

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.03.011

# 基于卡尔曼滤波的时分星间信号跟踪技术研究

孙田伟, 钟兴旺, 踪念科, 王国永

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

**摘要:**在星间链路领域的测量过程中, 时分双工体制星间测量逐渐成为新兴技术, 而时分信号的跟踪精度决定了接收机测量误差。传统的接收机载波跟踪环路可以保证对连续信号的稳定跟踪, 但受相位抖动的影响较大, 且对于时分双工体制间断信号, 会出现开环阶段跟踪结果发散的问题。针对以上问题, 提出了一种基于自适应卡尔曼滤波的时分信号跟踪技术, 采用卡尔曼滤波器对鉴相结果进行处理, 在开环阶段根据前一时刻的最终状态对频率进行稳定外推。相比于传统跟踪环路, 该技术的载波相位跟踪误差绝对值均值降低了92.9%, 标准差降低了93.5%。实验结果表明, 该技术不仅实现了开环阶段载波相位的稳定跟踪, 且有效抑制了闭环阶段相位抖动的影响, 对实现时分双工体制星间精密测量具有重要应用意义。

**关键词:**卡尔曼滤波; 载波跟踪环路; 时分双工; 星间测量

中图分类号: V443; TN927

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)03-0067-06

## Research on tracking technology of time division intersatellite signal based on Kalman filter

SUN Tianwei, ZHONG Xingwang, ZONG Nianke, WANG Guoyong

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** During the measurement in the field of inter-satellite link, the inter-satellite measurement of time division duplex system gradually becomes the emerging technology, and the tracking accuracy of time division signal determines the measurement error of receiver. The traditional receiver carrier tracking loop can ensure the stable tracking of continuous signals, but it is greatly affected by phase jitter. And when tracking the discontinuous signal of time division duplex system, there is problem of divergence of tracking results in open loop stage. Aiming at these problems, a time division signal tracking technology based on adaptive Kalman filter is proposed, which uses Kalman filter to process the phase detection results and extrapolates the frequency stably according to the final state of the previous moment in the open-loop stage. Compared with the traditional tracking loop, the mean absolute value of carrier phase tracking error is reduced by 92.9% and the standard deviation is reduced by 93.5%. The experimental results show that this technology not only realizes the stable tracking of carrier phase in the open-loop phase, but also effectively suppresses the influence of phase jitter in the closed-loop phase, which is of great application significance for realizing the inter-satellite precise measurement of time division duplex system.

**Key words:** Kalman filtering; carrier tracking loop; time division duplex; intersatellite measurement

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-02-07

基金项目: 预先研究项目(编号: 315067105)

引用格式: 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 T W, ZHONG X W, ZONG N K, et al. Research on tracking technology of time division intersatellite signal based on Kalman filter[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(3): 67-72.

## 0 引言

在星间链路技术领域中,星间测量精度十分重要。传统的星间测量过程采用频分双工体制,在两个频点上建立持续星间链路实现双向测量及数据传输<sup>[1]</sup>,但频点的不同与收发隔离的需要会导致建立星间链路所需设备较为复杂且成本较高<sup>[2]</sup>。

随着天线阵列化的发展,时分双工(time division duplex, TDD)体制星间测量以其高精度和低时延的优势,逐渐成为新兴技术。TDD 体制采用单一频点,单条链路上采用双工方式实现双向测量及数据传输,避免了天线系统的设计矛盾<sup>[3]</sup>,实现了发射天线与接收天线的共面设计,有利于设备的小型化。

北斗系统采用的正是 TDD 体制星间链路测量<sup>[4]</sup>,但一方面因其混合星座的特点需要建立周期变化的星间链路,从而完成不同卫星相互间的精密测距和数据传输<sup>[5]</sup>;另一方面其测量时隙并不适用于点对点星间测量技术领域。因此,需要针对点对点 TDD 星间测量信号的体制要求,完成 TDD 星间测量信号的模型设计。

此外,在星间测量过程中,接收机测量精度是影响星间精密测量的关键因素之一。由于载波环路的跟踪性能在很大程度上决定了接收机测量误差,因此是本文研究的重点。传统的载波跟踪环路对于频分体制连续信号,可在一定的时间范围内达到收敛并保持稳定跟踪<sup>[6]</sup>,而对于 TDD 体制间断信号,由于占空比的存在,信号仅在前向链路播发,在载波相位的更新过程中会出现跟踪结果发散的问题,性能表现较差。

在对 TDD 体制间断信号跟踪技术的研究过程中,邓中亮等<sup>[7]</sup>提出了 TDD 模式下基于高斯-牛顿法的最大似然估计算法来实现对较小占空比定位信号的稳定跟踪,但其室内定位信号的应用场景与截然不同的时隙要求并不适用于星间测量过程,无法解决时分星间测量信号长反向链路时隙下的跟踪结果发散问题。

针对上述问题,文章提出了基于卡尔曼滤波的 TDD 星间测量信号跟踪技术,在反向链路无信号时,卡尔曼滤波器工作在开环状态,可以根据前一时刻的最终状态对频率进行合理外推,使载波相位跟踪结果始终处于收敛状态,实现更好的跟踪性能。

## 1 传统跟踪环路性能分析

### 1.1 时分星间测量信号模型

考虑设计一种典型的 TDD 星间测量信号结构,

其占空比约为 50%,经射频前端混频后的中频信号模型如式(1)所列:

$$S(t) = \begin{cases} Ax(t-\tau)e^{j[2\pi(f_{IF}+f_d)t+\varphi_0]} + n(t), & kT_D \leq t \leq (k+1)T_D, k \text{ 为奇数} \\ 0, & kT_D \leq t \leq (k+1)T_D, k \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $S(t)$  为中频接收信号,  $A$  是接收信号的标称振幅,  $x(t)$  是发射卫星的伪码,  $f_{IF}$  是射频信号经过前端处理后的中频频率,  $f_d$  是多普勒频偏,  $\varphi_0$  是初始载波相位,  $n(t)$  是高斯白噪声,且功率谱密度为  $N_0$ 。

此外,为了避免对接收机接收通信信号时造成干扰, TDD 星间测量信号仅在前向链路进行播发,因此反向链路接收信号的幅值为零,  $T_D$  则是前向链路与反向链路的时隙长度,根据具体的星间测量应用场景进行设计。

### 1.2 跟踪环路设计

在接收机对信号进行成功捕获进入跟踪阶段之后,跟踪环路的目的是尽力复制接收信号的码相位、载波相位与载波频率,并使得跟踪误差尽可能小,以此来降低接收机测量误差。由于卫星与卫星之间的相对运动以及相位抖动等因素会造成不可预测的频率漂移,因此传统的接收机跟踪环路一般会以闭环反馈的形式持续进行跟踪。接收机跟踪环路考虑如图 1 所示:

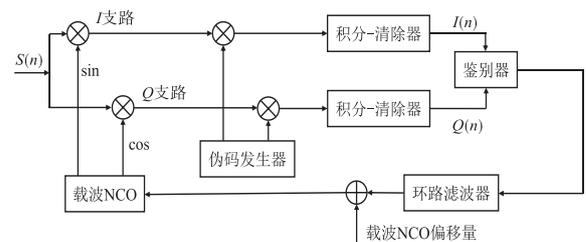


图 1 传统跟踪环路结构

Fig. 1 Traditional tracking loop structure

其中  $S(n)$  是中频接收信号  $S(t)$  经 ADC 采样后的数字信号。

如图 1 所示,传统跟踪环路结构主要包括混频器、积分清除器、鉴别器、环路滤波器和数控振荡器等<sup>[8]</sup>。此外,文章的研究重点为载波环跟踪过程,因此假定相关器能彻底剥离接收信号中的伪码。

积分-清除器实质上相当于低通滤波器,通过相干积分消除两条支路上的高频信号成分和噪声,以提高载噪比。鉴别器采用二象限反正切函数鉴相器,它的离散型计算公式如式(2)所列:

$$\varphi(n) = \arctan\left[\frac{Q(n)}{I(n)}\right] \quad (2)$$

在相同条件下采用传统跟踪环路分别对连续

星间测量信号与 TDD 星间测量信号进行跟踪,仿真时间为 3 000 ms,真实残留载波频率为 200 Hz。连续信号载波环路跟踪结果如图 2 所示:

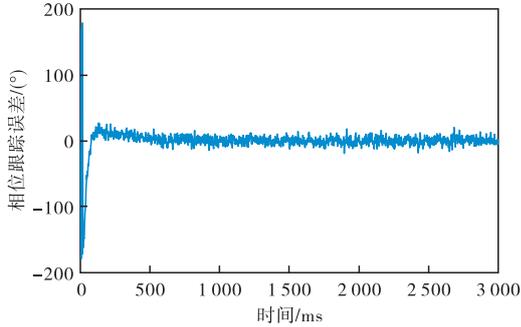


图 2 连续信号载波相位跟踪结果

Fig. 2 Tracking results of continuous signal carrier phase

可以看出,在图 2 所示的连续信号跟踪过程中,传统跟踪环路对连续信号可以快速收敛并保持闭环状态地稳定跟踪,存在的跟踪误差主要由热噪声引起的相位抖动和动态应力误差两部分组成。

考虑到 TDD 星间测量信号的应用场景与跟踪性能,令其前向链路和反向链路时隙长度  $T_D$  均为 100 ms,载波环路跟踪结果如图 3 所示:

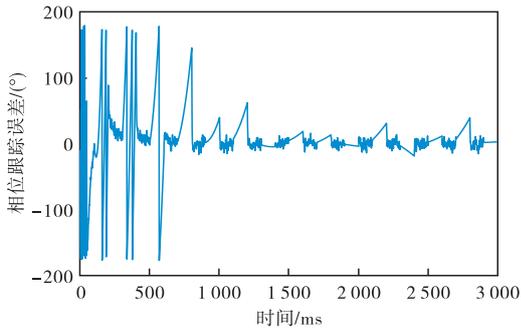


图 3 时分信号载波相位跟踪结果

Fig. 3 Tracking results of TDD signal carrier phase

在图 3 所示的 TDD 信号跟踪过程中,由于信号仅在前向链路进行播发,因此在反向链路中传统跟踪环路处于开环状态。可以看出,前向链路闭环跟踪阶段由相位抖动等因素造成的跟踪误差仍然存在,且反向链路开环跟踪阶段存在明显的跟踪残差累积。

具体的数据对比如表 1 所列:

表 1 不同信号体制载波相位跟踪结果对比

Tab. 1 Comparison of carrier phase tracking results of different signal systems

相位跟踪误差	绝对值均值/(°)	标准差/(°)
连续星间信号	3.7743	4.7307
时分星间信号	8.5874	11.9966

从图 2 与图 3 的对比与表 1 中的数据对比来

看,传统跟踪环路无法适用于 TDD 星间测量信号的跟踪过程。

## 2 基于卡尔曼滤波的 TDD 信号跟踪技术

为了提高跟踪环路对于 TDD 信号载波相位的跟踪精度,可以对鉴相结果采用卡尔曼滤波进行处理,首先对卡尔曼滤波的原理进行介绍。

### 2.1 卡尔曼滤波模型

卡尔曼滤波可以对一个离散时间线性系统的状态进行最优估算<sup>[9-10]</sup>,考虑如图 4 所示的卡尔曼滤波系统模型。

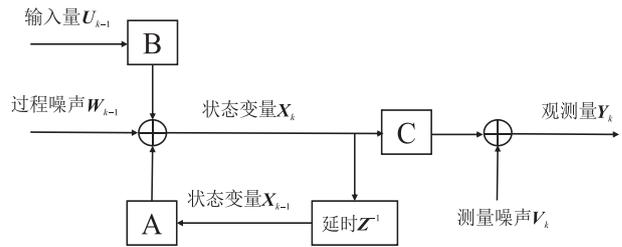


图 4 卡尔曼滤波系统模型

Fig. 4 Kalman filter system model

将此系统模型图的左半部分用状态转移方程式表达,如式(3)所列:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (3)$$

其中  $k$  代表当前测量时刻, $k-1$  代表上一测量时刻, $\mathbf{X}_k$  代表当前时刻的状态变量, $\mathbf{A}$  代表从  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的状态转移矩阵, $\mathbf{X}_{k-1}$  代表上一时刻的状态变量, $\mathbf{B}$  代表系统输入量  $\mathbf{U}_{k-1}$  与系统状态  $\mathbf{X}_k$  之间的关系矩阵,最后的  $\mathbf{W}_{k-1}$  表示过程噪声向量。

将此系统模型图的右半部分用测量方程式表达,如(4)所列:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{C}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (4)$$

其中  $\mathbf{Y}_k$  是观测向量, $\mathbf{C}$  代表状态向量  $\mathbf{X}_k$  与观测向量  $\mathbf{Y}_k$  之间的关系矩阵, $\mathbf{V}_k$  代表观测噪声。

卡尔曼滤波的具体过程如下所示:

(1) 预测:预测过程是在  $k-1$  时刻状态估计值的基础上利用状态转移方程来预测  $k$  时刻的状态值,应用到的公式如式(5)、式(6)所列:

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{k-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (6)$$

其中, $\hat{\mathbf{X}}_k^-$  表示当前时刻的先验估计值,此时尚未得到测量值  $\mathbf{Y}_k$  的验证, $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$  表示上一时刻的后验状态值, $\mathbf{Q}_{k-1}$  表示过程噪声向量  $\mathbf{W}_{k-1}$  的协方差矩阵, $\mathbf{P}_k^-$  称为误差协方差阵。

(2)更新:更新过程是利用实际测量值  $Y_k$  来校正上一步预测过程得到的先验估计值,具体步骤如式(7)、式(8)、式(9)所列:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Y_k - C \hat{X}_k^-) \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^- \quad (9)$$

将  $K_k$  称为系数矩阵,表示卡尔曼滤波的增益,  $R_k$  表示观测噪声向量  $V_k$  的协方差矩阵。此外,观测测量  $Y_k$  与其预测值  $C \hat{X}_k^-$  之间的差称为观测量的残余,即新息  $\tau_k$ 。

### 2.2 基于自适应卡尔曼滤波的 TDD 信号载波相位跟踪

在对时分星间信号进行跟踪的过程中,随着接收机运动状态的变化与信号的突变,卡尔曼滤波算法的精度将会降低甚至导致滤波的发散。这是因为当跟踪环路达到稳态后,结构上等同于带宽非常小的锁相环<sup>[11]</sup>,误差矩阵  $P_k$  和环路增益  $K_k$  都趋于一个较小的收敛值,此时测量值对更新过程的影响非常小,当时分信号的状态发生突变时,环路无法较快地响应会造成载波相位跟踪误差的累积。

针对此问题,考虑采用自适应卡尔曼滤波,在卡尔曼滤波的预测过程中引入渐消因子  $\lambda_k$  对误差协方差阵  $P_k^-$  进行自调节,其表达式如式(10)所列<sup>[12]</sup>:

$$P_k^- = \lambda_k A P_{k-1} A^T + Q_{k-1} \quad (10)$$

在卡尔曼滤波中,新息  $\tau_k$  的表达式如式(11)所列:

$$\tau_k = Y_k - C \hat{X}_k^- \quad (11)$$

由于新息  $\tau_k$  的理论协方差矩阵与实际协方差矩阵的差距一定程度上反映了新息  $\tau_k$  的大小,可以调整测量值  $Y_k$  在当前状态的后验估计值  $\hat{X}_k$  中的权重,其理论协方差矩阵的计算方法如式(12)所列<sup>[13]</sup>:

$$C_k = E(\tau_k \tau_k^T) = C P_k^- C^T + R_k \quad (12)$$

使用开窗估计法<sup>[14]</sup>可对新息的实际协方差进行实时估计,具体计算方法如式(13)所列:

$$C_k^- = \begin{cases} \frac{1}{2} \tau_k \tau_k^T, k=1 \\ \frac{\lambda_{k-1} \tau_k \tau_k^T}{\lambda_{k-1} + 1}, k>1 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $\lambda_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的渐消因子。

由于  $C_k^-$  直接采用当前时刻的新息而并未对记忆信息做平均,因此能更敏感地反映当前时刻的系统状态向量的误差。因为矩阵的迹作为所有对角线元素的和能够一定程度上反映矩阵的大小,由

此,渐消因子  $\lambda_k$  的表达式如式(14)所列:

$$\lambda_k = \max \left\{ 1, \frac{\text{trace}(C_k^-)}{\text{trace}(C_k)} \right\} \quad (14)$$

其中  $\text{trace}(\cdot)$  表示迹运算。

随着渐消因子  $\lambda_k$  的变化,更新过程中的卡尔曼滤波增益  $K_k$  也随预测过程中误差协方差阵  $P_k^-$  的变化而自适应调节,从而增强环路对信号突变的适应能力,提高环路的稳定性与跟踪精度;而当信号状态趋于稳定时,  $\lambda_k$  会取 1,自适应卡尔曼滤波退化为标准卡尔曼滤波。

将卡尔曼滤波器引入传统跟踪环路后的结构如图 5 所示。

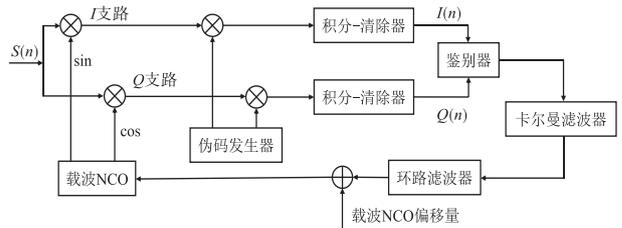


图 5 基于卡尔曼滤波的跟踪环路结构

Fig. 5 Tracking loop structure based on Kalman filter

定义相位跟踪系统状态变量如式(15)所列:

$$X_k = \begin{bmatrix} \phi_k \\ \omega_k \\ \varpi_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $\phi$ 、 $\omega$ 、 $\varpi$  分别表示相位差、相角频率、相角加速度,  $A$  代表从  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的状态转移矩阵,其表达式如式(16)所列:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T_s & \frac{T_s^2}{2} \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$T_s$  是相干积分时间,在本文中设置为 1 ms。

卡尔曼滤波过程中的系统输入量  $U_k$  为载波数控振荡器偏移量  $\omega_{nco}$ ,其与系统状态  $X_k$  之间的关系矩阵  $B$  为  $[-T_s \ 0 \ 0]^T$ 。此时整个离散化状态方程的表达式如式(17)所列:

$$\begin{bmatrix} \phi_k \\ \omega_k \\ \varpi_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & \frac{T_s^2}{2} \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{k-1} \\ \omega_{k-1} \\ \varpi_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -T_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_{nco} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_\phi \\ w_\omega \\ w_\varpi \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中  $w_\phi$ 、 $w_\omega$ 、 $w_\varpi$  分别表示相位差、相角频率、相角加

速度的状态噪声,其协方差矩阵  $\mathbf{Q}_k$  的值由接收机所用晶振的相位噪声指标与接收机的动态特性共同决定<sup>[15]</sup>,具体表达式如式(18)所列:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_\theta \begin{bmatrix} T_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{Q}_f \begin{bmatrix} \frac{T_s^3}{3} & \frac{T_s^2}{2} & 0 \\ \frac{T_s^2}{2} & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{Q}_a \begin{bmatrix} \frac{T_s^5}{20} & \frac{T_s^4}{8} & \frac{T_s^3}{6} \\ \frac{T_s^4}{8} & \frac{T_s^3}{3} & \frac{T_s^2}{2} \\ \frac{T_s^3}{6} & \frac{T_s^2}{2} & T_s \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中  $\mathbf{Q}_\theta$  与  $\mathbf{Q}_f$  由所用频率标准源的短期频率稳定度决定,  $\mathbf{Q}_a$  则由接收机的运动特性决定。

此外,定义相位跟踪系统的观测量为鉴相误差  $\varphi_k$ , 状态向量与观测向量之间的关系矩阵表达式为  $[1 \ 0 \ 0]$ , 观测方程具体如式(19)所列:

$$\varphi_k = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \omega_k \\ \varpi_k \end{bmatrix} + \mathbf{v}_\varphi \quad (19)$$

其中  $\mathbf{v}_\varphi$  表示鉴相器观测噪声,其协方差矩阵  $\mathbf{R}_k$  的值由载噪比与相干积分时间  $T_s$  等参数决定。将状态变量  $\mathbf{X}_k$  等元素与各项参数代入自适应卡尔曼滤波的预测更新过程后即可完成对鉴相结果的处理。

### 2.3 仿真结果分析

根据点对点星间测量典型应用场景,本次实验环境具体参数如表 2 所列。

表 2 实验参数设置

Tab. 2 Experimental parameter setting

仿真参数	数值
射频信号载波频率	32 GHz
中频信号中心频率	140 MHz
仿真时长	3000 ms
前向链路时隙长度	100 ms
反向链路时隙长度	100 ms
真实残留载波频率	200 Hz
载噪比	40 dBHz
相干积分时间	1 ms
短期频率稳定度	$5 * 10^{-12}$

在传统跟踪环路运行 1 s 之后引入卡尔曼滤波,基于卡尔曼滤波的 TDD 信号载波相位跟踪结果如图 6 所示:

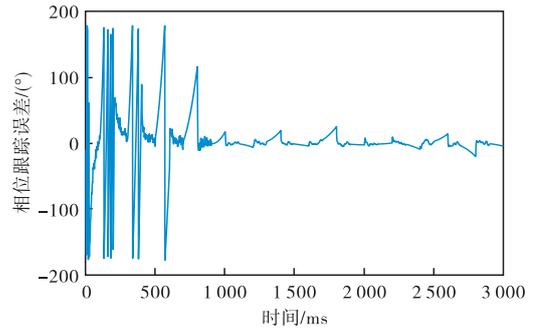


图 6 基于卡尔曼滤波的载波相位跟踪误差

Fig. 6 Carrier phase tracking error based on Kalman filter

从图 6 可以看出,前向链路闭环跟踪阶段由相位抖动等因素造成的跟踪误差明显减小,但开环阶段的跟踪残差仍然存在。

基于自适应卡尔曼滤波的 TDD 信号载波相位跟踪结果如图 7 所示:

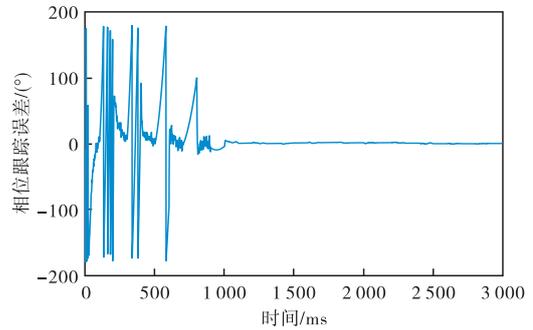


图 7 基于自适应卡尔曼滤波的载波相位跟踪误差

Fig. 7 Carrier phase tracking error based on adaptive Kalman filter

从图 7 的运行结果来看,引入自适应卡尔曼滤波后相位跟踪误差减小到了接近零的位置,这是由于自适应卡尔曼滤波能够调节增益矩阵,保证载波环路对于 TDD 信号的跟踪精度。

具体的相位跟踪误差数据值如表 3 所列。从表 3 中的数据来看,传统跟踪环路引入卡尔曼滤波后,时分星间测量信号载波相位跟踪误差的对值均值降低了 52.5%,标准差降低了 49.7%,而引入自适应卡尔曼滤波后跟踪误差的绝对值均值降低了 92.9%,标准差降低了 93.5%。

表 3 时分双工信号载波相位跟踪结果对比

Tab. 3 Comparison of carrier phase tracking results of TDD signal

相位跟踪误差	绝对值均值/(°)	标准差/(°)
传统载波跟踪环	8.5874	11.9966
基于卡尔曼滤波的载波跟踪环	4.0783	6.0340
基于自适应卡尔曼滤波的载波跟踪环	0.6125	0.7769

从以上对于实验结果分析可知,文章采取的基于卡尔曼滤波的载波环路跟踪方法能够实现 TDD 星间测量信号的载波相位跟踪,证明了原理的正确性与算法的可实现性。

为了进一步验证传统跟踪环路、卡尔曼跟踪环路与自适应卡尔曼跟踪环路对载波相位跟踪结果的影响,在表 2 所设置的实验参数的基础上,分别选取载噪比  $C/N_0$  为 35 dBHz、40 dBHz、45 dBHz、50 dBHz 的情况开展实验,结果如图 8 所示。

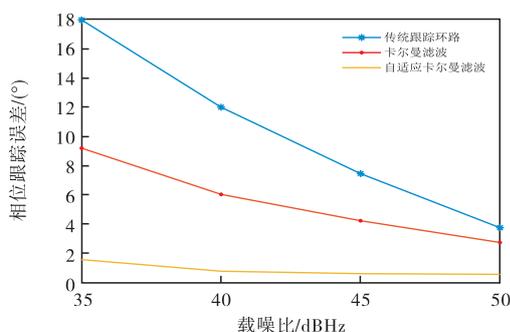


图 8 不同环路跟踪技术载波相位跟踪误差

Fig. 8 Carrier phase tracking error with different loop tracking techniques

从图 8 实验结果来看,在不同载噪比条件下,基于卡尔曼滤波的载波环路跟踪方法均能有效降低 TDD 星间测量信号的载波相位跟踪误差,自适应卡尔曼滤波的效果优于卡尔曼滤波,具体随载噪比的增加逐渐降低。

### 3 结论

文章的主要工作是完成了 TDD 星间测量信号的模型设计,并提出了一种基于卡尔曼滤波的 TDD 星间测量信号跟踪方法。

传统的载波环路跟踪在反向链路无信号的开环阶段跟踪结果较为发散,且在前向链路有信号的闭环阶段受相位抖动与动态应力的影响使得跟踪误差较大。文章提出的基于自适应卡尔曼滤波器的载波跟踪环路技术较好的解决了上述问题,可以在闭环阶段对由相位抖动等因素造成的跟踪误差起到明显的抑制作用,且在开环阶段根据当前状态进行外推使载波相位跟踪结果收敛,自适应地调节增益矩阵使滤波结果接近最优,载波相位跟踪误差

的抖动明显减小。

总体而言,文章提出的方法较好地解决了点对点 TDD 体制星间测量信号的跟踪问题,降低了接收机测量误差,对提高星间测量的精度具有十分重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 吴光耀. 星间链路网络高效组网与传输协议研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.
- [2] 徐勇,常青,于志坚. GNSS 星间链路测量与通信新方法研究[J]. 中国科学(技术科学),2012,42(2): 230-240.
- [3] 陈建云,周永斌,杨俊. 卫星导航系统星间链路测量与通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2021.
- [4] 陈忠贵,武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(6)835-845.
- [5] XIE J, KANG C B. Engineering innovation and the development of the BDS-3 navigation constellation[J]. Engineering,2021,7(5):558-563.
- [6] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [7] 邓中亮,罗牧星,莫君,等. 基于 TDD 模式下的开环跟踪方法研究[C]//第十届中国卫星导航年会,2019: 39-43.
- [8] 韩美林,乔成芳. GPS 接收机跟踪算法的设计与仿真[J]. 舰船电子工程,2018,38(9)45-48.
- [9] 张勇,姜鑫蕾,杨文武,等. 基于卡尔曼滤波的 GNSS 系统联合定位技术研究[J]. 电子测量技术,2021,44(3) 109-113.
- [10] 李珂,王瑞,宋建强. 基于卡尔曼滤波的雷达单目标跟踪算法研究[J]. 空间电子技术,2019,16(1): 16-20.
- [11] QIAN Y, CUI X W, LU M Q, et al. Steady-state performance of Kalman filter for DPLL[J]. Tsinghua Science & Technology,2009,14(4):470-473.
- [12] 刘春,卫吉祥,李维华,等. 改进的自适应卡尔曼滤波在北斗伪距单点定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(10):142-148.
- [13] 王广玉,窦磊,窦杰. 基于自适应卡尔曼滤波的多目标跟踪算法[J]. 计算机应用,2022,42(S01):271-275.
- [14] 宋会杰,董绍武,屈俐俐,等. 基于 Sage 窗的自适应 Kalman 滤波用于钟差预报研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(7): 1809-1816.
- [15] 罗牧星. 基于中断信号的跟踪环路设计及载波平滑 TDOA 算法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2020.

作者简介:孙田伟(1998—),陕西韩城人,硕士研究生。主要研究方向为空间导航技术。E-mail:2602298723@qq.com

通讯作者:钟兴旺(1967—),山西河曲人,博士,研究员。主要研究方向为卫星导航及星间链路技术。E-mail:Zhongxw1391@qq.com