的负面影响。

2 干扰对定位精度的影响分析

2.1 干扰下定位精度的下降机制

在导航卫星信号传输过程中,干扰的存在对信号的完整性构成严重威胁,无论是自然干扰(如会引起电离层电子密度变化、导致信号传播路径上折射指数波动、影响信号传播时延和相位的太阳风和地磁暴),还是人为干扰(包括可能噪声注入、信号阻塞或发送欺骗信号等手段进一步干扰信号正常传输的电子对抗行为和电磁干扰),都以不同方式对信号传输造成破坏。噪声注入降低了信号与噪声比(C/N0),使接收机在噪声背景中难以分辨出有用信号,不仅增加测量误差,也影响信号解调质量。信号阻塞更为直接,阻碍信号接收,导致接收机无法捕获和跟踪卫星信号,无法进行有效定位计算。更为复杂的欺骗信号经过发送错误信号信息误导接收机,使定位结果产生严重偏差,这对于如航空、海上导航和军事行动等依赖精确导航的领域可能带来灾难性后果。

2.2 干扰对定位算法的挑战

干扰对现有大多依赖信号伪距测量来确定位置的定位算法构成了严峻挑战,因为当干扰存在,尤其是多路径效应,会在信号传播过程中引入额外时延,导致伪距测量值与真实值产生偏差^[2]。这种偏差不仅增加定位误差,还可能致使接收机的跟踪环路失锁,影响信号连续跟踪,进而对定位算法的稳定性和准确性造成负面影响。为有效应对这些干扰,必须对现有的定位算法进行改进或开发新算法,新算法需能够识别和抑制干扰信号,以确保即使在干扰环境下也能保持较高定位精度,这可能涉及采用自适应滤波、多普勒频率估计和机器学习算法等先进的信号处理技术。

2.3 干扰对不同应用场景的影响差异

不同应用场景对定位精度的要求以及受干扰的影响程度有所不同,在土地测绘或精密施工等静态定位应用中,对定位精度的要求极高,任何微小误差都可能导致重大偏差。在车载导航或航空导航等动态定位应用中,虽然对精度的要求略低,但动态环境下的快速变化和复杂性要求定位系统能够快速响应和适应干扰。在军事或安全领域,信号的可靠性和准确性直接关乎任务的成败,对干扰的防护和抵抗能力的要求更为严格。导航卫星信号的干扰对定位精度的影响是多的,从信号接收质量下降,到算法准确性面临挑战,再到不同应用场景下的影响差异,干扰问题贯穿了整个导航定位的全过程。为提高导航系统的抗干扰能力和定位精度,必须综合考虑干扰的类型、强度和特性,采用相应的技术和策略,以确保定位服务的连续性和可靠性。

3 误差模型的构建与验证

3.1 误差源的识别与量化

在导航系统中,构建误差模型的首要步骤是深入识别误差源,误差源主要有信号传播误差、接收机噪声、多路径效应以及干扰信号。每一项误差源对定位精度产生的影响都需要经过精确的量化分析,来确定其在误差模型中的权重与效应,电离层和对流层的延迟可建模为一个时变参数,并结合地理信息和时间信息进行估计。

3.2 误差模型的构建方法

构建误差模型的方法涉及统计学和信号处理技术,运用最小二乘法、卡尔曼滤波器,甚至更先进的机器学习技术,能够对误差进行有效建模与预测^[3]。误差模型需要包含随机误差和系统误差,以及它们对定位结果的综合影响,模拟信号在干扰条件下的传播,能够评估误差模型的准确性与适用性。

3.3 模型的实验验证与调整

模型的有效性需要经过实验进行验证,实验设计需涵盖不同的干扰类型、强度和条件,以保证模型的普适性和鲁棒性。与实际定位数据的对比分析,能够识别模型预测与实际观测之间的差异,并据此对模型参数进行调整。实验反馈也用于优化数据处理算法,提高模型的预测精度。

3.4 误差模型在实际导航系统中的应用

构建的误差模型最终要应用于实际导航系统中,在实际应用中,误差模型为接收机提供了预测误差的能力,使导航算法能够进行误差补偿,进而提高定位精度。误差模型的动态调整能力对于应对不断变化的干扰环境极为重要,确保导航系统在各种条件下都能提供可靠的定位服务。构建误差模型是一个系统性工程,需要对导航信号的传播特性、接收机性能以及干扰环境有全面的理解,对误差源的精确建模和验证,能够显著提高导航系统在干扰条件下的性能,为用户提供更准确的定位服务。

4 抗干扰技术的应用与优化

4.1 抗干扰技术的分类与原理

抗干扰技术是提升导航系统在复杂电磁环境下性能的关键,这些技术可分为主动和被动两大类,主动抗干扰技术经过增强信号的抗干扰能力来实现,如频率跳变、信号编码和功率控制等;被动抗干扰技术则侧重于改善接收机的处理能力,包括多路径抑制、信号滤波和自适应算法等。每种技术都有其特定的应用场景和优势,需要依据实际干扰环境和系统需求进行选择与优化。

4.2 信号处理技术在抗干扰中的应用

信号处理技术在抗干扰中扮演着核心角色,自适应滤波器能够根据信号环境的变化动态调整滤波参数,有效抑制干扰并提取有用信号^[4]。多输入多输出(MIMO)技术增加接收天线的数量,提高了信号的空间选择性,从而增强系统对干扰的抵抗能力。机器学习算法能够学习干扰特征,实现对未知干扰的智能识别与抑制。

4.3 抗干扰技术的系统级集成与优化

在进行系统级集成抗干扰技术时,需要考虑技术的兼容性

和整体性能,综合运用多种抗干扰技术,能够实现对不同类型干扰的全面防护。将频率跳变与自适应滤波相结合,可在动态变化的干扰环境中保持信号的稳定性和准确性,系统级的优化还包括算法的计算效率和资源分配,以确保在有限的计算能力和能耗条件下实现最优的抗干扰效果。

4.4 抗干扰技术的实际测试与评估

抗干扰技术的有效性需要实际测试来验证,测试环境应尽可能模拟真实世界的干扰条件,包括自然干扰和人为干扰。对比测试结果和预期目标,能够评估抗干扰技术的性能,并指导进一步的优化。用户反馈和现场数据也为抗干扰技术的改进提供了宝贵信息,抗干扰技术的应用与优化是一个持续的过程,需要不断适应新的干扰环境和技术发展,深入研究干扰特性、创新信号处理方法,并进行系统级的集成和测试,能够显著提高导航系统在复杂电磁环境下的可靠性和精度。

5 实验结果与定位精度提升策略

5.1 实验设计与实施

实验设计在验证抗干扰技术的有效性扮演着至关重要的角色,为确保实验结果的全面性与准确性,实验环境的设计必须综合考量自然干扰源(如太阳活动、大气条件等)以及人为干扰源(如电磁信号干扰等)。在模拟这些干扰条件的情况下,经过精确的实验操作,收集并记录定位数据,对应用抗干扰技术前后的定位精度展开细致的对比分析。实验的精确实施还要求对实验条件进行严格控制,涵盖信号的发射强度、接收机的配置以及干扰的模式等,以确保所得数据具备科学性、可靠性与有效性。应用这种方式,能够全面评估抗干扰技术的性能,为进一步的系统优化和策略制定提供坚实的实验依据。

5.2 数据分析与误差评估

实验结果的数据分析对于评估抗干扰技术的性能至关重要,利用方差分析和置信区间估计等统计方法,能够精确量化抗干扰技术对定位精度的具体影响,误差评估需全面考虑定位误差的幅度及其分布特征,包括但不限于误差的均值、方差、偏态以及可能的峰态等统计量,从而深入理解误差的本质与规律。

5.3 定位精度提升策略的制定

基于实验结果和数据分析,可以制定相应的定位精度提升策略,这些策略可能涵盖改进信号处理算法、优化系统参数、增强硬件性能等。依据误差评估结果,可以调整自适应滤波器的参数,以更好地抑制特定类型的干扰,也可以增加冗余卫星信号或采用多频段接收技术,提高系统的抗干扰能力。

5.4 策略的实施与效果评估

定位精度提升策略的实施不仅要在实际导航系统中开展,还需经过细致的监控以确保策略的有效性,监控系统性能的变化,如信号的稳定性、定位的连续性和精度,是评估策略成功与否的关键。效果评估应涵盖实施前后的详细对比分析,包括但不限于定位误差的统计数据、用户的实际体验反馈以及现场测试的具体表现。这些评估结果将为策略的持续优化提供数据支持,促进系统的迭代改进,以适应不断变化的使用需求和干扰环境。

5.5 持续优化与技术迭代

定位精度提升是一个持续的过程,需要依据新的干扰环境和技术发展不断进行优化,定期的实验和数据分析,能够及时发现并调整策略。技术的迭代更新,如新的信号处理算法和硬件技术,也将为定位精度的提升提供新的可能性,实验结果与定位精度提升策略的制定是一个动态的、迭代的过程,精心设计的实验、深入的数据分析和持续的策略优化,能够有效提升导航系统在干扰条件下的定位精度,确保其在各种应用场景下的可靠性和有效性。

6 结语

本文深入探讨导航卫星信号干扰对定位精度的影响并提出抗干扰技术和策略,经过构建误差模型、应用信号处理技术和进行系统集成优化提升导航系统在复杂电磁环境下性能,实验表明策略能显著提高定位精度和增强系统鲁棒性。面对干扰与技术挑战,持续技术创新和策略优化是确保导航系统可靠性的关键,未来新技术涌现有望进一步提升导航卫星信号抗干扰能力,为全球用户提供更精准稳定定位服务。

[参考文献]

- [1]赵宏宇,张建华.导航卫星信号干扰及其抗干扰技术研究[J].电子学报,2019,47(4):853-861.
- [2]陈思进,李晓明.GPS信号干扰与抗干扰技术综述[J].航天器工程,2018,27(2):1-8.
- [3]刘洋,周杰.卫星导航信号干扰特性分析与抑制方法[J].电子与信息学报,2020,42(1):82-90.
- [4]孙伟,马超.基于卡尔曼滤波的GPS抗干扰技术研究[J].通信学报,2017,38(10):85-93.

作者简介:

张海平(1977--),男,汉族,山东日照人,本科,工程师,大地测量。