

文章编号: 1673-3193(XXXX)XX-0001-09

基于相干转发的地基导航定位系统的设计与实现

孟昭旭, 耿生群*, 赵河明, 宋慧波

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 独立组网的地基导航定位系统因基站采用低成本温补压控晶体振荡器(TCVCXOs)而导致了时钟漂移, 影响了定位与授时精度。本文基于相干转发技术原理, 设计了一种由主站与从站协同工作的地基导航系统架构。主站采用双频同步发射模式, 同时输出同步信号与定位信号, 且二者保持相干性。从站集成全双工收发功能模块, 其接收通道通过构建跟踪环路, 实现对主站同步信号的锁定。在此基础上, 从站根据主站同步信号与定位信号的相干映射关系, 在发射通道生成与主站定位信号完全同频同相的本地定位信号, 通过这种相干转发机制实现定位信号的同步。实际测试数据显示, 该方法能够有效地将主从站定位信号伪距观测测量差的峰峰值控制在 3.04 m 以内, 同时使同步信号脉冲延迟稳定在 8 ns, 该结果验证了所提方案在低成本时钟独立组网环境下的有效性和可靠性。

关键词: 地基导航系统; 跟踪环路; 相干转发

中图分类号: TH212

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.04.0016

引用格式: 孟昭旭, 耿生群, 赵河明等. 基于相干转发的地基导航定位系统的设计与实现[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.04.0016.

Meng Zhaoxu, Geng Shengqun, Zhao Heming, et al. Design and Implementation of a Ground-Based Navigation and Positioning System Based on Coherent Transponding [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.04.0016

Design and Implementation of a Ground-Based Navigation and Positioning System Based on Coherent Transponding

Meng Zhaoxu, Geng Shengqun*, Zhao Heming, Song Huibo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In standalone ground-based navigation and positioning networks, the use of low-cost temperature-compensated voltage-controlled crystal oscillators (TCVCXOs) at base stations introduces clock drift, degrading positioning and timing accuracy. To address this problem, a novel ground navigation system architecture is designed based on the principle of coherent forwarding, featuring collaborative operation between a master station and slave stations. The master station employs a dual-frequency synchronous transmission mode, simultaneously emitting synchronization signals and positioning signals that maintain mutual coherence. Each slave station integrates a full-duplex transceiver module. Its receiving channel establishes a tracking loop to achieve phase-locking with the master station's synchronization signals. Leveraging the coherent mapping relationship between the master's synchronization and positioning

收稿日期: 2025-04-22

作者简介: 孟昭旭(1999—), 男, 硕士生, 主要从事方向卫星导航方面的研究。

* 通信作者: 耿生群(1973—), 男, 博士, 主要从事方向信号与信息处理和卫星导航方面的研究。E-mail: 342983003@qq.com。

signals, the slave station's transmitting channel generates a local positioning signal that is frequency and phase synchronized with the master's positioning signal. This coherent forwarding mechanism ensures synchronization across the network. Experimental test results demonstrate that this approach effectively confines the peak-to-peak difference in pseudorange observations between master and slave stations to 3.04 meters, while stabilizing the synchronization millisecond pulse delay within 8 nanoseconds. This results validate the validity and reliability of the proposed architecture in low-cost, clock-independent networked environments.

Key words: ground-based navigation system; tracking loop; coherent transponding

0 引 言

全球导航卫星系统(GNSS)作为定位技术领域的成熟成果,依托近地轨道卫星星座,实现对地球及近地空间的连续覆盖。该系统提供全天候、高精度的定位与授时服务,在国防、航空航天、大地测量、搜救及科研等关键领域发挥着重要作用。然而,全球导航卫星系统仍然存在局限性。卫星信号在传播过程中容易受到复杂环境因素的干扰,如城市中的高楼大厦、地下隧道、室内等环境下,全球导航卫星系统由于信号覆盖和精度的局限性,难以满足实际需求。

地基导航定位系统作为一种区域定位导航方案,是在地面部署一系列具备通信和计算能力的基站,其发射信号的传播路径相对较短,受环境干扰较小,能够提供比卫星信号更强、更稳定的定位信号。这些基站不仅能够独立发射信号,而且能够相互接收和交换信息,为特定区域内的室内空间提供精确的定位服务^[1-4]。该技术的核心挑战之一在于确保各个基站之间实现高精度的时钟同步。时钟同步的精度受到晶振稳定性和信号传播延时的影响,而这些因素直接关系到定位解算中观测量的质量^[5-7]。在有线环境下,郑礼超等^[8]借助DSP使用自适应同步控制算法实现时钟同步。蒋伊琳等^[9]利用自然选择粒子群算法实现在无线网络的高精度时钟同步,但在多核环境下,该方法运行时间长,改善效果有限。Yu等^[10]为实现动态机载伪卫星与卫星导航系统标准时间之间的高精度双向时间同步,基于捷联惯性导航系统(SINS)短时高精度定位的特性,提出了一种基于位置补偿的方法。该方法采用卡尔曼滤波器对时间偏差与频率偏差进行联合估计,抑制动态环境下的同步误差累积,但该方法仅实现了辅助卫星导航的作用,无法做到独立组网。

Changdon Kee团队与斯坦福大学Bradford Parkinson合作,共同开发了室内异步伪卫星导航系统,首次验证了非同步组网条件下的高精度定位可行性^[11]。Locata公司提出了TimeLoc双向测距时间同步方法,能够为Locata系统各个基站之间提供纳秒同步精度,但该方法需利用双向通信以及载波整周模糊度等复杂算法才能够完成双向时钟同步^[12-13]。

当前地基导航系统的同步方式主要存在以下局限:一是有线同步方式虽精度较高,但部署成本高,灵活性差;二是现有无线同步方案多依赖额外监控站或采用复杂的同步算法,导致系统结构复杂,实现成本高昂。

本文提出一种基于相干转发的无线主从同步新方法,在无需部署线缆、不依赖监控站的情况下,使得整个系统基站所发出的定位信号时刻保持在同一码相位,以减小非同源时钟抖动引起的误差,接收机利用伪距定位即可达到米级精度。该方案中的主站发射具有相干性的同步信号和定位信号,从站通过所设计的跟踪环路对主站同步信号解析,以生成从站定位信号,使得两信号的扩频码相位时刻保持一致。此外,为提升系统观测量的精度,本方案的地基导航定位系统信号采取QPSK调制方式调制了低速率码和高速率码。低速率码可以使得从站快速捕获信号,高速率码可以提升跟踪环路精度。同时,在从站跟踪环路上添加alpha-beta滤波算法进行环路优化以提高其观测量的稳定性,从而为定位解算提供稳定且可靠的观测量。本方法无需建立额外的监测站辅助地基导航系统的时钟同步,也无需载波相位同步,因而降低了载波相位周期的模糊性所造成的解算复杂度,其定位精度可满足大部分应用场景。

地基导航定位系统是一个由伪卫星基站独立组网的定位系统,与GPS不同,因为伪卫星是布设于地面的,所以其坐标是固定不变的。如图1

所示,独立组网伪卫星定位系统由3个伪卫星基站组成,其中一个伪卫星基站作为主站,另外两个站作为从站。各个伪卫星基站的工作时钟都由独立时钟源提供,伪卫星基站在时钟脉冲的驱动下,连续向定位区域的用户接收机发送无线定位信号,发射的定位信号由载波、扩频码和数据码组成。用户接收机通过测量信号到达自身位置的时间来测距以确定所处的位置坐标^[14]。这种定位方式需要测量信号从已知位置的发射器发出直至到达用户所经历的时间,然后将这个传播的时间乘以信号的传播速度,便得到了从发射基站到接收机之间的距离。

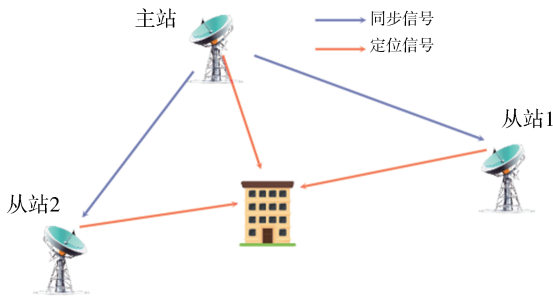


图1 地基导航定位系统布局

Fig. 1 Schematic diagram of ground-based navigation and positioning system

地基导航定位系统中,各个基站会受到非同源时钟的影响,引起各个伪卫星基站定位信号之间的非相干性,即定位信号彼此之间的相位和频率不一致。时间上的微小差异会导致距离计算上的较大误差。例如,在利用伪距定位时,1 μ s的误差就会导致约300 m的距离误差。因此,本系统利用相干转发的同步机制,使得主站定位信号与从站定位信号具有相干性,从而达到基站间的相干同步。

1 相干转发的设计及实现

1.1 信号结构

地基导航定位系统采用由载波、扩频码与导航电文三层要素构成的复合信号结构。信号分为同步信号 S_{sync} 和定位信号 S_{pos} 两个信号。 S_{sync} 和 S_{pos} 的中频基带信号结构一致,都是将C/A码、P码、D码调制在中频载波上。其中,C/A码速率1.023 MHz,共1 023个码元。P码速率10.23 MHz,共10 230个码元。D码为 ± 1 的导航电文数据码,其速率为50 Hz。通过QPSK调制生成同步基带信号和定位基带信号后,射频模块将其分别调制到1 575.42 MHz和1 227.6 MHz,得到最终的 S_{sync} 和 S_{pos} 。

$$\begin{cases} S_{\text{sync}} = AC_i(t)D_i(t)\cos[2\pi f_{\text{sys}}t + \varphi_i(t)] = \\ \quad -AP_i(t)D_i(t)\sin[2\pi f_{\text{sys}}t + \varphi_i(t)], \\ S_{\text{pos}} = AC_i(t)D_i(t)\cos[2\pi f_{\text{pos}}t + \varphi_i(t)] = \\ \quad -AP_i(t)D_i(t)\sin[2\pi f_{\text{pos}}t + \varphi_i(t)], \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{sys} 和 f_{pos} 分别为同步信号载波和定位信号载波; $C_i(t)$ 为第 i 个伪卫星基站的C/A码码元; $P_i(t)$ 为第 i 个伪卫星基站的P码码元; $\varphi_i(t)$ 为信号的载波初始相位; $D_i(t)$ 为导航电文。

1.2 相干转发

地基导航定位系统相干转发流程如图2所示。主站受同源时钟驱动,同时发射具有相干性的主站定位信号与同步信号。其中,为避免主站发射的同步信号与定位信号之间相互干扰,本系统采用了频分复用的方式。通过射频模块将主站的同步信号和定位信号变频至两个不同的频点,确保从站在解调主站同步信号(或接收机在解调主站定位信号)时,不会受到另一个信号的干扰,从而确保了信号解调的准确性和系统的稳定运行。

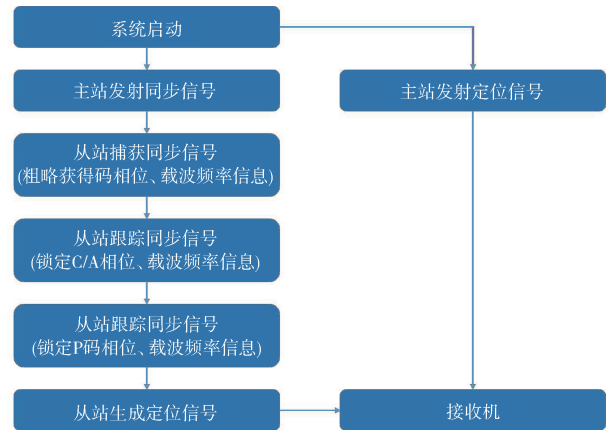


图2 相干转发流程图

Fig. 2 Coherent transponding flow diagram

图3中,主站定位信号和同步信号均是由主站基带板生成且信号结构一致的5.42 MHz中频信号,经过射频模块上变频至1 575.42 MHz和1 227.6 MHz的高频信号。从站通过其接收天线接收来自主站的同步信号。该信号经由射频前端处理后转换为中频信号。由于时钟本身存在频偏,所以在从站对主站同步信号进行捕获与跟踪处理后,会得到主站时钟引起的频偏 f_1 和从站时钟引起的频偏 f_2 。同时,从站还会得到主站同步信号的扩频码相位。由于主站的同步信号与定位信号具有相干性,从站通过获取同步信号的相位和频率信息,即可获得定位信号的相应信息。基于

此相位和频率信息,从站结合自身的扩频码和导航电文,生成并发射从站定位信号。主站与从站

所发射的定位信号在相位和频率上保持完全一致,实现了系统的同步发射。

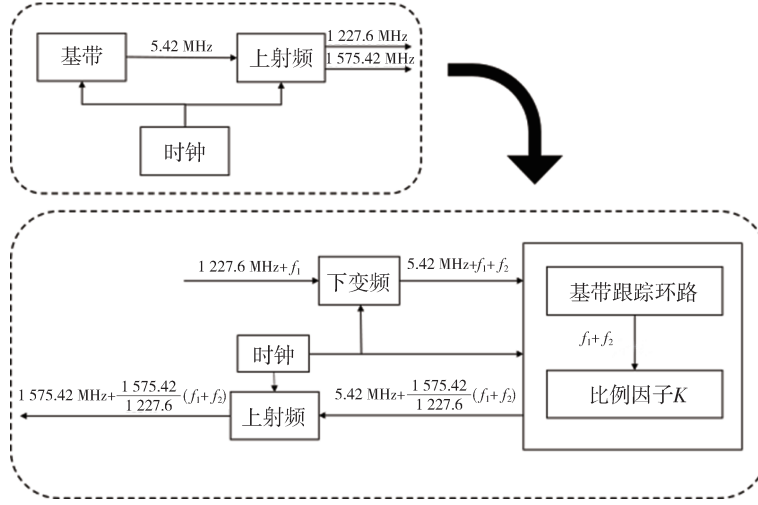


图3 信号生成示意图

Fig. 3 Signal generation illustration

1.3 跟踪环路

信号跟踪环路由伪码跟踪环和载波环构成,如图4所示。

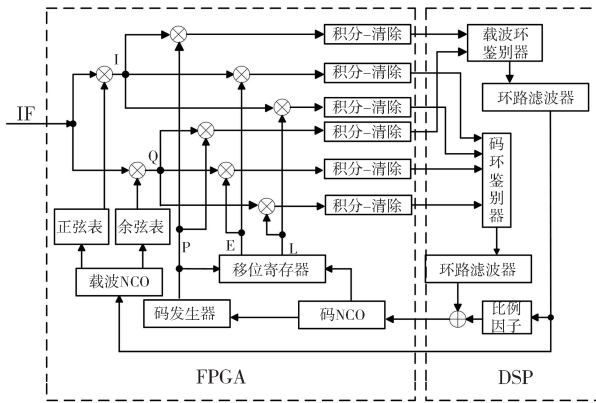


图4 跟踪环路结构图

Fig. 4 Architectural diagram of tracking loop

首先对中频信号进行载波剥离和伪码解扩,其中本地码发生器生成即时码,并且通过移位寄存器分别生成超前码和滞后码。伪码解扩后进行积分清除,相当于进行低通滤波,滤掉混频后的高频分量。然后将其结果送入码环鉴别器和载波环鉴别器进行误差鉴别。码环鉴别器只需超前和滞后两条支路即可对码相位进行误差鉴别,而载波环鉴别器仅需要即时支路进行误差鉴别^[15-17]。

不考虑噪声影响,数字中频信号可表示为

$$S_{IF}(t) = AC(t - \tau)D(t - \tau)\cos[\omega_{IF}t + \varphi(t)], \quad (2)$$

式中: A 为信号幅值; $C(t)$ 为 C/A 码; τ 为信号传递过程中的时间延迟; $D(t)$ 为导航电文比特; ω_{IF} 为数字中频信号频率; $\varphi(t)$ 为初始载波相位。

超前和滞后支路在经过积分清除后,结果为

$$\begin{cases} I_{ES}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n) - d) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\cos\theta(n), \\ Q_{ES}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n) - d) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\sin\theta(n), \\ I_{LS}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n) + d) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\cos\theta(n), \\ Q_{LS}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n) + d) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\sin\theta(n), \\ I_{PS}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n)) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\cos\theta(n), \\ Q_{PS}(n) = AD(n)R(\Delta\tau(n)) \cdot N\text{sinc}\left(\frac{N\Delta\omega_d}{2}\right)\sin\theta(n), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau(n)$ 表示码相位差; $R(\cdot)$ 表示伪码自相关函数; $\Delta\omega_d$ 表示多普勒频差; $\theta(n)$ 表示本地载波信

号和输入信号的相位差; d 表示超前(滞后)码片数; N 表示积分清除器的积分点数。

码环鉴别器采取归一化的非相干超前减滞后功率鉴相器^[18]。归一化可以避免在数字相关积累后再增加一个自动增益控制器,同时能有效减少脉冲干扰的影响。归一化的非相干超前减滞后功率鉴别器算法表示为

$$e_k = \frac{I_{ES}^2 + I_{LS}^2 - Q_{ES}^2 - Q_{LS}^2}{I_{ES}^2 + I_{LS}^2 + Q_{ES}^2 + Q_{LS}^2} \quad (4)$$

载波跟踪环路可分为频率跟踪环和相位跟踪环。频率跟踪环的跟踪动态范围比相位环大,不容易出现失锁情况。通常情况下,在捕获转跟踪的过程中,对输出信号的跟踪仍然处于粗跟踪状态,而相位跟踪环对输入信号和本地载波的相位差要求比较严苛。因此,在实际场景中,通常先使用频率跟踪环将输入信号和本地载波的频率差缩小至一定范围,即频率牵引,然后由相位跟踪环对输入信号做环路跟踪。

载波环鉴别器分为鉴频器和鉴相器,如图5所示。其中,鉴频器采用四象限反正切鉴频器,鉴相器采用二象限反正切鉴相器。

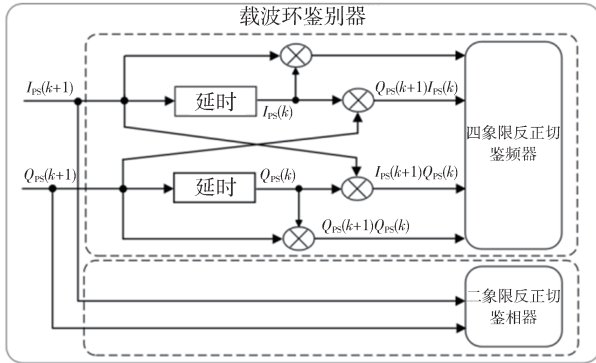


图5 载波环鉴别器示意图

Fig. 5 Schematic of carrier tracking loop discriminator

鉴频器误差算法为

$$\begin{cases} e_f = \frac{\arctan 2(Cross, Dot)}{T_{k+1} - T_k}, \\ e_p = \arctan 2(Q_{PS}, I_{PS}), \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 表示积分器的输出时间间隔; $Cross$ 表示点乘; Dot 表示叉乘。具体表达为

$$\begin{cases} Cross = I_{PS}(k)I_{PS}(k+1) + Q_{PS}(k)Q_{PS}(k+1), \\ Dot = I_{PS}(k)Q_{PS}(k+1) - Q_{PS}(k)I_{PS}(k+1). \end{cases} \quad (6)$$

鉴频器和鉴相器均做最大似然估计,在高信噪比和低信噪比时均保持良好的鉴频(鉴相)特性,其斜率与信号幅值无关,受信号幅值影响不大。

码环和载波跟踪环路的滤波器选择二阶环路滤波器,用于消除频率阶跃引起的稳态误差,确保相位锁定在零误差状态,其结构如图6所示。

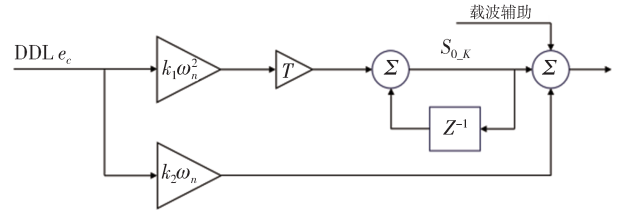


图6 二阶环路滤波器

Fig. 6 Second-order loop filter

二阶环滤波器传递函数为

$$\Phi(Z) = \frac{1}{K} \left(2\xi\omega_n + \frac{T\omega_n^2}{1-Z^{-1}} \right), \quad (7)$$

式中: K 为环路增益; ξ 为阻尼系数; ω_n 为环路滤波器的自然圆频率; $k_1 = 1/K$, $k_2 = 2\xi/K$ 。自然圆频率是由环路噪声带宽所决定的,表达式为

$$B_L = \frac{\omega_n}{2} \left(\xi + \frac{1}{4\xi} \right). \quad (8)$$

假设 ω_n 为定值,通常取阻尼系数 $\xi = 0.707$,使得环路噪声带宽达到最小值。

从站通过跟踪环路计算得到因主从站非同源时钟引起的频率差。因此,从站可以得到主站定位信号的准确的载波频率以及码速率,从而在本地生成与其载波频率、扩频码相位和码速率一致的从站定位信号。

以二阶锁相环为例,其输出结果为频率差 Δf_{PLL} 。修正频率控制字得到新的频率控制字为

$$W_{PLL}(k+1) = W_{PLL}(k) + \frac{\Delta f_{PLL} \times 2^N}{f_{clk}}, \quad (9)$$

式中: k 为环路更新序号; W_{PLL} 为理想中频载波控制字; N 为FPGA中相位累加器的位宽数; f_{clk} 为FPGA载波生成模块的工作时钟。

计算得出主站同步信号与本地同步信号的频差后,需根据主站同步信号和主站定位信号的频率关系推算出主站定位信号与本地定位信号的频差,对式(9)调整后可得

$$W_{PLL}(k+1) = W_{PLL}(k) + \frac{\Delta f_{PLL} \times 2^N}{f_{clk}} \times \frac{1575.42}{1227.6}. \quad (10)$$

同理,得到更新的C/A码频率控制字和P码频率控制字,表示为

$$\begin{cases} W_{\text{DLL-P}}(k+1) = W_{\text{DLL-P}}(k) + \frac{\Delta f_{\text{DLL-P}} \times 2^N}{f_{\text{clk}}}, \\ W_{\text{DLL-C/A}}(k+1) = W_{\text{DLL-C/A}}(k) + \frac{\Delta f_{\text{DLL-C/A}} \times 2^N}{f_{\text{clk}}}, \end{cases} \quad (11)$$

式中: $W_{\text{DLL-P}}$ 为 P 码频率控制字; $W_{\text{DLL-C/A}}$ 为 C/A 码频率控制字; $\Delta f_{\text{DLL-P}}$ 为 P 码码环输出的频率修正量; $\Delta f_{\text{DLL-C/A}}$ 为 C/A 码码环输出的频率修正量。

1.4 环路优化

考虑到本系统的主站和从站固定不动, 从站跟踪环路计算得出的频率偏差是由非同源时钟引起的, 未受相对运动引起的多普勒频率的影响。主站和从站的非同源时钟之间的存在固定频偏, 并在这一固定频偏基础上抖动。因此, 调整从站跟踪环路, 使二阶环路滤波器输出的结果经过 alpha-beta 滤波器做平滑处理, 以减少噪声影响。

以二阶锁相环配合 alpha-beta 滤波器为例, alpha-beta 滤波器状态方程为

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + T \cdot \hat{\omega}(k-1) + \\ \quad \alpha \cdot (\theta_e(k) - \hat{\theta}(k-1)), \\ \hat{\omega}(k) = \hat{\omega}(k-1) + \frac{\beta}{T} \cdot (\theta_e(k) - \hat{\theta}(k-1)), \end{cases} \quad (12)$$

式中: k 为第 k 次的状态; $\hat{\theta}(k)$ 为平滑后的估计相位; $\hat{\omega}(k)$ 为平滑后的角速度; $\theta_e(k)$ 为二阶锁相环输出的相位误差; T 为采样周期; α 和 β 为滤波器系数, 可依据典型设计公式确定。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{8\zeta}{4\zeta + 1}, \\ \beta = \frac{4\zeta^2}{4\zeta + 1}, \end{cases} \quad \zeta = 0.707, \quad (13)$$

计算可得, $\alpha \approx 1.17$, $\beta \approx 0.64$ 。

在环路初次工作时, 假设 $\hat{\theta}(0) = \theta_e(0)$, $\hat{\omega}(0) = 0$ 。随后根据状态方程更新得到平滑后的相位和频率变化率。以此计算新的载波频率控制字

$$W_{\text{PLL}}(k+1) = W_{\text{PLL}}(k) + \frac{\hat{\omega}(k) \times 2^N}{2\pi \times f_{\text{clk}}} \times \frac{1575.42}{1277.6}。 \quad (14)$$

2 试验验证

本节试验采用测量主从站伪距差和主从站毫秒脉冲同步延迟两种方案, 以验证采用相干转发原理的同步方案的可行性以及相关性能。

2.1 主从站伪距观测量

试验选择两个非同源时钟的基站和一个接收机进行同步实验测试, 如图 7 所示。

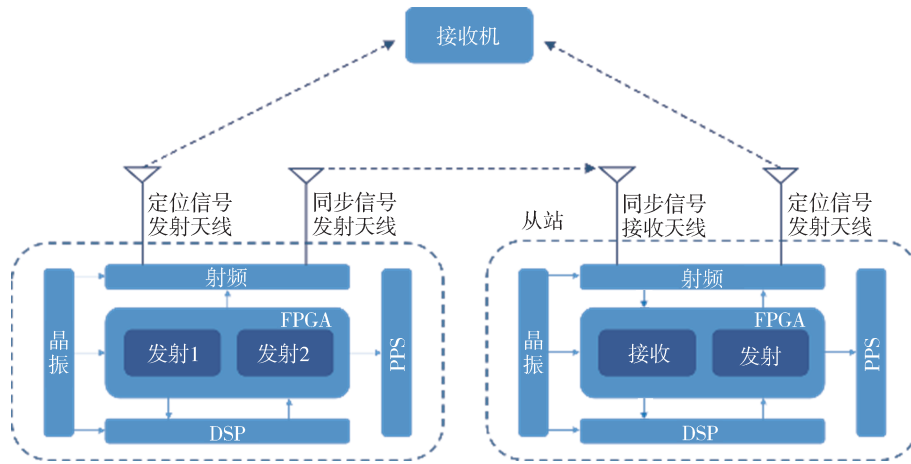


图 7 伪距观测量抖动测试硬件连接图

Fig. 7 Schematic diagram of pseudorange observation jitter test

其中, 一个基站作为主站发射同步信号和定位信号, 另一个基站则作为从站接收并解析主站同步信号, 然后生成本地定位信号。

接收机同时对两个基站进行捕获跟踪, 以 1 Hz 的频率输出两个基站定位信号的伪距观测量, 具体参数如表 1 所示。

接收机分别对主站定位信号和从站定位信号进行 C/A 码跟踪稳定后, 以 1 次/s 的速度输出伪距观测量。如图 8(a) 所示, 对两个基站的 C/A 码的伪距观测量做差, 其 C/A 码观测量差基于 0 m 抖动, 峰峰值为 5.77 m。在 C/A 码跟踪环路加入 alpha-beta 滤波后, 如图 8(b) 所示, C/A 码伪距

观测量抖动幅值减小,峰峰值为4.34 m,伪距观测量精度提升1.426 m。在从站的转发设计中,C/A码跟踪环路稳定后会通过P码跟踪环路锁定主站同步信号。理论上,P码码长小于C/A码码长,具有更高的精度。

表1 技术参数
Tab. 1 Technical parameters

参数	数值
同步信号发射频段/MHz	1 575.42
定位信号发射频段/MHz	1 227.6
信号输出功率/dB	0
信号传播距离/m	200~300
数据更新频率/Hz	1
主站坐标/m	(0,0,0)
从站坐标/m	(-273.44,-405.32,0)
接收机坐标/m	(-288.82,-211.66,0)

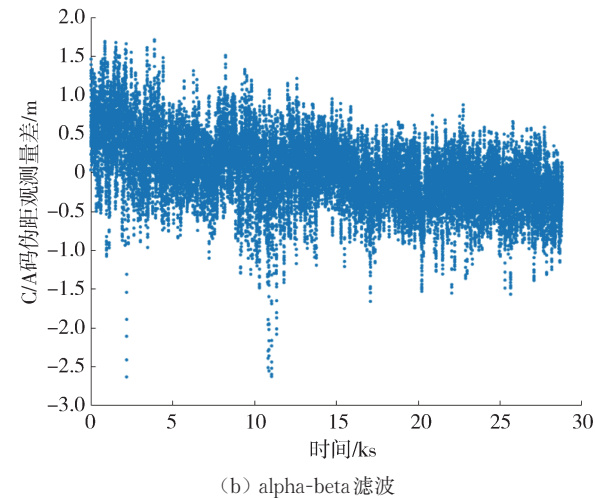
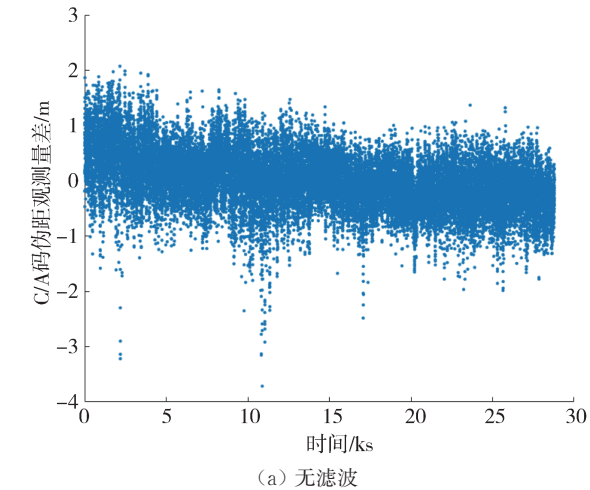


图8 C/A码伪距观测量差

Fig. 8 Pseudorange observation of C/A code

如图9所示,P码伪距观测量差的峰峰值为3.19 m。同时,在加入alpha-beta滤波后,P码伪距观测量差的峰峰值为3.04m。可见P码的分辨率高于C/A码, α - β 滤波的滤波效果对精度提升的

影响较小。

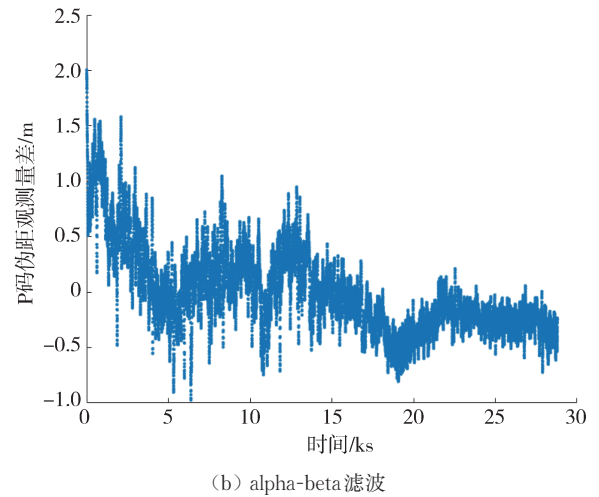
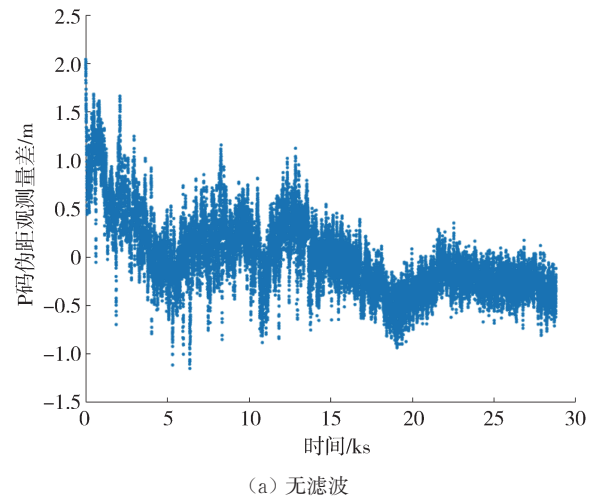


图9 P码伪距观测量

Fig. 9 Pseudorange observation of P-code

2.2 毫秒脉冲同步

毫秒脉冲,即每毫秒生成一次脉冲。其根据扩频码周期产生,在每一次扩频码周期的起点,产生一个脉冲。主站的1 ms脉冲根据主站扩频码周期产生。从站在解析主站同步信号后,在根据其载波频率、扩频码速率和扩频码相位产生从站定位信号的同时,根据从站定位信号的扩频码周期产生1 ms脉冲。主从站毫秒脉冲的相位差同样可以反映相干转发的精度。

本试验选择两个非同源时钟的主从基站和示波器进行毫秒脉冲同步测试,如图10所示。在软件设计上,主从基站的基带信号模块FPGA选择相同的片内路径对1 ms脉冲信号进行输出。在硬件上,利用等长的信号连接线分别将主从基站的1 ms信号接入数字示波器进行观察。

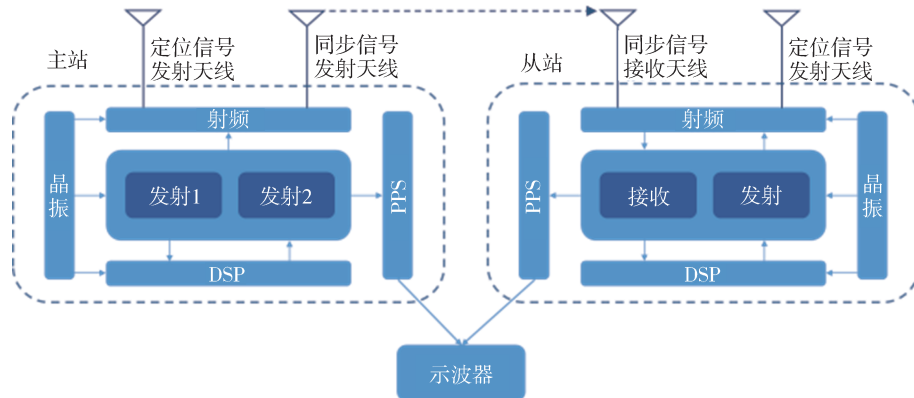


图 10 毫秒脉冲测试示意图

Fig. 10 Schematic diagram of millisecond pulse test

利用示波器对主站和从站发送的毫秒脉冲信号进行观测,结果如图 11 所示,其中,黄色的脉冲信号为主站生成的毫秒脉冲信号,蓝色的脉冲信号为从站相干转发后生成的毫秒脉冲信号。

秒脉冲相差 8 ns,延迟减小了 4 ns。

3 结 论

本文设计并验证了一种基于相干转发原理的地基定位系统。本文的核心创新在于提出了一种新型的无线同步架构,利用相干转发技术实现从站对主站信号的自主同步,避免了传统有线同步对第三方监控站的依赖,显著提升了系统部署的灵活性与独立性。在此基础上,通过引入 α - β 滤波算法对观测量进行优化,进一步将伪距观测量差稳定在 3.04 m,同步毫秒脉冲时延稳定在 8 ns。实验结果表明,该方案在实现结构简化的同时,具备高可靠性与实用潜力,为后续定位应用提供了有效的技术基础。

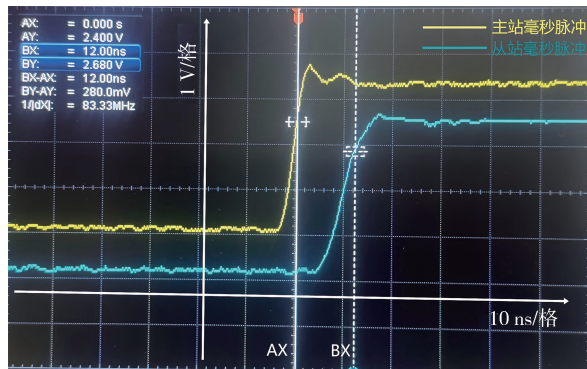
利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

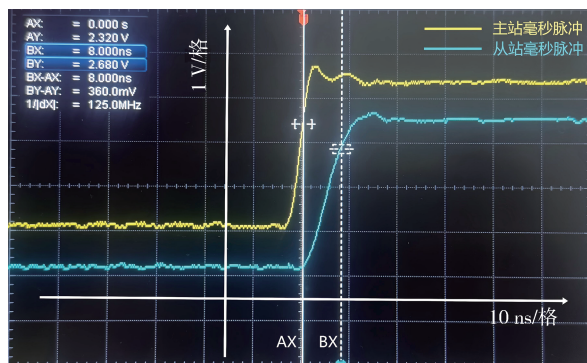
All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] LIU J, ZHAO X L, CAI B G, et al. Pseudolite constellation optimization for seamless train positioning in GNSS-challenged railway stations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 13636-13654.
- [2] 陈锐志, 郭光毅, 陈亮, 等. 室内高精度定位技术研究应用现状与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1591-1600.
CHEN Ruizhi, GUO Guangyi, CHEN Liang, et al. Application status, development and future trend of high-precision indoor navigation and tracking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10): 1591-1600. (in Chinese)



(a) 无滤波



(b) alpha-beta滤波

图 11 主从站毫秒脉冲延迟结果

Fig. 11 Results of millisecond pulse delay

由图 11(a) 可以看出,仅使用二阶环路跟踪转发主站信号,主站和从站生成的毫秒脉冲相差 12 ns,即从站进行相干转发后生成的定位信号与主站定位信号的码相位相差 12 ns。由图 11(b) 可以看出,使用alpha-beta滤波器对二阶环路滤波后的误差信号进行平滑,使得主站和从站生成的毫

- [3] 王雷,倪少杰,王飞雪. 地基增强系统发展及应用[J]. 全球定位系统, 2014, 39(4): 26-30.
WANG Lei, NI Shaojie, WANG Feixue. Development and applications of GPS ground-based augmentation system[J]. GNSS World of China, 2014, 39(4): 26-30. (in Chinese)
- [4] 张琳. 基于多技术融合的室内外无缝定位系统研究[J]. 长江信息通信, 2024, 37(4): 210-213.
ZHANG Lin. Research on a seamless indoor and outdoor seamless positioning system based on multi-tech integration[J]. Changjiang Information & Communications, 2024, 37(4): 210-213. (in Chinese)
- [5] 代培培,王腾飞,姚铮,等. GNSS接收机晶振频率稳定度仿真分析[J]. 导航定位学报, 2023, 11(4): 90-96.
DAI Peipei, WANG Tengfei, YAO Zheng, et al. Simulation analysis on frequency stability of crystal oscillator in GNSS receivers[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11(4): 90-96. (in Chinese)
- [6] 贾丽娜,彭慧丽,于德江,等. 高稳晶振短期频率稳定度的仿真分析[J]. 宇航计测技术, 2021, 41(3): 27-33.
JIA Lina, PENG Huili, YU Dejiang, et al. Simulation of stability analysis of high stable crystal oscillator[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021, 41(3): 27-33. (in Chinese)
- [7] 刁文婷,郑戈,王冬冬. 星载晶振短稳对导航增强系统PPP精度的影响分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 31-39.
DIAO Wenting, ZHENG Ge, WANG Dongdong. Analysis of impact of crystal oscillator short stability on PPP accuracy of navigation enhancement system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 31-39. (in Chinese)
- [8] 郑礼超,赵文龙,欧阳明长. 基于DSP高精度时钟同步系统设计[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017, 31(1): 91-98.
ZHENG Lichao, ZHAO Wenlong, OUYANG Mingchang. Design of high precision clock synchronization system based on DSP[J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2017, 31(1): 91-98. (in Chinese)
- [9] 蒋伊琳,张芳园. 基于自然选择粒子群的时钟同步算法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 593-599.
JIANG Yilin, ZHANG Fangyuan. Clock synchronization algorithm based on particle swarm optimization with natural selection[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 593-599. (in Chinese)
- [10] YU F, SHI H Q, LU H. Research on dynamic two-way time synchronization for air-borne pseudo-satellite in wide area for BD navigation satellite[C]//Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, 2015: 1477-1482.
- [11] KEE C, JUN H, YUN D, et al. Development of indoor navigation system using asynchronous pseudolites[C]//Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000), 2000: 1038-1045.
- [12] SMALL D. Method and device for chronologically synchronizing a kinematic location network: US01032419B2[P]. 2019-06-18.
- [13] MONTILLET J P, ROBERTS G W, HANCOCK C, et al. Deploying a locata network to enable precise positioning in urban canyons[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83: 91-103.
- [14] LUO M, LONG Y, XIONG Y Z, et al. Consistent and accurate TDOA localization in dynamic NLOS environments via prior information independent estimation [J]. China Communications, 2024, 21(9): 198-210.
- [15] 洪冰清. 高灵敏度GNSS软件接收机关键技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [16] 杨阳. 基于FPGA和DSP的GNSS软件接收机设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [17] 孙田伟,钟兴旺,踪念科,等. 基于卡尔曼滤波的时分星间信号跟踪技术研究[J]. 空间电子技术, 2023, 20(3): 67-72.
SUN Tianwei, ZHONG Xingwang, ZONG Nianke, et al. Research on tracking technology of time division intersatellite signal based on Kalman filter[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(3): 67-72. (in Chinese)
- [18] 鲁郁. 北斗/GPS双模软件接收机原理与实现技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.