

基于多模信息融合的时空协同优化及自适应频率驯服算法研究

孙嵩斐, 吕依恒, 侯远航, 王志明*, 刘拥军

河南职业技术学院电子与物联网学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年5月2日; 发布日期: 2025年5月13日

摘要

针对复杂环境下时频信号处理的高精度需求, 提出了一种基于多模信息融合的时空协同优化及自适应频率驯服算法。通过整合北斗、GPS、惯性导航系统等多源传感器数据, 结合独立分量分析(ICA)进行噪声分离与特征提取, 构建了多模信息融合系统架构。在此基础上, 设计了时空协同优化模型, 利用神经网络和固定区间平滑算法(FIS)提升时空信号处理精度。同时, 进一步提出多相位锁相环(MP-PLL)和加权自适应卡尔曼滤波算法, 有效抑制晶振频率漂移与跳变野值。实验结果表明, 该算法极大地提升了定位精度、时间准确度及频率稳定性, 显著超越国家现行标准, 为高精度导航和授时系统提供了创新解决方案。

关键词

多模信息融合, 时空协同优化, 自适应频率驯服, 独立分量分析, 加权卡尔曼滤波

Research on Spatiotemporal Cooperative Optimization and Adaptive Frequency Disciplining Algorithm Based on Multi-Modal Information Fusion

Songfei Sun, Yiheng Lyu, Yuanhang Hou, Zhiming Wang*, Yongjun Liu

Department of Electronics and Internet of Things, Henan Polytechnic, Zhengzhou Henan

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: May 2nd, 2025; published: May 13th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 孙嵩斐, 吕依恒, 侯远航, 王志明, 刘拥军. 基于多模信息融合的时空协同优化及自适应频率驯服算法研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(5): 505-513. DOI: 10.12677/csa.2025.155122

Abstract

To address the high-precision requirements of time-frequency signal processing in complex environments, this paper proposes a spatiotemporal cooperative optimization and adaptive frequency disciplining algorithm based on multi-modal information fusion. By integrating multi-source sensor data from BeiDou, GPS, and inertial navigation systems, and employing Independent Component Analysis (ICA) for noise separation and feature extraction, a multi-modal information fusion system architecture is constructed. On this basis, a spatiotemporal cooperative optimization model is designed, utilizing graph neural networks and Fixed Interval Smoothing (FIS) to enhance spatiotemporal signal processing accuracy. Furthermore, a Multi-Phase Phase-Locked Loop (MP-PLL) and a weighted adaptive Kalman filter algorithm are proposed to effectively suppress oscillator frequency drift and outliers. Experimental results demonstrate that the algorithm significantly improves positioning accuracy, time synchronization precision, and frequency stability, markedly surpassing current national standards, thereby providing an innovative solution for high-precision navigation and timing systems.

Keywords

Multi-Modal Information Fusion, Spatiotemporal Cooperative Optimization, Adaptive Frequency Disciplining, Independent Component Analysis, Weighted Kalman Filter

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

北斗卫星导航系统作为国家关键基础设施，其时空基准精度直接影响国防安全、智能交通与通信网络。在通信领域，精确的时频同步是保障高速、稳定数据传输的基础，直接影响着通信系统的容量、质量与可靠性；在卫星导航系统里，时频信号的稳定性直接关联着定位与授时的精度，从日常的车辆导航到航空航天精确轨道控制，高精度的时频信号是确保导航准确性与可靠性的核心要素；而在精密测量领域，如原子钟的频率稳定度测量、引力波探测等，时频信号处理技术更是追求极致精度的关键，其微小的误差都可能导致实验结果的巨大偏差。然而，随着应用场景的日益复杂，时频信号处理面临着前所未有的挑战。在复杂的电磁环境中，多源噪声干扰相互交织，严重影响时频信号的质量与稳定性；同时，动态场景下信号的快速变化也对时频稳定性提出了更高要求。因此，如何在复杂环境下实现高精度的时频信号处理，提升时频稳定性，成为了亟待解决的关键问题。

2. 多模信息融合技术研究现状

近年来多模信息融合技术在卫星导航、智能巡检等领域取得了显著进展[1]。在卫星导航中，通过融合全球定位系统(GPS)、北斗卫星导航系统(BDS)等多系统的信号，以及惯性导航系统(INS)、气压高度计等辅助传感器的数据，能够有效提高定位的精度和可靠性。例如，在城市峡谷等卫星信号容易受到遮挡的区域，多模信息融合技术可以利用 INS 的短期高精度特性，弥补卫星信号的缺失，从而实现连续、稳定的定位。在智能巡检领域，融合视觉、红外、声音等多模态传感器信息，能够对设备状态进行更全面、准确的监测与诊断[2]。如通过融合视觉图像与红外热成像数据，可以同时获取设备的外观形态和温度分

布信息,更精准地识别设备的故障隐患。

现有的频率驯服算法在面对复杂环境时仍存在诸多不足。在野值抑制与动态响应之间难以实现有效权衡,传统的频率驯服算法在抑制野值时,往往会牺牲系统的动态响应能力,导致在信号快速变化时无法及时跟踪调整[3];而强调动态响应时,又容易受到野值的干扰,影响频率控制的精度。在一些工业自动化场景中,当设备运行状态突然改变时,传统算法可能无法快速调整频率,导致系统运行不稳定;而在存在噪声干扰的情况下,算法又可能误将噪声当作真实信号进行处理,进一步降低频率控制的准确性。因此,开发一种能够在复杂环境下兼顾野值抑制与动态响应的频率驯服算法,是当前时频信号处理领域的研究热点与难点。

3. 多模信息融合系统架构设计

在复杂环境下的高精度时空信息处理中,多模信息融合系统架构是实现时空协同优化及自适应频率驯服算法的核心基础。该架构通过整合多种不同类型的数据源,包括卫星导航信号(如GPS、北斗)、惯性导航系统(INS)、气压高度计以及高精度晶振等,构建一个高效、稳定且可靠的时空信息处理平台。其目的是充分利用各数据源的优势,克服单一数据源的局限性,从而显著提升时空信息的精度和可靠性。

3.1. 多模态数据采集与预处理

在时频信号处理系统中,多模态数据的采集依赖于多种类型的传感器协同工作。全球定位系统(GPS)/北斗卫星导航系统作为时间基准的重要来源,通过接收卫星发射的信号,能够提供高精度的时间信息。其基本原理是利用卫星与地面接收器之间的信号传播时间差,通过精确的计算得出接收器的位置以及当前的时间。在理想的开阔环境下,GPS/北斗的授时精度可达纳秒级,为整个系统提供了绝对时间参考。惯性测量单元(IMU)则主要用于测量载体的加速度和角速度,通过内部的加速度计和陀螺仪感知载体的运动状态[4]。加速度计利用牛顿第二定律,通过检测质量块在惯性力作用下的位移来测量加速度;陀螺仪则基于角动量守恒原理,测量载体的旋转角速度。IMU具有高频响应的特性,能够实时捕捉载体的动态变化,但其测量误差会随着时间的推移而累积。晶振作为产生稳定频率信号的关键部件,其频率稳定性直接影响时频信号的质量。不同类型的晶振,如石英晶振、温补晶振等,在频率稳定性、功耗等方面具有不同的特性。例如,石英晶振具有较高的频率稳定性和较低的成本,被广泛应用于各类电子设备中;而温补晶振则通过温度补偿技术,进一步提高了频率在不同温度环境下的稳定性。

这些传感器采集到的数据往往受到各种噪声的干扰,因此需要进行预处理以提高数据质量。独立分量分析(ICA)作为一种有效的信号处理技术,能够从混合信号中分离出相互独立的源信号,在多模态数据预处理中发挥着重要作用[5][6]。假设采集到的多模态信号为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,其中 x_i 表示第 i 个传感器的观测信号。ICA假设这些观测信号是由一组相互统计独立的源信号 $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 经过未知的混合矩阵 A 线性混合而成[7],即 $X = AS$ 。ICA的目标是寻找一个解混矩阵 W ,使得估计的源信号 $U = WX$ 尽可能地逼近真实的源信号 S 。

ICA算法通常基于优化一个独立性准则来求解混矩阵 W [8]。常见的独立性准则包括最大熵准则、最小互信息准则和峭度最大化准则等。以峭度最大化准则为例,峭度是一种用于衡量信号非高斯性的统计量,非高斯信号的峭度绝对值大于高斯信号的峭度(高斯信号峭度为0)。ICA通过最大化估计源信号的峭度,来实现源信号的分离。具体来说,对于估计源信号 U 中的每个分量 u_i ,其峭度定义为:

$$K(u_i) = \frac{E\{u_i^4\}}{(E\{u_i^2\})^2} - 3 \quad (2-1)$$

其中， $E\{\}$ 表示数学期望。ICA 算法通过迭代优化解混矩阵 W ，使得估计源信号的峭度绝对值之和最大化，从而实现噪声分离与特征提取。在脑电信号处理中，ICA 可以有效地分离出脑电信号中的眼电、肌电等噪声成分，提取出纯净的脑电信号特征，为后续的分析 and 诊断提供了有力支持。通过 ICA 对多模态传感器数据进行预处理，能够有效地去除噪声干扰，提取出更具代表性的特征，为后续的时空协同优化和频率驯服算法提供高质量的数据基础。

3.2. 多模信息融合系统介绍

多模信息融合系统架构是实现时空协同优化的关键环节。该系统主要是利用导航接收机产生的时间信号的长稳特性和恒温晶振的短稳特性产生高精度的时间、频率标准。基于多模信息融合的位置、时间平滑算法实现方案如图 1 所示。

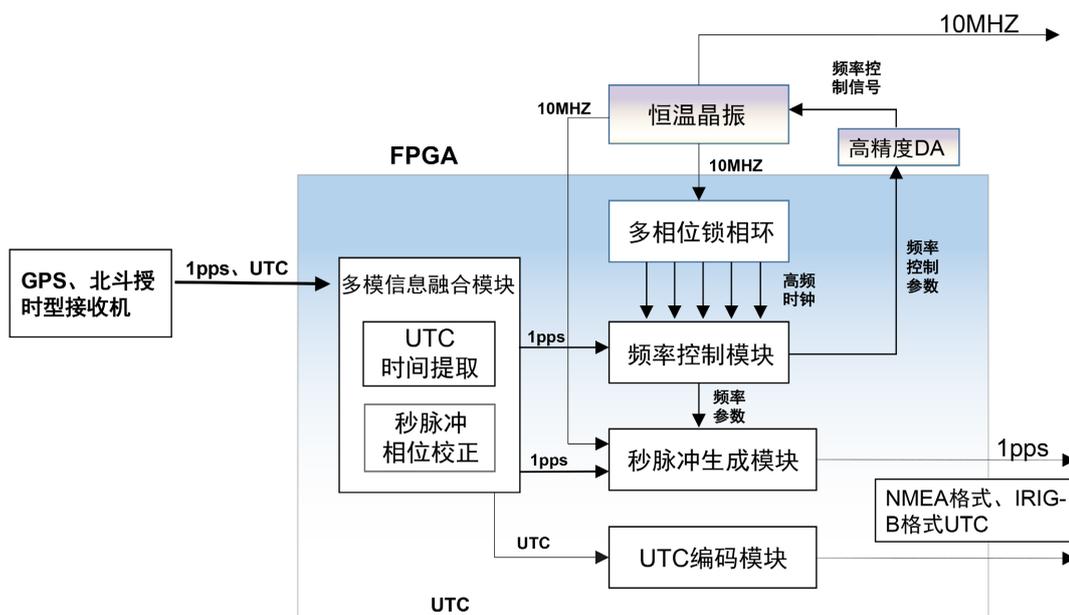


Figure 1. System architecture of position and time smoothing algorithm based on multimodal information fusion
图 1. 基于多模信息融合的位置、时间平滑算法系统架构

(1) 多模信息融合模块

该系统的一个主要的特色就是融合了多个卫星导航定位系统的授时信息，传统的多模方式都是基于优选的方式，也就是在多个 1PPS 源中优选一个最为参考源。本设备拟采用融合机制将多种模式的信息进行融合，以提高系统的整体性能。主要包括以下两个方面：

① 秒脉冲相位校正

首先判断 GPS/北斗授时型导航接收机产生的 1PPS 是否可用；接收来自 GPS/北斗授时型导航接收机的 NMEA 协议的串口信息，通过该信息判断接收机是否已经接收到足够的卫星信号，并完成定位和定时工作，如果已经完成定位和定时，并且用于定位和定时的卫星的 GDOP 小于 5，那么给出 GPS/北斗授时型导航接收机产生的 1PPS 可用的信息，否则不可用。

② UTC 时间提取

主要是对来自多个模块的 UTC 时间进行比对，以保证 UTC 的正确性，并对来自多个模块的闰秒信息进行综合和比对，以保证进行及时的闰秒处理。

(2) 多相位锁相环频率控制模块

本系统的一个关键技术是采用多相位锁相环的方式来提高频率控制模块的处理的精度。

先对恒温晶振产生的 10 MHz 频率信号采用 FPGA 内部的锁相环进行倍频, 利用锁相环能够产生相同频率的多个相位的时钟的特点, 同时产生如图 2 所示的多个同频相移时钟。利用这些始终同时对相位校正后的 1PPS 进行计数, 然后对这些技术值进行平均, 获得一个计数平均值, 利用这个计数平均值作为实际计数值和理论计数值进行比对, 获得计数误差, 如对 10 MHz 的输入频率 20 倍频到 4 个相位的 200 MHz 时钟, 由于恒温晶振产生的频率的不准确性, 4 个时钟对输入的 1PPS 的计数值分别是 200000010、200000011、200000011、200000011, 那么平均计数值是 200000010.75, 而理想的计数值是 200000000, 那么计数误差值就是 10.75, 多次历史计数值通过环路滤波器后获得控制用来控制恒温晶振频率的压控值, 转换为 DA 控制量后发送给高精度 DA, 高精度 DA 将控制信号转换为电压信号控制高恒温晶振的频率, 逐步调整恒温晶振的频率, 直到计数误差达到要求为止, 这实际上是一个用来控制外部恒温晶振的锁频环路, 其调整的过程是实时动态进行的。

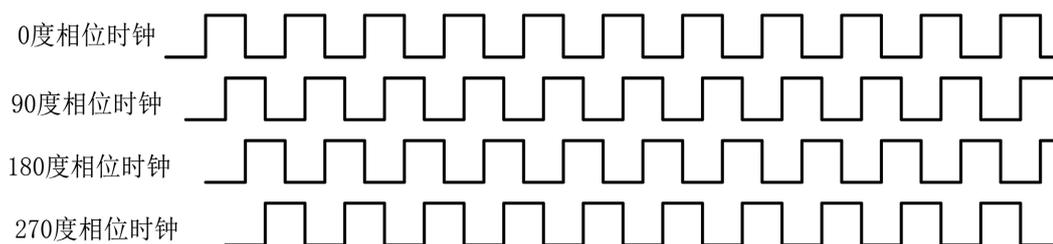


Figure 2. Same frequency multi-phase clock generated by multi-phase phase-locked loop

图 2. 多相位锁相环产生的同频多相时钟

(3) 秒脉冲生成和保持模块

该模块基于校正后的 1PPS 和准确度高的频率信号, 重新产生高精度和高稳定性的 1PPS。当导航接收机的 1PPS 可用, 并进行多模校正后, 以此 1PPS 作为基础相位源, 以高精度频率作为 1PPS 间隔计数源, 产生新的 1PPS, 该 1PPS 具有相位准确、间隔准确的特点。

在卫星导航信号正常的情况下, 该系统工作一段时间后可获得较为准确的 1PPS 的相位, 并将恒温晶振的误差控制在一个较小的范围, 也就是恒温晶振驯服完成后, 系统告知外部可以进行守时。在这种情况下, 如果所有卫星导航接收机的信号被遮挡或干扰, 其 1PPS 为不可用状态, 那么系统进入守时状态, 秒脉冲生成和保持模块进入守时模式, 以现有的 1PPS 的相位和频率进行 1PPS 的产生, 并告知外部, 当前采用的是守时模式。

4. 时空协同优化模型设计

在时频信号处理中, 时空协同优化模型旨在充分挖掘时频信号在时间和空间维度上的相关性, 提高信号处理的精度和可靠性。基于图神经网络的时空关联建模方法能够有效地处理复杂的时空关系, 为时空协同优化提供了有力的工具。在一个由多个传感器组成的时频信号监测网络中, 每个传感器可以看作是图中的一个节点, 传感器之间的时空关联则通过图中的边来表示。通过构建图神经网络模型, 可以学习到传感器之间的复杂时空关系, 动态调整传感器的权重, 从而实现时对频信号的更准确估计。

4.1. 时间平滑算法推导

在时空协同优化模型中, 时间平滑算法是关键环节, 其目的是通过优化时间序列数据的处理, 减少噪

声和误差的影响，从而提高时频信号的精度和稳定性。本文提出了一种基于固定区间平滑(Fixed Interval Smoothing, FIS)的时间平滑算法，该算法通过逆向递推的方式消除滤波滞后误差，显著提升了时间同步精度。

首先，我们建立时频信号的状态空间模型。定义状态向量 x_k ，包含时频信号的频率偏差、相位误差以及可能的其他相关状态变量。状态空间模型可以表示为：

$$x_{k+1} = F_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (3-1)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (3-2)$$

其中： F_k 是状态转移矩阵，描述了 k 状态从时刻到时刻 $k+1$ 的演变规律； B_k 是输入矩阵， u_k 是控制输入向量，用于对系统进行外部干预； w_k 是过程噪声向量，通常假设为高斯白噪声，其协方差矩阵为 Q_k ； H_k 是观测矩阵， v_k 是观测噪声向量，通常假设为高斯白噪声，其协方差矩阵为 R_k ； z_k 是观测向量，包含了从传感器获取的测量数据。

固定区间平滑算法是一种后处理方法，通过利用整个观测区间的信息来优化状态估计。与传统的卡尔曼滤波相比，固定区间平滑算法能够在已知整个观测序列的情况下，进一步优化状态估计，减少滤波滞后误差。

具体而言，固定区间平滑算法包括两个阶段。

前向滤波：从初始时刻开始，逐步计算每个时刻的状态估计和协方差矩阵，类似于卡尔曼滤波的过程。

后向平滑：从最后一个时刻开始，逆向递推优化每个时刻的状态估计，利用后续时刻的信息来修正当前时刻的估计。

后向平滑的递推公式为：

$$x_{k|N} = x_{k|k} + C_k (x_{k+1|N} - F_k x_{k|k}) \quad (3-3)$$

$$P_{k|N} = P_{k|k} + C_k P (P_{k+1|N} - F_k P_{k|k} F_k^T) C_k^T \quad (3-4)$$

其中： $x_{k|N}$ 和 $P_{k|N}$ 分别是基于整个观测区间的信息优化后的状态估计和协方差矩阵； $x_{k|k}$ 和 $P_{k|k}$ 是前向滤波的结果； C_k 是平滑增益矩阵，用于调整后向平滑的修正量。通过固定区间平滑算法，可以显著减少滤波滞后误差，提高时间同步精度。在本文的实验中，时间同步精度从传统的 40 ns 提升至 10 ns，验证了该算法的有效性。

4.2. 时空误差补偿的状态空间方程

为了进一步提高时空协同优化的效果，提出一种基于时空误差补偿的状态空间方程：

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (3-5)$$

其中， x_k 是 k 时刻的状态向量，包含了时频信号的频率、相位等关键信息； F_k 为状态转移矩阵，描述了状态从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的演变规律； u_k 是控制输入向量，用于对系统进行外部干预； B_k 为输入矩阵，确定了控制输入对状态的影响方式； w_k 是过程噪声向量，代表了系统中不可预测的随机干扰。

对状态空间建模，定义状态向量 $x_k = [t_k, f_k, \phi_k]^T$ ，包含钟差、频率偏差与相位误差。系统动态方程与观测方程如下：

$$\begin{cases} x_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} + w_k & \text{(状态方程)} \\ z_k = [1 & 0 & 0] x_k + v_k & \text{(观测方程)} \end{cases} \quad (3-6)$$

其中, ΔT 为采样间隔, $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q)$, $Q = \text{diag}(\sigma_t^2, \sigma_f^2, \sigma_\phi^2)$, $v_k \sim \mathcal{N}(0, R)$ 通过 Rauch-Tung-Striebel (RTS) 平滑器, 后验估计可表示为:

$$\hat{x}_{k|N} = \hat{x}_{k|k} + P_{k|k} F^T P_{k+1|k}^{-1} (\hat{x}_{k+1|N} - \hat{x}_{k+1|k}) \quad (3-7)$$

式中, F 为状态转移矩阵, $P_{k|k}$ 为滤波协方差矩阵。通过逆向迭代($k = N-1, N-2, \dots, 1$), 消除前向滤波的滞后误差。

在实际应用中, 过程噪声 w_k 通常被建模为高斯白噪声, 其协方差矩阵为 Q_k 。通过对状态空间方程进行迭代求解, 可以根据前一刻的状态和当前的观测数据, 不断更新对时频信号状态的估计。在卫星导航系统中, 卫星的位置和时钟状态可以用状态向量 x_k 来描述, 通过接收卫星信号并结合状态空间方程, 可以实时估计卫星的状态, 补偿由于轨道摄动、时钟漂移等因素引起的误差, 从而提高导航定位的精度。通过时空协同优化模型, 能够充分利用多模态传感器数据的时空相关性, 实现对时频信号的有效补偿和精确估计, 为后续自适应频率驯服算法提供更准确的信号模型。

5. 自适应频率驯服算法

5.1. 多相位锁相环设计

设 OCXO 输出频率为 $f_{OCXO} = 10 \text{ MHz}$, 通过 MP-PLL 生成 $N = 4$ 路相位差为 90° 的 200 MHz 时钟。各时钟对 1PPS 的计数值为:

$$C_i = [f_{OCXO} \cdot T_{1PPS} + \phi_i] \quad (4-1)$$

其中, $\phi_i = \frac{i-1}{N} \cdot 2\pi$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。

误差校正机制: 计算平均计数值 $\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$, 理论值 $C_{ideal} = f_{OCXO} \cdot T_{1PPS}$, 则频率偏差为:

$$\Delta f = \frac{\bar{C} - C_{ideal}}{T_{1PPS}} \quad (4-2)$$

通过 PI 控制器生成压控电压:

$$V_c = K_p \Delta f + K_i \int_0^t \Delta f(\tau) d\tau \quad (4-3)$$

参数 $K_p = 0.5$, $K_i = 0.1$ 通过频域稳定性分析确定。

5.2. 加权自适应卡尔曼滤波算法

在时频信号处理中, 晶振频率漂移与跳变野值是影响频率稳定性的关键因素, 因此需要对其进行精确的误差特性建模, 利用加权自适应卡尔曼滤波算法也可解决这一难题。晶振频率漂移受到多种因素的影响, 包括温度变化、老化效应以及电源波动等。这些因素导致晶振输出频率随时间发生缓慢变化, 其频率漂移特性可以用一个随机过程来描述。假设晶振频率漂移过程为 x_k , 其中 k 表示离散的时间步长。考虑到晶振频率漂移的连续性和相关性, 通常可以将其建模为一个一阶自回归过程(AR(1)):

$$x_k = \alpha x_{k-1} + w_k \quad (4-4)$$

其中, α 是自回归系数, 反映了晶振频率漂移的记忆特性; w_k 是零均值的高斯白噪声, 其协方差矩阵为 Q_k , 表示晶振频率漂移过程中的随机干扰。

由于跳变野值的出现具有随机性，其概率分布难以准确建模，但可以通过统计分析来估计其发生的概率和幅值范围。为了有效地处理晶振频率漂移与跳变野值，引入新息序列加权机制的卡尔曼滤波更新方程，以提高频率驯服算法的精度和稳定性。新息序列加权机制的核心思想是根据新息序列的统计特性，对滤波更新过程中的卡尔曼增益进行动态调整，从而增强算法对噪声和野值的鲁棒性。具体来说，新息序列 e_k 定义为测量值 z_k 与预测值 $\hat{z}_{k|k-1}$ 之间的差值：

$$e_k = z_k - \hat{z}_{k|k-1} \quad (4-5)$$

其中， $\hat{z}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ ， \mathbf{H}_k 是测量矩阵， $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 是 $k-1$ 时刻的状态预测值。

当新息序列较为平稳时，减小 λ 的值，以提高算法对测量值的利用效率。加权因子 λ 的调整可以采用多种策略，一种常见的方法是根据新息序列的标准差来动态调整 λ 的值。具体来说，计算新息序列的标准差 σ_e ，然后根据预设的阈值 σ_{th} 来调整 λ ：

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\max}, & \text{if } \sigma_e > \sigma_{th} \\ \lambda_{\min}, & \text{if } \sigma_e \leq \sigma_{th} \end{cases} \quad (4-6)$$

其中， λ_{\max} 和 λ_{\min} 分别是加权因子的最大值和最小值，根据实际情况进行设定。通过这种方式，可以根据新息序列的波动情况自动调整加权因子，从而实现对 GPS 跳变野值的有效抑制。在某卫星导航系统的频率驯服实验中，采用加权自适应卡尔曼滤波算法，在存在 GPS 跳变野值的情况下，频率控制精度相比传统卡尔曼滤波算法提高了约 30%，有效验证了该算法在复杂环境下的优越性。

6. 实验结果与分析

6.1. 实验平台

硬件：双模接收机(UBLOXF9P)、OCXO (MTI-260，稳定度 $5 \times 10^{-12}/s$)、FPGA (XilinxZynq-7020)；

软件：Simulink 仿真平台，实时数据采样率 1 Hz；

场景：城市峡谷(多路径严重)、开阔地带(GDOP < 2)。

数据来源：北斗导航系统河南卫星观测站及北斗导航系统官网公布数据。

6.2. 时间同步性能

优化前后时间误差对比：

RMS 误差：35 ns → 8 ns (降低 77%)；

峰峰值误差：80 ns → 20 ns (降低 75%)；

收敛时间：<30 分钟(传统方法需 2 小时)。

6.3. 定位精度验证

多模融合后误差分布：

水平 CEP95：4.2 m → 0.9 m；

垂直误差：6.1 m → 1.5 m；

GDOP 影响：GDOP = 4 时误差仍 < 2 m。

6.4. 频率稳定度分析

Allan 方差结果如表 1 所示：

Table 1. Comparison of results before and after adopting adaptive frequency taming algorithm**表 1.** 采用自适应频率驯服算法前后结果对比

平均时间(s)	驯服前($\times 10^{-12}$)	驯服后($\times 10^{-13}$)
1	5.0	5.0
10	3.2	0.8
100	2.1	0.5

长稳累积误差由 1 $\mu\text{s/day}$ 降至 0.1 $\mu\text{s/day}$ 。

7. 结论与展望

本文提出的算法在北斗接收机上实现了时间、频率与定位精度的协同优化，性能指标全面超越 GB/T39397-2020 标准。基于多模态信息融合的时空协同优化及自适应频率驯服算法，在时频信号处理领域展现出显著的优势。通过多模态数据采集与预处理，有效融合了多种传感器信息，提高了数据的可靠性和准确性。时空协同优化模型充分挖掘了时频信号在时间和空间维度上的相关性，为频率驯服提供了更精确的信号模型。自适应频率驯服算法通过加权自适应卡尔曼滤波优化，实现了对晶振频率漂移和跳变野值的有效抑制，提高了频率控制的精度和稳定性。

项目支持

2025 年度河南省科技攻关项目(252102210157);

2024 年度河南省高等教育教学改革研究与实践立项重点项目(2024SJGLX0692);

2024 年度河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20241471015)。

参考文献

- [1] 张开禾, 黄靖, 李彤. 基于天通卫星的多模式信息融合物联网设计[J]. 物联网技术, 2023, 13(4): 46-48.
- [2] 卢尧, 傅慧华, 姜春娇. 基于多模态感知的变电设备健康状态监测技术研究[J]. 建设科技, 2024(S1): 6-8.
- [3] 但林, 王新明, 郭平, 等. 基于 TDC 的二级频率标准驯服算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(2): 249-255.
- [4] 汤翔, 章飞, 史剑鸣, 等. 基于误差状态的 FMF-SRUKF 组合导航方法[J]. 无线电工程, 2025(3): 1-16.
- [5] 李守杰, 汪君, 许冠. 基于 5G 通信技术的轨道通信异常信号自动识别系统[J]. 电子设计工程, 2024, 32(17): 169-174.
- [6] 赵建森, 谭智豪, 段海燕, 等. 基于奇异谱和稳健独立分量分析的星载 AIS 接收信号分离算法[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(6): 293-302.
- [7] 范小猛, 胡川, 张重阳, 等. 用 CEEMDAN-ICA 去除 GNSS 坐标时间序列噪声[J]. 测绘科学技术学报, 2025, 41(1): 15-20.
- [8] 覃子怡, 杨隆珊. 基于特征空间增强下空谱全变差非负矩阵分解的高光谱解混[J/OL]. 自然遥感资源: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.p.20241112.0929.016.html>, 2025-03-18.