

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412840

基于载波相位的视距内动态无线时间 比对关键技术研究*

张颖博^{1,2}, 刘音华^{1,2,3}, 刘 娅^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 张吉峰⁴

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院大学 北京 101408; 3. 时间基准及应用重点实验室
(中国科学院) 西安 710600; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所 北京 100081)

摘要:针对视距内动态时间比对用伪距观测量解算钟差噪声较大的问题,用载波相位观测量可以大幅度减小解算钟差的噪声,但载波相位存在求解整周模糊度和周跳等问题。本文首先研究了双向伪距和载波相位测量原理以及配对解算钟差的方法,并提出了一种采样提取双向载波相位观测量的新方法,减小了双向载波相位因采样时刻不一致导致的链路非对称对钟差测量结果的影响。针对载波相位双向时间比对中整周模糊度的求解和周跳探测与修正2个技术难点,用改进的伪距法估算整周模糊度,并用卡尔曼滤波实时的探测修正周跳。最后搭建车载试验平台验证动态时间比对效果,载波相位相较于伪距双向时间比对的精度提升了71.3%,测量钟差的均方根误差达到了百皮秒量级。

关键词: 动态时间比对; 伪距; 载波相位; 整周模糊度; 卡尔曼滤波

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1025

Study on dynamic wireless time comparison technology for visual range based on carrier phase

Zhang Yingbo^{1,2}, Liu Yinhua^{1,2,3}, Liu Ya^{1,2,3}, Li Xiaohui^{1,2,3}, Zhang Jifeng⁴

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 4. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Carrier phase observations can significantly reduce noise and address substantial clock bias noise that pseudo-range observations alone cannot resolve. However, carrier phase measurements face challenges with whole-cycle ambiguities and cycle slips. This paper explores the principles of bidirectional pseudo-range and carrier phase measurements and the methods for calculating clock bias. It proposes a new approach for sampling and extracting bidirectional carrier phase observations to mitigate the effects of link asymmetry due to inconsistent sampling times on clock bias measurement results. To address the technical challenges of whole-cycle ambiguity resolution and cycle slip detection and correction in bidirectional carrier phase time comparison, an improved pseudo-range method is used to enhance ambiguity estimation accuracy, while a Kalman filter is employed for real-time cycle slip detection. A vehicle-mounted test platform was developed to validate the dynamic time comparison performance. Compared to pseudo-range bidirectional time comparison, the carrier phase bidirectional time comparison improves accuracy by 71.3%, with the root-mean-square error of the measured clock bias reaching the order of hundreds of picoseconds.

Keywords: dynamic time comparison; pseudo-range; carrier phase; integer ambiguity; kalman filtering

收稿日期: 2024-05-15 Received Date: 2024-05-15

* 基金项目: “基于北斗卫星的标准时间精准服务关键技术研究团队”“西部交叉团队”重点实验室项目(xbzb-zdys-202120)、中国铁道科学研究院院基金项目(2022YJ244)资助

0 引言

现代化军事战场具有高机动性和高协同性等特点。例如导弹发射车和舰船等地面机动平台为了实现区域内协同作战,必须解决站点间高精度、高可靠的相对时间同步。且时间同步系统必须具有动态适应性,不依赖卫星自主运行等能力。

纳秒级别时间比对技术包括光纤时间比对技术、卫星双向时间比对技术和卫星共视时间比对。光纤时间同步技术虽然精度高,但是由于线路的限制,无法在移动目标间进行时间同步^[1-2]。卫星双向法可以实现纳秒甚至亚纳秒级别的高精度时间比对,但搭建卫星双向时间比对系统成本高^[3]。卫星共视法需要提前标定坐标,导致动态实时时间比对性能恶化^[4-5]。传统的高精度时间比对技术大多针对静态环境,因此需要满足动态需求的时间比对技术。

伪距双向时间比对具有实时性,且精度达到纳秒级别,现阶段大多使用伪距双向法实现高精度动态时间比对。文献[6]研究了基于伪噪声(pseudo-noise, PN)码测距实现站点间高精度动态时间比对,并通过扩展卡尔曼滤波对测量的钟差进行平滑,经过仿真验证了该技术达到了纳秒级别的精度并具有较强的抗干扰能力。文献[7]通过精准时间协议实现运动的无人机平台之间双向时间同步,但受到无人机运动的影响导致双向链路非对称使得钟差估计误差达到数十纳秒。文献[8]提出了基于双向信息交换框架的闭环最大似然估计器来实现无人机之间的时间同步,通过估计结果补偿高动态无人机网络跟踪算法中时钟参数的变化,经过仿真,该算法与仅用时间戳双向信息交换算法相比,提高了时间同步的精度并降低了计算复杂度,但并未给出实际测量效果。

现阶段动态时间比对技术存在精度低,缺少实际测量结果等局限性。本文采用载波相位提高动态无线时间比对的精度。

运动状态下伪距无线时间比对由于受到复杂多变的多径效应影响^[9],接收信号功率突变可能使得伪距观测量出现十几纳秒的波动。此外,站点高动态时多普勒效应伪距观测量的噪声约2~5 ns。相对伪距测量,载波相位观测量具有更高的分辨率^[10]。但是求解整周模糊度的算法较为复杂,信号传输链路被遮挡、站点运动、信噪比较低时可能会产生一到数十周的周跳,对双向时间比对的精度影响高达数十纳秒。双向载波相位观测量在配对解算钟差时,双向观测量不能同时采样,造成双向信号传输链路非对称,导致测得的钟差可能存在数十纳秒的误差。

针对上述问题,在伪距测量精度较高时,为了简化整周模糊度的求解算法,采用伪距法估计整周模糊度。但

是传统的伪距法依赖单个伪距观测量的精确性^[11]。为了进一步提高整周模糊度的估算精度,用多历元伪距观测量求平均的方法平滑伪距观测量中的噪声和异常值。并且为了实时输出时间比对结果,针对站点运动时载波相位整周计数器发生周跳的现象,需要快速、准确且实时的周跳探测与修复的方法。实时的周跳探测算法主要有高次差法,多项式拟合法,卡尔曼滤波法等^[12]。高次差法可以放大周跳值,但是也会放大噪声,难以探测出小周跳^[13]。多项式拟合法在站点运动时建模困难导致探测精度较低^[14]。卡尔曼滤波对非线性的载波相位观测量探测精度高,并且可以实时探测并修正每个历元^[15]。

本文从理论上分析了双向伪距和载波相位测量原理和配对解算钟差的方法,设计了减小双向载波相位观测量采样时刻不一致性的方法。研究了适用于本系统周跳探测与修复的算法,并提高了传统伪距法估计整周模糊度的精度。经过实测数据分析,系统减小了采样时刻不一致带来的误差,载波相位双向时间比对大幅减小了解算钟差的噪声,并解决了出现周跳的现象,进一步提高动态时间比对的精度。

1 双向伪距测量与配对解算钟差原理

微波双向无线时间比对采用非相干测距原理,主站和从站独立产生测距信号,两站点因参考时钟不同步,发射测距信号存在一定时差。视距内双向无线时间比对原理如图1所示,原子钟产生的10 MHz频率信号经倍频输入到调制解调器做系统时钟。原子钟输出的秒脉冲(pulse per second, PPS)信号作为计数器的开门脉冲,启动计数器,本站点的发射信号时刻由发端计数器产生,调制器负责发射数据帧文与发射信号的扩频调制,随后天线通过L波段的微波将本站点调制的测距信号发送给对面站点,同时接收对面站点的测距信号。解调器负责对接收的信号下变频、捕获、跟踪、帧同步、解调电文等。最后收端计数器通过解调器产生接收对面站点信号的时刻。

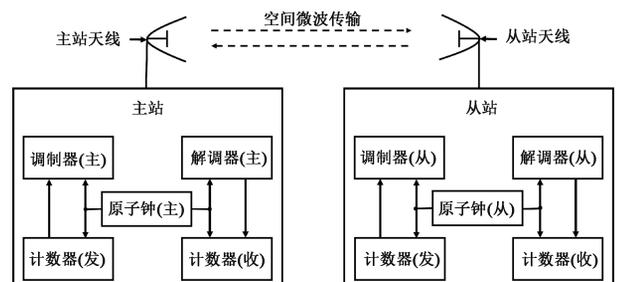


图1 视距内双向无线时间比对原理

Fig. 1 Principle of bidirectional wireless time comparison in visual range

1.2 双向伪距配对解算钟差原理

用双向伪距观测量解算钟差时,需要用同一时刻两站点采样所得的伪距观测量配对计算^[17]。由2个站点发端和收端4组计数器得到系统时序图,如图4所示,启动计数器后得到两站点第1历元的钟差 $T_{TS1}^1 - T_{TS2}^1$,码片计数、比特计数和帧计数分别在1~10 230、1~300和1~200范围内循环计数。

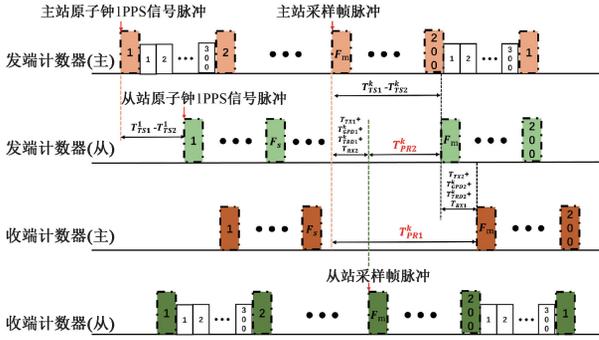


图4 双向无线时间比对系统时序

Fig. 4 Sequence diagram of bidirectional wireless time comparison system

每个帧脉冲采样各级计数器值得到伪距观测量,以此计算钟差,每0.3 s的帧周期输出一次钟差计算结果。图4中第 k 历元主站和从站伪距观测量如式(4)~(5)所示。

第 k 历元主站调制解调器的伪距观测量 T_{PR1}^k :

$$T_{PR1}^k = T_{TS1}^k - T_{TS2}^k + T_{TX2} + T_{GPD2}^k + T_{TRD2}^k + T_{RX1} + \varepsilon_{\rho1}^k \quad (4)$$

第 k 历元从站调制解调器的伪距观测量 T_{PR2}^k :

$$T_{PR2}^k = T_{TS2}^k - T_{TS1}^k + T_{TX1} + T_{GPD1}^k + T_{TRD1}^k + T_{RX2} + \varepsilon_{\rho2}^k \quad (5)$$

式中: T_{TSj}^k 为站点时间信号; j 表示不同站点; k 为主站发端帧计数为 F_m 的采样时刻计算历元,下同; T_{TXj} 为发射硬件时延; T_{GPDj}^k 为信号传输链路的几何路径时延; T_{TRDj}^k 为对流层传输链路时延; T_{RXj} 为接收硬件时延。 $\varepsilon_{\rho j}^k$ 为伪距观测量误差。

式(4)减去式(5)得到钟差表达式如式(6)所示:

$$T_{TS1}^k - T_{TS2}^k = \frac{1}{2}(T_{PR1}^k - T_{PR2}^k) + \frac{1}{2}(T_{GPD1}^k - T_{GPD2}^k) + \frac{1}{2}(T_{TRD1}^k - T_{TRD2}^k) + \frac{1}{2}(T_{TX1} - T_{TX2}) + \frac{1}{2}(T_{RX2} - T_{RX1}) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{\rho2}^k - \varepsilon_{\rho1}^k) \quad (6)$$

式(6)中硬件时延需要通过SR620时间间隔计数器标校^[18]。2个站点信号传输链路非对称产生的误差在站点静止时可以忽略不计,而在运动时,2个站点采样时刻不一致导致误差较大,需要优化双向伪距采样方法。

如图4所示,此时从站收端计数器恢复出主站的时间信号,式(7)为主站发射到从站接收的信号空间传输时延和硬件时延之和。以主站发端帧计数为 F_m 时为例,此时从站收端计数器滞后主站发端计数器的值为式(7)。

$$T_{GPD1}^k + T_{TRD1}^k + T_{TX1} + T_{RX2} \quad (7)$$

在主站端以发端计数器的帧脉冲进行采样,得到收端各级计数器的值。由于2个站点钟差不确定,如果在从站端也以发端计数器帧脉冲进行采样,2个站点计数器的采样时刻的偏差量不固定,最大可达0.3 s。在站点静止时,采样时刻不一致带来的误差仅与两站点原子钟的钟速有关,误差较小^[19]。而在站点运动时带来的误差较大,以车辆运动速度100 km/h为例,此时采样时刻不一致带来的误差为 $0.3 \times v_{车} / c$, c 为电磁波传播速度,计算约为27.8 ns,误差较大,并且误差随着运动速度和采样时刻的偏差量会发生变化,增加修正该误差的难度。因此本系统在从站以收端计数器帧脉冲进行采样,提取发端各级计数器的值,采样时刻偏差量为式(7),较小且相对固定。

以上为同一时刻双向伪距观测量的理论测量流程,而实际解析电文时存在一定的延时,导致主站端从电文中解析到的并不是同一时刻从站计算的第 k 历元的 T_{PR2}^k 。因此需要将主站收端计数器帧计数 F_m 一并调制在电文中。

主站端将本站发端帧计数和对应的伪距观测量连续缓存20组,主站解析电文中从站收端帧计数与缓存的20组数据中的主站发端帧计数依次进行对比,帧计数一致时说明2个帧计数对应的伪距观测量配对完成。以电文中解析到从站收端第 k 历元帧计数 F_m 时为例(此时对应解析电文中的从站伪距观测量为 T_{PR2}^k),和缓存的20个主站发端帧计数依次对比,缓存的帧计数也为 F_m 时配对完成,此时对应缓存的第 k 历元主站伪距观测量为 T_{PR1}^k 。标校完硬件时延以及解决采样时刻不一致性后,由式(6)解算2个站点的钟差。

2 载波相位时间比对原理与系统设计

2.1 载波相位与整周模糊度测量原理

载波相位观测量虽然含有整周模糊度,但是测量精度较高,此外在站点运动时载波相位观测量受多径效应的影响远远小于码相位观测量^[20]。主站端伪距观测量方程为式(4),载波相位第 k 历元的观测方程为式(8)。

$$T_{\phi1}^k = T_{TS1}^k - T_{TS2}^k + T_{TX2} + T_{GPD2}^k + T_{TRD2}^k + T_{RX1} + \lambda/c \times \hat{N} + \varepsilon_{\phi1}^k \quad (8)$$

式中: $T_{\phi1}^k$ 为载波相位观测量,单位为ns; λ 为波长; \hat{N} 为整周模糊度; $\varepsilon_{\phi1}^k$ 为载波相位观测量误差。

载波相位观测量由载波跟踪环路测量所得,系统采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波环。如图3所示,

环路通过捕获模块得到多普勒频移初值,由 I 路和 Q 路及时相干积分值经过鉴相、滤波获得多普勒频移变化量,变化量累加初值并换算成载波频率控制字回传给载波 NCO,使得本地复制的中频载波信号能跟踪并剥离接收的中频载波信号^[21]。载波 NCO 有两级计数器:整周计数以及周相位,以 0.3 s 的帧脉冲采样两级计数器的值得到载波相位观测量 $T_{\phi 1}^k$ 。双向载波相位观测量配对解算钟差的过程和双向伪距观测量配对原理一致。

在得到较为准确的伪距观测量的前提下,第 k 历元的载波相位观测量方程减去第 k 历元的伪距观测量方程可以粗略的估算整周模糊度 \hat{N} ,即式(8)减去式(4)得式(9)。

$$\hat{N} = [c/\lambda \times (T_{\phi 1}^k - T_{PR1}^k)] \quad (9)$$

式中:“ $[\]$ ”为四舍五入取整运算。

由式(9)可得,估算整周模糊度的准确性和 T_{PR1}^k 值有关,当完成跟踪并输出载波相位和伪距观测量后,相对于利用单个历元 T_{PR1}^k 的传统伪距法估计整周模糊度,测量第 k 历元后的若干个伪距和载波相位观测量,用伪距减去载波相位变化量并求平均可以获得更为准确的 T_{PR1}^k ,如式(10)所示。

$$T_{PR1}^k = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M [T_{PR1}^{k+i} - (T_{\phi 1}^{k+i} - T_{\phi 1}^k)] \quad (10)$$

式中: M 为观测的总历元,设置为 50。

假设 2 个站点一直锁定载波信号,不发生失锁和周跳,估算的整周模糊度 \hat{N} 在每个时刻的值保持不变,由此可以得到不含整周模糊度的载波相位观测量:

$$T_{RM1}^k = T_{\phi 1}^k - \lambda/c \cdot \hat{N} \quad (11)$$

式中: T_{RM1}^k 为第 k 历元不含整周模糊度的载波相位观测量。

2.2 卡尔曼滤波周跳探测原理

对于站点运动时由于多径效应等原因产生周跳的现象,用卡尔曼滤波法进行实时的周跳探测与修正。

卡尔曼滤波法探测与修正周跳流程如下,系统状态方程表示为式(12):

$$\mathbf{X}_k = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{w}_{k-1} \quad (12)$$

式中: \mathbf{X}_k 为系统第 k 时刻的状态向量 $[T_{RM1}^k \ \dot{T}_{RM1}^k \ \ddot{T}_{RM1}^k \ \dddot{T}_{RM1}^k]^T$,其中 \dot{T}_{RM1}^k 、 \ddot{T}_{RM1}^k 、 \dddot{T}_{RM1}^k 分别为载波相位观测量的一阶、二阶和三阶导数。 $\boldsymbol{\Gamma} = [T^4/24 \ T^3/6 \ T^2/2 \ T]^T$,

$$\mathbf{T} \text{ 为采样间隔 } 0.3 \text{ s}; \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & T^3/6 \\ 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{w}_{k-1} \text{ 为}$$

第 $k-1$ 时刻的模型预测误差。

观测方程如式(13)所示:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H} \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (13)$$

式中: \mathbf{Z}_k 为第 k 时刻的观测量; \mathbf{v}_k 为观测噪声; $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

卡尔曼滤波器时间更新方程如式(14)~(15)所示:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \boldsymbol{\varphi} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}^T + \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{Q}_{k-1} \boldsymbol{\Gamma}^T \quad (15)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$ 为 k 时刻的先验状态估计值; $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的后验状态估计值,第 0 时刻的后验估计值 $\hat{\mathbf{X}}_0 = [T_{RM1}^1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。 $\mathbf{P}_{k,k-1}$ 为 k 时刻的先验估计协方差; \mathbf{P}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的后验估计协方差, \mathbf{P}_0 设置为单位阵。 $\mathbf{Q}_{k-1} = E[\mathbf{w}_{k-1}]$,其中,“ $E[\]$ ”为样本的期望值。

卡尔曼滤波器状态更新方程如式(16)~(19)所示:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{V}_k \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (19)$$

式中: \mathbf{K}_k 为滤波器增益; $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{v}_k]$; \mathbf{V}_k 为预报残差矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。

式(17)矩阵 \mathbf{V}_k 中第 1 个元素为本历元实际的载波相位观测量与卡尔曼滤波预测的本历元载波相位观测量的差值 ΔN ,经过本系统实际数据测试,如果差值 ΔN 取绝对值后大于设置的阈值,经过四舍五入得到载波相位周跳修正值。

由于载波 NCO 整周计数器发生周跳,因此发生周跳历元后的所有载波相位观测量都存在此误差^[22]。而此时载波跟踪环路一直稳定跟踪接收到的载波信号,环路并不会调整频率控制字修正载波 NCO 整周计数器的值。因此本历元载波相位修正完成后,还需要回传给载波 NCO 修正整周计数器的值。再返回式(14)循环执行,实时的探测修正所有发生周跳的载波相位观测量。

载波相位双向时间比对流程如图 5 所示。首先计算初始的整周模糊度,以此得到不含模糊度的载波相位观测量,再通过卡尔曼滤波探测与修正载波相位周跳值。最后用解析电文中对面站点的载波相位和缓存的本站点载波相位通过帧配对解算钟差。

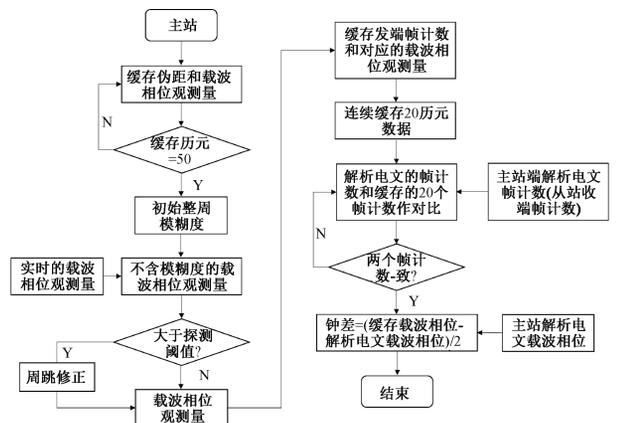


图5 载波相位双向时间比对流程

Fig. 5 Carrier phase time comparison flow

基于上述无线时间比对原理,研制了2套无线时间比对站点,系统基本结构如图6所示。主要有基带信号处理电路(主要由数字信号处理(digital signal processing,

DSP)芯片和可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片组成)、时间比对系统上位机软件、射频收发通道等。

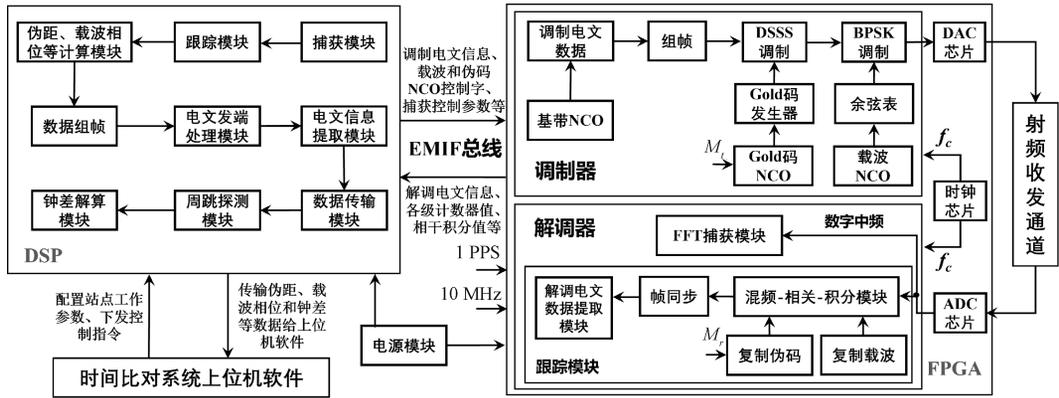


图6 双向时间比对系统结构

Fig. 6 Bidirectional time comparison system structure

时间比对系统上位机软件面向用户,主要实现2个功能,一方面,接收DSP芯片传输的钟差、伪距、载波相位等数据,并进行统计计算;另一方面,配置站点伪码速率、码相关间距等工作参数和标校的硬件时延值,下发控制指令。

基带信号处理电路主要完成信号处理功能,FPGA芯片主要完成数字中频信号的调制解调功能,电文信息提取等功能。DSP芯片作为微处理器,主要完成伪距、载波相位的计算,周跳探测与钟差解算等功能。并辅助FPGA完成数字中频信号的捕获跟踪。DSP芯片通过外部存储器(external memory interface,EMIF)接口与FPGA芯片相互传输数据。

射频信号发射通道主要将数模转化(digital-to-analog converter,DAC)芯片输出的调制的模拟中频信号进行上变频、滤波和放大,再由天线发射出去。接收通道负责对天线接收的信号进行滤波、放大、动态增益调节和下变频等处理,接收通道输出的信号经模数转化(analog-to-digital converter,ADC)芯片后,输出数字中频信号给基带电路板进行后续处理。

3 试验验证

动态无线时间比对试验于2023年5月11日在陕西周至黑河河堤路上开展。动态无线时间比对试验站点布局如图7所示。主站和主站铷原子钟静止在地面上,从站和从站铷原子钟放置在车上运动。主站天线和从站天线高度分别为5.2 m和4 m。

动态无线时间比对试验设备连接图8所示。主站铷原子钟和从站铷原子钟的时间频率信号分别通过脉冲分



图7 动态无线时间比对试验站点布局

Fig. 7 Layout of the dynamic wireless time comparison test site

配放大器和频率分配放大器接入2个站点。在2个站点距离较近时,分别用线缆Cab1和Cab2将秒脉冲信号1 PPS接入SR620时间间隔计数器中测量多段时间的钟差值,根据铷原子钟的频率特性和多段钟差值,通过最小二乘法拟合出钟差变化的二次模型,通过该模型得到试验阶段的钟差值,作为动态试验阶段基准钟差值。最小二乘拟合二次模型原理如式(20)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [\Delta T(t_i) - (a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2)]^2 \quad (20)$$

式中: δ_i 为拟合的误差; $\Delta T(t_i)$ 为 t_i 时间点SR620测量的钟差值; a_0 、 a_1 和 a_2 为二次模型系数。

最小二乘拟合通过计算拟合误差平方值的最小值获得钟差二次模型的系数,试验阶段时间点代入此模型获得基准钟差值。

随后用同样的线缆Cab1和Cab2将2台铷原子钟的

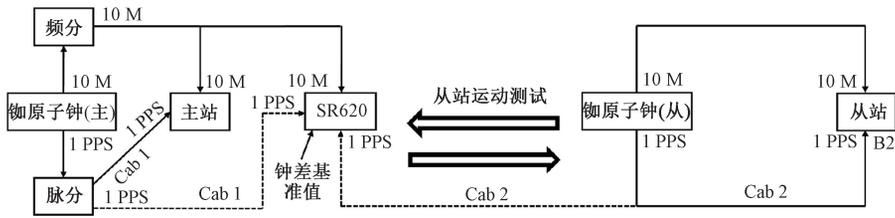


图 8 动态无线时间比对设备连接

Fig. 8 Connection of dynamic wireless time comparison device

1 PPS 脉冲信号分别接入主站和从站作为站点的时间信号。

分析动态时间比对试验过程中主站上位机软件采集的载波相位观测量、伪距观测量和解算的钟差。

3.1 整周模糊度求解试验

采集外场试验过程中站点不同运动速度下连续的载波相位观测量和伪距观测量,对比传统伪距法和本系统利用多个历元观测量求平均法估计的整周模糊度的准确性。多历元求平均估计整周模糊度的方法先用式(10)求得较为准确的伪距观测量,再用式(9)计算整周模糊度。在修正周跳后,不发生信号失锁的前提下整个试验阶段整周模糊度保持不变,共估计 2 288 个历元的载波相位整周模糊度,其中 2 227 个整周模糊度为同一个值,将这个值作为整周模糊度真实值。其他历元估计的整周模糊度与真值作差得到估计误差。多历元求平均法整周模糊度估计误差如图 9 所示。

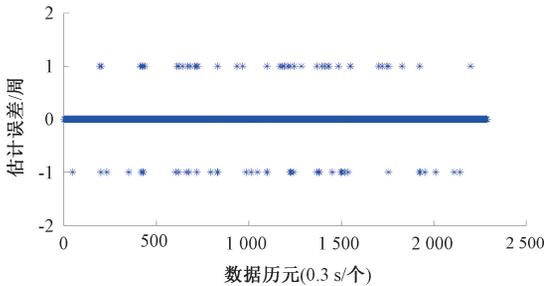


图 9 多历元求平均法整周模糊度估计误差

Fig. 9 The error in ambiguity estimation using the multi-epoch averaging method

由图 9 可得,多历元求平均法平滑了伪距观测量,因此估算整周模糊度产生误差的历元较少,并且误差较小。

传统的伪距法整周模糊度估计误差如图 10 所示。传统伪距法估算整周模糊度时,只用一个历元的伪距观测量,由于观测量受到多普勒效应和复杂的多径效应影响噪声较大,导致整周模糊度估计误差较大。分别统计 2 种方法在站点不同运动速度下整周模糊度估计误差,统计结果如表 1 所示。

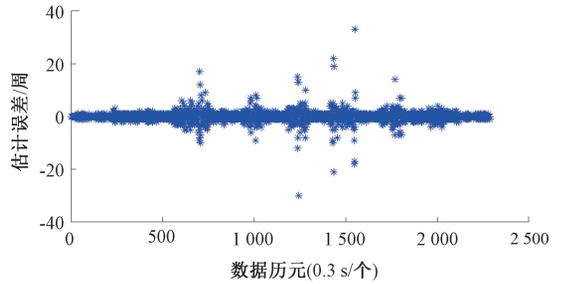


图 10 传统伪距法整周模糊度估计误差

Fig. 10 The error in ambiguity estimation of whole cycles using the traditional pseudo-range method

表 1 2 种方法整周模糊度估计误差统计表

Table 1 Statistical comparison of ambiguity estimation errors for whole cycles using two methods

估计误差	传统伪距法			多历元求平均法			
	静止 km/h	20 km/h	40 km/h	静止 km/h	20 km/h	40 km/h	100 km/h
总历元	200	460	283	267	200	460	283
误差个数	15	138	93	89	1	8	6
误差率/%	7.5	30	33	33	0.5	1.7	2.1
最大值/周	1	6	9	33	1	1	1

多历元求平均法在 100 km/h 以内的站点运动下,误差最大为 1 周。并且站点运动速度越小,误差率越小。而传统的伪距法受伪距观测量的噪声和异常值的影响,估计误差最大值为 33 周。并且整周模糊度存在约 30% 的概率会产生估计误差。

3.2 卡尔曼滤波周跳探测试验

针对载波相位产生周跳的现象,分析卡尔曼滤波周跳探测与修正的效果。在站点静止、速度 20 km/h、速度 40 km/h、速度 100 km/h 时分别在采集到的载波相位观测量基础上加入 1 周、-2 周、3 周和 2 周的周跳值。计算实际的载波相位观测量与卡尔曼滤波预测的载波相位观测量的差值 ΔN 作为卡尔曼滤波周跳探测值,探测的阈值设置为 0.9 周。卡尔曼滤波周跳探测如图 11 所示。

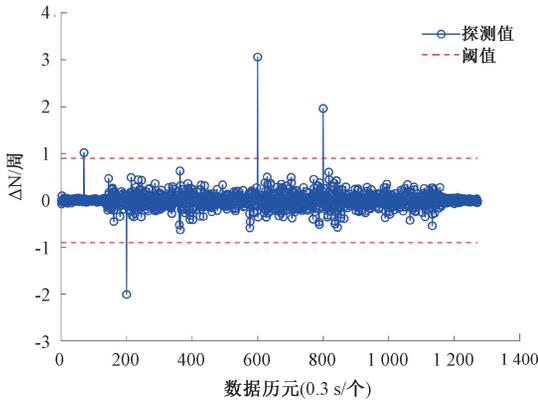


图 11 卡尔曼滤波周跳探测

Fig. 11 Kalman filter cycle slip detection

由图 11 可得,卡尔曼滤波可以实时探测并修正周跳。对于没有加入周跳的历元,卡尔曼滤波探测值 ΔN 在变化,但对于本系统 100 km/h 以内的站点运动速度, ΔN 波动在 0.7 周以内,因此本系统采用卡尔曼滤波可以探测出较小的周跳值。卡尔曼滤波周跳探测与修正统计表如表 2 所示。

由表 2 可得,对于本系统,无论站点处于静止还是运动状态,利用卡尔曼滤波可以精确的探测周跳值,并且可以探测并修正 1 周的小周跳。

表 2 卡尔曼滤波周跳探测与修正统计表

Table 2 Kalman filter cycle slip detection and correction

单位;周	插入历元	插入周跳值	探测值 ΔN	修正值
静止	70	1	1.020	1
20 km/h	200	-2	-2.009	-2
40 km/h	600	3	3.061	3
100 km/h	800	2	1.960	2

3.3 载波相位观测量和伪距观测测量噪声对比试验

在站点不同运动速度下设置 4 组试验对比载波相位和伪距观测测量噪声。从站由静止加速至不同的速度,匀速运动一段时间,再减速直到静止完成一组实验。由于运动阶段伪距和载波相位观测测量变化范围较大,为了直观的显示伪距和载波相位测量的噪声,分别求 2 个观测量的差分值并作为对比。观测量差分值实测结果如图 12 所示。图 12(b)~(d)中匀速阶段的差分值为正时,从站正在远离主站。差分值为负时,从站正在靠近主站。

由图 12(a) 可得,在站点静止时,没有受到多普勒效应的影响并且多径效应的影响较为稳定,伪距观测测量噪声在 0.8 ns 以内,相对于运动阶段,噪声较小。

由图 12(b)~(d) 可得,对于伪距观测测量,在站点处于加速度运动时,由于多普勒频移处于变化阶段并且

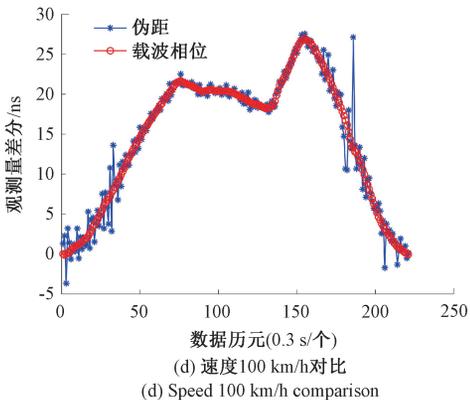
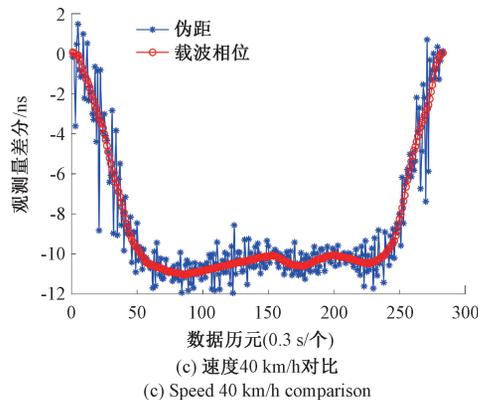
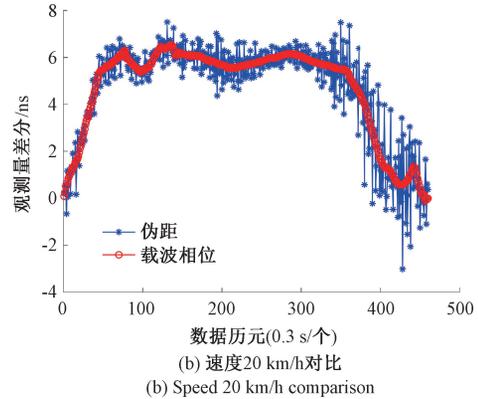
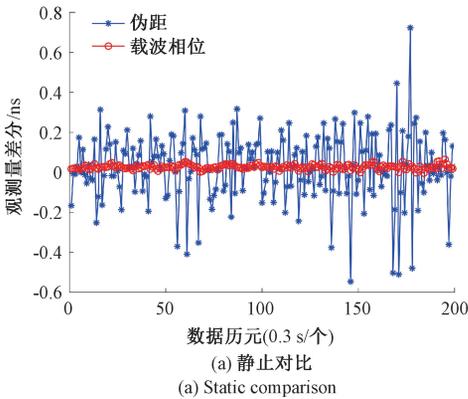


图 12 站点不同速度下载波相位和伪距差分对比

Fig. 12 Comparison of carrier phase and pseudo-range difference values across various speeds

受到复杂多变的多径效应影响,接收信号功率突变导致码跟踪环路解算的码频率控制字误差较大,本地码 NCO 复制的 Gold 码相位出现误差使得恢复对面站点的时间信号产生高达十几纳秒异常值的波动,且异常值大小和站点加速度呈正相关。而站点处于匀速阶段,由于多普勒频移较为稳定,码跟踪环路解算的伪距观测量噪声相对较小,在 2 ns 以内。并且加速度阶段的测量噪声大于匀速阶段的测量噪声。

由图 12 可得,对于载波相位观测量,在修正周跳后,无论从站运动速度大小、静止、处于加速度运动或者匀速运动阶段、远离或者靠近主站,载波相位观测量较为稳定,且没有出现异常值。因此载波相位观测量大幅减小了测量噪声,并且修正周跳后解决了出现异常值的现象,从而可以提高动态时间比对的精度。

3.4 动态时间比对试验

动态载波相位和伪距时间比对试验在同一天不同时段开展,对比车辆不同速度下解算的钟差。

分别采集载波相位双向时间比对和伪距双向时间比对主站上位机软件采集的钟差值,实测值减去钟差基准值得到测量钟差的误差。伪距动态时间比对钟差测量误差如图 13 所示。

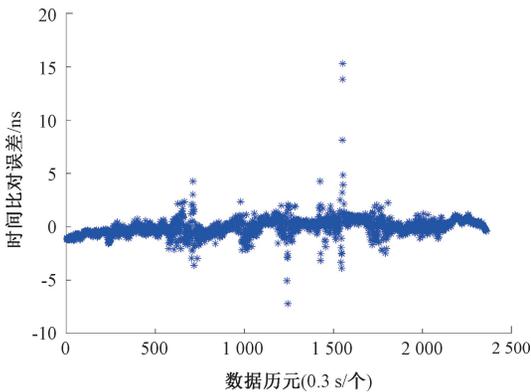


图 13 动态伪距时间比对误差

Fig. 13 Dynamic pseudo-range time comparison error

伪距动态时间比对测量误差波动范围大约为 22.5 ns,车辆在运动速度达到 100 km/h 时,由于多径效应的影响,接收的信号功率出现较大波动,导致伪距观测量噪声较大,从而解算的钟差产生了约为 15 ns 的异常值,并且受多普勒效应的影响测量噪声较大。测量误差的统计结果:均值为-0.259 ns,标准偏差为 0.923 ns,计算的伪距动态时间比对的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.958 ns。

载波相位动态时间比对钟差测量误差如图 14 所示。载波相位动态双向时间比对虽然也受到多径效应的影响可能会发生周跳,但修正周跳后钟差测量值的误差比较

稳定,测量误差波动范围约为 1.1 ns。测量误差的统计结果:均值为-0.093 ns,标准偏差为 0.258 ns,计算的载波相位动态时间比对的均方根误差为 0.275 ns。

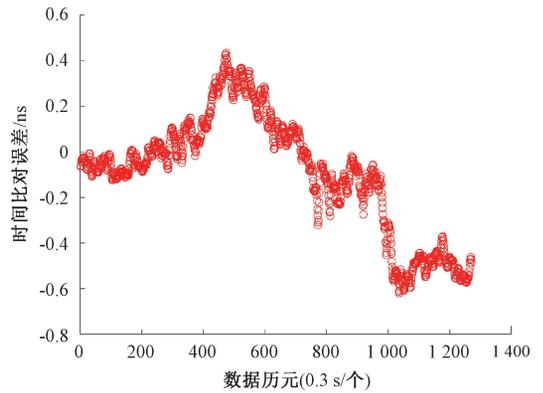


图 14 动态载波相位时间比对误差

Fig. 14 Dynamic carrier-phase time comparison error

载波相位双向时间比对相较于伪距双向时间比对,钟差测量精度提升了 71.3%。

为了衡量解决采样时刻不一致性的效果,分析速度对双向时间比对精度的影响。如表 3 所示,分别统计车辆不同运动速度下解算钟差误差的 RMS 值和标准差 (standard deviation, STD) 值。

表 3 站点不同运动速度下钟差测量误差统计表

Table 3 Statistical analysis of clock difference measurement errors at different speeds

单位:ns	静止		20 km/h		40 km/h		100 km/h	
	RMS	STD	RMS	STD	RMS	STD	RMS	STD
伪距	0.27	0.20	0.85	0.58	0.97	0.79	1.62	1.57
载波相位	0.07	0.04	0.14	0.10	0.19	0.11	0.48	0.18

表 3 可得,站点在不同运动速度下,测量钟差误差的 RMS 值并没有出现明显的跳变,因此本系统优化 2 个站点计数器采样方法后,大幅度减小了采样时刻不一致性带来的影响。并且由不同运动速度下钟差测量误差的统计结果可得,相较于伪距双向时间比对,运动速度对载波相位双向时间比对的影响较小,RMS 值波动较小,STD 值较为稳定。

4 结 论

本文首先从理论上分析了双向伪距和载波相位测量原理。发现了不同步采样对双向时间比对的影响,提出了 2 个站点以不同计数器帧脉冲采样提取载波相位观测量的方法,大幅减小了双向载波相位观测量采

样时刻不一致性,从而减小了配对解算钟差的误差。针对信号传输链路被遮挡等原因频繁发生周跳的问题,研究了卡尔曼滤波周跳探测与修复的算法,可以实时的探测并修正周跳,即使是1周的小周跳也能探测。结合多伪距观测历元求平均提高了传统的伪距法估计周模糊度的精度。经过实测数据分析,多历元求平均法相较于传统伪距法,估计载波相位整周模糊度的误差率由29%减小至2.7%,最大估计误差由33周减小至1周。最后由车载试验可得,载波相位双向时间比对相较于伪距双向时间比对大幅减小了解算钟差的噪声,并解决了出现异常值的现象,钟差测量精度提升了71.3%,测量钟差的RMS值为0.275 ns,达到了百皮秒量级。说明用载波相位可以进一步提高动态无线时间比对的精度,在运动平台之间实现时间同步等方面具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 付鑫宇,胡亮,周子杰,等. 基于单光子探测的高精度长距离光纤双向时间比对[J]. 光学学报, 2023, 43(13):61-70.
FU X Y, HU L, ZHOU Z J, et al. Two-way time comparison of high-precision and long-distance optical fiber based on single photon detection[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(13):61-70.
- [2] 陈雨锋,王波. 光纤时间频率同步技术及应用[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):47-62.
CHEN Y F, WANG B. Fiber-optic time and frequency synchronization technology and its applications [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2):47-62.
- [3] 王威雄,董绍武,武文俊,等. 基于软件接收机和间接链路的卫星双向时间比对性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10):152-160.
WANG W X, DONG SH W, WU W J, et al. Performance analysis of two-way satellite time and frequency transfer based on SDR receivers and indirect links [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10):152-160.
- [4] 路润民,张杰,钟世明,等. 基于PPP和共视技术的改进PPP时间频率传递方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):168-175.
LU R M, ZHANG J, ZHONG SH M, et al. Improved PPP time and frequency transfer method based on PPP and common-view [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2):168-175.
- [5] 王治平,徐金锋,韩腾,等. 基于卫星共视比对方法的远洋移动平台部署高精度时间频率设备应用保障模式分析[C]. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十四届中国卫星导航年会论文集——S04时间频率与精密授时. 北京卫星导航中心;2024:9.
WANG ZH P, XU J F, HAN T, et al. Analysis on application support mode of high-precision time and frequency equipment deployed on ocean-going mobile platform based on satellite common view alignment method [C]. China Satellite Navigation System Management Office Academic Exchange Center. Proceedings of the 14th China Satellite Navigation Annual Conference —— S04 Time Frequency and Precision Timing. Beijing Satellite Navigation Center;2024:9.
- [6] WANG J P, HU J, LUAN M S. High precision dynamic prediction and time synchronization based on high-speed motion platforms[C]. 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), 2018:488-492.
- [7] 陈聪,段柏宇,徐强,等. 无人机平台运动状态下节点间高精度时间同步[J]. 西安电子科技大学学报, 2024, 51(3):19-29.
CHEN C, DUAN B Y, XU Q, et al. High precision time synchronization between nodes under motion scenario of UAV platforms[J]. Journal of Xidian University, 2024, 51(3):19-29.
- [8] JIN X, AN J P, DU CH H, et al. Frequency-offset information aided self time synchronization scheme for high-dynamic multi-UAV networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(1):607-620.
- [9] 程燕,王海峰,王学运,等. 复杂环境下基于自适应卡尔曼滤波的时间比对跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(11):4110-4116.
CHENG Y, WANG H F, WANG X Y, et al. A time tracking loop based on adaptive kalman filter in complex conditions [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(11):4110-4116.
- [10] 张继海,董绍武,袁海波,等. 北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11):45-53.
ZHANG J H, DONG SH W, YUAN H B, et al. The

- performance analysis of BeiDou-3 undifferenced combined carrier phase time comparison [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11):45-53.
- [11] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 电子工业出版社; 201701. 436.
- XIE G. GPS principle and receiver design [M]. Electronic Industry Press; 201701. 436.
- [12] 周宇. 基于小波变换的北斗导航信号周跳探测与修复[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHOU Y. Cycle slip detection and correction of COMPASS based on wavelet transform [D]. Harbin Engineering university, 2012.
- [13] 陈石平, 郑健超, 谈书才. 利用高次差与自相关函数对周跳探测与处理[J]. 现代导航, 2018, 9(2):104-108.
- CHEN SH P, ZHENG J CH, TAN SH C. Detection and processing of carrier phase cycle slips using high order difference and autocorrelation function [J]. Modern Navigation, 2018, 9(2):104-108.
- [14] 赵松克, 付文涛, 阮兰君. 基于多项式拟合和多普勒周跳探测与修复[J]. 桂林电子科技大学学报, 2020, 40(6):490-493.
- ZHAO S K, FU W T, RUAN L J. Detection and repair of dual frequency differential cycle slip [J]. Journal of Guilin University of Electronic, 2020, 40(6):490-493.
- [15] 武威, 刘荟萃, 曹建峰, 等. 基于卡尔曼滤波平滑多普勒值的单频周跳探测方法[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(4):120-125.
- WU W, LIU H C, CAO J F, et al. Single frequency cycle slip detection based on Kalman filter smoothed doppler observation [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(4):120-125.
- [16] 孟志军, 闫恩齐, 陈林, 等. 高精度微波时频传递链路体制设计及关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9):104-110.
- MENG ZH J, YAN EN Q, CHEN L, et al. System design and key technologies of high-precision microwave time-frequency transmission links [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9):104-110.
- [17] 武文俊, 李志刚, 杨旭海, 等. 卫星双向时间频率传递中的 Sagnac 效应[J]. 宇航学报, 2012, 33(7):936-941.
- WU W J, LI ZH G, YANG X H, et al. Sagnac effect on two-way satellite time and frequency transfer [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(7):936-941.
- [18] 刘音华, 张颖博, 刘娅, 等. 可级联组网的无线时间比对系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(1):1-8.
- LIU Y H, ZHANG Y B, LIU Y, et al. Design of cascading network time comparison system [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(1):1-8.
- [19] 王国永. 基于双移动站的卫星双向时间传递系统误差校准方法研究[D]. 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2015.
- WANG G Y. Research on systematic errors calibration method based on double mobile stations in two-way satellite time transfer [D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2015.
- [20] ZHOU H X, WANG X Y, LI SH H, et al. An optimal carrier-phase smoothing code algorithm for low-cost single-frequency receivers [J]. Journal of Surveying Engineering, 2023, 149(4):1.
- [21] 王海峰, 王学运, 易航, 等. 微波宽带超高精度双向时间比对技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):152-159.
- WANG H F, WANG X Y, YI H, et al. Research on wideband microwave ultra-high precision two-way time comparison technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2):152-159.
- [22] 王敏, 孟欣, 刘长建, 等. 一种多频多系统周跳探测与修复方法[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(3):258-265.
- WANG M, MENG X, LIU CH J, et al. A method of multi-frequency multi-system cycle slip detect and repair [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(3):258-265.

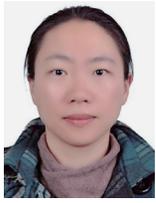
作者简介



张颖博, 2019年于江西理工大学获得学士学位, 现为中国科学院国家授时中心博士研究生, 主要研究方向为时间频率测量。

E-mail: zhangyingbo@ntsc.ac.cn

Zhang Yingbo received his B. Sc. degree in 2019 from Jiangxi University of Science and Technology. He is currently a Ph. D. candidate at National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include time-frequency measurement.



刘音华(通信作者),2019年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院国家授时中心研究员,主要研究方向为高精度时间频率测量与传递、卫星导航技术、现代授时技术等。

E-mail:liuyh@ntsc.ac.cn

Liu Yinhua (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2019. She is currently a research fellow at National Time Service Center, CAS. Her main research interests include high precision time frequency measurement and transmission, satellite navigation technology, modern timing technology.



刘娅,2010年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院国家授时中心研究员,主要研究方向为高精度时间频率测量,传递与控制。

E-mail:liuya@ntsc.ac.cn

Liu Ya received her Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2010. She is currently a research fellow at National Time Service Center, CAS. Her main research interests include high precision time frequency measurement, transmission and control.



张吉峰,2011年于空军雷达学院获得硕士学位,现为中国铁道科学研究院集团有限公司高级工程师,主要研究方向为铁路北斗卫星导航系统应用技术与铁路信息系统集成技术。

E-mail:zhangjifeng@rails.cn

Zhang Jifeng received his M. Sc. degree in 2011 from Air Force Early Warning Academy. He is currently a senior engineer at Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. His main research interests include applied technology of Beidou navigation satellite system and information system integration technology in railway.