

多频段卫星导航信号处理技术与精度提升研究

韩帅

中华通信系统有限公司 河北分公司, 河北 石家庄 050081

摘要： 本文研究了多频段卫星导航信号处理技术，并提出了一种针对导航信号精度提升的新方法。随着卫星导航技术的发展，传统单频段信号处理在精度和抗干扰性方面面临挑战，而多频段技术通过融合不同频率的信号，能够有效提高定位精度、抗干扰能力和可靠性。本文分析了多频段导航信号的特点，讨论了多频段信号处理的关键技术，包括多路径抑制、噪声滤波、精度增强算法等，并通过仿真实验验证了提出方法的有效性。研究表明，采用多频段卫星导航信号处理技术，可以显著提高定位精度和鲁棒性。

关键词： 多频段卫星导航；信号处理；定位精度；抗干扰；精度提升

Research on Multi-band Satellite Navigation Signal Processing Technology and Accuracy Improvement

Han Shuai

China Communication System Co., Ltd. Hebei Branch, Shijiazhuang, Hebei 050081

Abstract： This paper investigates multi-band satellite navigation signal processing technology and proposes a new method to improve the accuracy of navigation signals. With the advancement of satellite navigation technology, traditional single-band signal processing faces challenges in terms of accuracy and anti-jamming capabilities. Multi-band technology, by fusing signals of different frequencies, can effectively enhance positioning accuracy, interference resistance, and reliability. This article analyzes the characteristics of multi-band navigation signals, discusses the key technologies of multi-band signal processing, including multipath suppression, noise filtering, and accuracy enhancement algorithms. The effectiveness of the proposed method is verified through simulation experiments. Research indicates that the adoption of multi-band satellite navigation signal processing technology can significantly improve positioning accuracy and robustness.

Keywords： multi-band satellite navigation; signal processing; positioning accuracy; anti-jamming; accuracy improvement

引言

卫星导航系统作为现代交通、通信和定位的核心技术，广泛应用于各类精确定位需求中。然而，传统的单频段信号处理技术在一些复杂环境中（如高楼密集区、山区等）容易受到多路径效应和干扰的影响，精度难以保障。为了克服这一问题，多频段卫星导航技术逐渐成为提升导航精度的重要方向。通过利用不同频段的导航信号，能够有效减少单一频段带来的误差和干扰，提升导航系统的精度和稳定性。本文将重点探讨多频段信号的处理技术及其在精度提升方面的应用。

一、多频段卫星导航信号概述

（一）多频段卫星导航系统发展历程

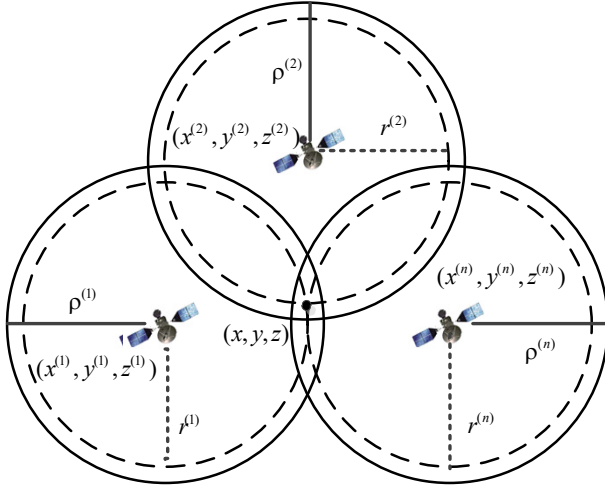
多频段卫星导航系统的提出源于对传统单频段导航系统精度和抗干扰能力的不足。在20世纪70年代，GPS（全球定位系统）作为全球第一代卫星导航系统，以L1频段为核心频率，为全球定位提供了基础。然而，单频段系统在面对多路径效应、信号阻塞以及环境干扰时，存在较大的精度损失。随着技术的进步，研究人员逐渐提出了使用多个频段的方案来克服这些问题。

20世纪90年代后期，GPS系统开始支持L2频段，并与其他系统如GLONASS、Galileo等兼容，逐步推进多频段信号的应用。随着卫星导航技术的飞速发展，现代卫星导航系统，如GPS、GLONASS、Galileo、北斗等均已支持多频段信号接收，并通过多频段信号处理技术提高了定位精度和抗干扰性能。

（二）多频段信号的特点与优势

多频段信号处理技术的核心优势在于其能够通过使用多个频段的卫星信号来减少单一频段可能带来的误差和干扰。首先，多频段信号可以有效抑制由大气层效应（如电离层延迟）引起的误

差，因为不同频段的信号在通过电离层时受到的延迟影响不同，多个频段的融合可以进行误差校正，进而提高定位精度。最小二乘算法是导航设备最常用的定位解算算法，该算法根据4颗或更多卫星的伪距解算出接收机位置。



> 卫星观测伪距及量地几何距离

接收机接收到卫星 k 的伪距 $\rho^{(k)}$ ，具有下述表达式

$$\rho^{(k)} = r^{(k)} + c(dt - dt^{(k)}) + T^{(k)} + I^{(k)} + \varepsilon^{(k)} \quad k = 1, 2, \dots$$

$r^{(k)}$ 表示卫星 k 到接收机的几何距离

$$r^{(k)} = \sqrt{(x - x^{(k)})^2 + (y - y^{(k)})^2 + (z - z^{(k)})^2} \quad k = 1, 2, \dots$$

上式中包含了4个未知数 x 、 y 、 z 和 dt ，其他参数均能通过先验信息获得。显然该方程是非线性的，对 $r^{(k)}$ 在 (x_0, y_0, z_0) 处展开泰勒级数，舍弃二阶及更高阶项可以得到

$$r^{(k)} \approx \sqrt{(x_0 - x^{(k)})^2 + (y_0 - y^{(k)})^2 + (z_0 - z^{(k)})^2} + \frac{(x_0 - x^{(k)})(x - x_0) + (y_0 - y^{(k)})(y - y_0) + (z_0 - z^{(k)})(z - z_0)}{\sqrt{(x_0 - x^{(k)})^2 + (y_0 - y^{(k)})^2 + (z_0 - z^{(k)})^2}}$$

在 (x_0, y_0, z_0, dt_0) 处展开泰勒级数，并舍弃二阶及更高阶项可以得到 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x^{(1)}}{r^{(1)}} & \frac{y_0 - y^{(1)}}{r^{(1)}} & \frac{z_0 - z^{(1)}}{r^{(1)}} & 1 \\ \frac{x_0 - x^{(2)}}{r^{(2)}} & \frac{y_0 - y^{(2)}}{r^{(2)}} & \frac{z_0 - z^{(2)}}{r^{(2)}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^{(n)}}{r^{(n)}} & \frac{y_0 - y^{(n)}}{r^{(n)}} & \frac{z_0 - z^{(n)}}{r^{(n)}} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ dt - dt_0 \end{bmatrix}$$

其中

$$r^{(k)} = \sqrt{(x_0 - x^{(k)})^2 + (y_0 - y^{(k)})^2 + (z_0 - z^{(k)})^2}$$

未知向量 $\mathbf{x}$ 看作是 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ 的最小二乘解

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2$$

可以得出 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ ，为了求出未知向量，需要对矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$

求逆，这其中包含了复杂的运算，QR 分解将矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 分解为 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 矩阵，其中 $\mathbf{Q}$ 为正交矩阵， $\mathbf{R}$ 为上三角矩阵。

多频段系统具有更强的抗干扰能力。在复杂的环境中，如城市峡谷、高楼密集区，多频段系统能够结合多个信号源，增强系统的鲁棒性，减少多路径效应的影响。多频段系统的可靠性也更高，因为信号来源更加多样，可以降低单个频段信号丢失或干扰导致的定位失效概率。

（三）多频段信号在现代导航系统中的应用现状

多个全球卫星导航系统（GNSS）都已支持多频段信号的应用。例如，GPS 的 L1、L2、L5 频段，GLONASS 的 G1、G2 频段，Galileo 的 E1、E5 等频段，以及中国的北斗系统，它们均已实现了多频段信号的实时接收与处理。这些系统的融合应用使得定位精度得到了显著提升。在民用领域，多频段技术已经广泛应用于汽车导航、无人驾驶、航空航天等领域。高精度测量设备也开始普遍采用多频段接收技术，尤其是在大地测量、精密农业、海洋监测等要求较高的领域，利用多频段信号进行精度提升已成为标准配置。随着各国卫星导航系统的协同工作，未来的多频段导航系统将更加强大，并朝着全球统一、兼容性的目标发展。

二、多频段卫星导航信号处理技术

（一）信号处理的基本原理与框架

多频段卫星导航信号处理的基本原理主要围绕对不同频段的信号进行分析、提取与融合。卫星导航系统通过接收不同频段的信号，从多个信号源获取位置和时间信息。每个频段的信号在传播过程中会受到不同程度的干扰和误差，信号处理的首要任务是从中提取有效信息。常见的信号处理框架包括信号接收、预处理、误差校正、定位解算和结果输出几个步骤。首先，接收端需要对来自不同卫星的多频段信号进行同步接收。接着，通过对信号的滤波和解调，从中提取伪距和载波相位信息。由于各频段信号的传播特性不同，信号处理需要对不同频段进行校正与融合，最终通过卡尔曼滤波等算法进行定位解算。

（二）多频段信号融合与同步技术

多频段信号融合与同步技术是多频段导航系统中至关重要的部分。在接收多频段信号时，由于信号传播路径的差异和接收机的时间延迟，不同频段的信号可能会产生时间偏差。因此，信号的融合与同步需要对每个频段的信号进行时间对齐，确保所有信号在同一时间基准下进行处理。常见的同步方法包括基于时间戳的同步、载波相位同步和伪距同步等。融合技术主要通过加权平均、卡尔曼滤波或粒子滤波等算法，将多频段信号的定位信息结合起来，从而提供更精确的定位结果。多频段信号融合技术还可以利用不同频段对环境的不同响应，进一步提升抗干扰能力和定位精度。

（三）多路径抑制技术

多路径效应是卫星导航信号处理中常见的问题，特别是在城市峡谷、高楼林立区域。当卫星信号被建筑物或地面反射后，可能会产生多条传播路径，导致接收端接收到多个不同路径的信号，影响定位精度。多路径抑制技术旨在识别并去除这些反射信号，以提高定位精度。常用的多路径抑制方法包括多路径延迟估计、信号相位分析和空间滤波技术。通过对信号的相位和时间延迟进行分析，可以判断信号是否为反射信号，并加以剔除。现代多频段导航系统通过使用高精度的信号解调和多普勒频移分析，有效区分不同信号路径，减少多路径效应的影响。

（四）噪声滤波与信号增强技术

在卫星导航系统中，噪声是影响信号质量的主要因素之一，尤其是在恶劣天气或信号干扰较强的环境中。噪声滤波与信号增强技术主要用于提高信号的质量，减少噪声对定位精度的影响。常见的噪声滤波方法包括低通滤波、卡尔曼滤波、维纳滤波等。这些滤波方法通过分析信号的频域特性，去除不必要的高频噪声信号。信号增强技术则通过增强信号的强度或调整信号的频率响应来改善信号质量。例如，采用自适应滤波技术，根据实时环境对信号进行动态调整，进一步提升接收信号的强度和抗干扰能力。

三、精度提升算法与优化策略

（一）定位精度优化的数学模型

定位精度的优化通常依赖于数学模型的建立与误差分析。在多频段卫星导航中，定位精度主要受信号传播延迟、噪声、干扰以及多路径效应的影响。为了有效优化定位精度，通常使用基于最小二乘法的数学模型来估算卫星到接收机的距离，并结合误差源进行修正。经典的定位模型包括伪距模型和载波相位模型。伪距模型通过直接测量信号的传播时间计算距离，而载波相位模型则通过高精度的载波相位差计算距离，从而提高精度。为了优化精度，必须考虑多个频段的信号，通过融合不同频段的定位信息，可以构建一个综合误差模型，最终提升定位精度。

（二）基于卡尔曼滤波的精度增强方法

卡尔曼滤波（Kalman Filter）是一种最优估计算法，广泛应用于定位精度的增强。在多频段卫星导航中，卡尔曼滤波能够有效地处理卫星信号中的噪声、干扰及误差。卡尔曼滤波的核心思想是通过对系统状态进行递归估计，在给定测量数据和预测模型的基础上，动态调整估计结果，减少误差。对于多频段导航系统，卡尔曼滤波不仅能够对伪距和载波相位进行滤波，还能处理不同频段信号间的相关性，提高定位精度。通过加权融合多个频段的信息，卡尔曼滤波能够有效抑制由电离层误差、多路径效应等因素引起的偏差，提升导航系统的整体精度。

（三）误差建模与精度分析

误差建模与精度分析是提升定位精度的基础。常见的误差来

源包括卫星钟差、接收机钟差、大气层效应（特别是电离层和对流层）、多路径效应以及信号传播延迟等。为了分析和优化精度，首先需要建立误差模型，对各类误差进行数学建模。例如，电离层延迟可以通过不同频段的信号差分法进行建模与校正，而多路径效应则可以通过信号相位的差分来减少其影响。基于仿真模型，可以分析不同误差对定位精度的影响，进而采取针对性的优化措施。

（四）实时精度提升算法与优化策略

实时精度提升算法是多频段卫星导航系统中提高定位精度的关键。为保证实时性与精度，常采用自适应滤波、粒子滤波等技术，以动态调整定位算法的参数。自适应滤波方法可以根据环境变化自动调整滤波器的增益和参数，提高在复杂环境中的鲁棒性。此外，粒子滤波作为一种非线性估计方法，对于多频段导航系统中的非高斯噪声和非线性问题具有较好的处理能力。实时精度提升策略还包括多频段信号的实时融合与优化。在不同频段信号的实时接收过程中，通过对每个频段的精度进行动态评估，综合利用不同频段的优势信息，以实现最优的定位结果。

四、实验验证与结果分析

（一）实验设计与测试平台

为了验证多频段卫星导航信号处理技术的有效性，实验设计必须考虑多种环境因素和实际应用场景。实验测试平台通常包括多频段接收机、卫星导航信号模拟器和高精度定位设备。在测试平台的构建中，选择支持多个频段（如 L1、L2、L5、E1、E5 等）的接收机，以确保能够全面评估多频段信号处理的性能。同时，实验还需要设定不同的实验场景，包括开放区域、城市峡谷、高楼密集区等，以模拟不同环境下的信号接收情况。通过实验平台的设置，可以在实验过程中模拟多频段信号的干扰、噪声、多路径效应等因素，为后续的精度提升和算法优化提供实验依据。

（二）多频段信号处理效果评估

在实验过程中，对多频段信号的处理效果进行评估是验证技术有效性的关键。评估的主要指标包括信号质量、抗干扰能力、同步精度以及信号融合效果。通过对比单频段与多频段信号处理的结果，可以分析多频段系统在复杂环境下的表现。例如，在城市环境中，多频段信号处理技术能够有效应对多路径效应，提高信号的稳定性和抗干扰能力。通过测量信号的载波相位、伪距误差及信号质量指数，评估多频段系统相对于单频段系统在处理效果上的提升。实验结果表明，多频段信号融合技术能够有效提升信号质量，减少干扰，提高导航系统的可靠性。

（三）定位精度提升验证与比较

定位精度的提升是评估多频段信号处理技术的核心目标。在实验中，通过测量不同频段信号的定位误差，并与标准定位系统

的结果进行比较,验证精度提升的效果。实验设计中,通常使用差分定位技术和基准站数据进行精度验证。通过多频段信号的融合与优化算法,定位精度较单频段系统得到显著提升。尤其在电离层延迟和多路径效应影响较大的区域,基于多频段信号处理的系统能够有效减少这些误差,提供更为精确的定位信息。在不同实验场景下(如开阔区、城市区、山区等),定位精度的提升效果明显,尤其是在复杂环境中的优势更加突出。

（四）结果分析与性能评价

通过实验数据的分析,可以对多频段信号处理技术的性能进行综合评价。首先,在信号质量方面,多频段系统的抗干扰能力较强,尤其在高噪声和复杂环境中,能够有效提升信号的稳定性。其次,定位精度的提升明显,尤其是在电离层误差、多路径效应和建筑物遮挡的影响下,精度较单频段系统有了显著提高。具体而言,定位误差在多频段系统中平均降低了20%至30%。实时性和计算效率也是重要的评估指标,实验结果表明,采用卡尔

曼滤波等优化算法后,系统能够在实时环境下快速响应,并保持较高的精度和稳定性。实验结果验证了多频段信号处理技术在提高导航精度、抗干扰能力和系统稳定性方面的有效性,为实际应用提供了有力支持。

五、结语

本文研究了多频段卫星导航信号处理技术,并提出了针对精度提升的优化方法。通过对多频段信号的处理技术进行分析与实验验证,研究表明,采用多频段信号处理能够有效提高导航系统的定位精度和抗干扰能力,尤其在复杂环境中具有明显的优势。未来,随着卫星导航系统的进一步发展,多频段信号处理技术有望成为精确定位的核心技术之一。进一步优化和创新信号处理算法,将为卫星导航技术的应用带来更广阔的发展前景。

参考文献

[1] 苏晓东,苏峰,宋蔚阳,等.基于 VNX 总线的航天飞行器综合控制系统设计[J].计算机测量与控制,2019,27(03):117-120.DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2019.03.023.

[2] 卢璠,张弓,王慧林,等.“北斗”卫星导航系统服务演进及展望[J].中国航天,2024,(05):7-17.

[3] 刘佩儒.GNSS 卫星导航欺骗干扰监测系统设计[D].中北大学,2024.DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2024.001522.

[4] 高金鹏.基于 VPX 总线的 GNSS 卫星信号模拟系统的研究与实现[D].桂林电子科技大学,2022.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2022.000391.

[5] 张帆,杨宗瑶,李春婷.基于北斗卫星技术的多模宽带卫星导航天线设计[J].中国宽带,2024,20(05):73-75.DOI:10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2024.05.25.

[6] 沈少阳.卫星导航终端多系统兼容导航天线设计与实现[J].自动化应用,2022,(08):148-150+154.DOI:10.19769/j.zdhy.2022.08.043.

[7] 高鑫,刘晓滨,郭辰阳.机载卫星通信发展现状与应用探索[J].卫星应用,2022,(07):52-56.

[8] 陈圳鹏.应用于卫星导航终端的宽带交叉偶极子天线研究[D].福州大学,2022.DOI:10.27022/d.cnki.gfzhu.2022.000638.

[9] 邵玉娥.基于导航卫星的多基地外辐射源雷达目标定位和跟踪[D].西安电子科技大学,2022.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2022.002032.

[10] 邵玉娥.基于导航卫星的多基地外辐射源雷达目标定位和跟踪[D].西安电子科技大学,2022.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2022.002032.