doi:10.11887/j.cn.201603005 http://journal.nudt.edu.cn

# BDS导航信号抗电离层闪烁载波跟踪的自适应卡尔曼滤波算法*

孙鹏跃,唐小妹,陈华明,孙广富
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要**:电离层闪烁会引起导航信号幅度和相位的快速衰落,严重影响跟踪环路的精度和稳健性,而相比频率跟踪和伪码跟踪,载波跟踪环路更易受电离层闪烁的影响而失锁。因此,提出一种基于相位锁定指示自适应扩展卡尔曼滤波的北斗导航信号抗电离层闪烁载波跟踪算法,其以同相与正交支路的积分结果估计相位锁定指示值,并采用该指示作为控制参数对不同闪烁场景下扩展卡尔曼滤波的观测向量进行自适应调整,这不仅能够提高跟踪环路的精度和稳健性,而且能够降低扩展卡尔曼滤波发散的概率。实验结果验证了相关分析和所提跟踪算法的有效性。

**关键词**:电离层闪烁;相位锁定指示;自适应扩展卡尔曼滤波;鉴相误差;失锁概率
**中图分类号**:P352 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2016)03-025-07

# Adaptive extended Kalman filter carrier tracking algorithm for BDS signals under ionosphere scintillation conditions

*SUN Pengyue*, *TANG Xiaomei*, *CHEN Huaming*, *SUN Guangfu*
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract**: Ionospheric scintillation is a rapid change in the phase and amplitude of navigation signals, resulting in degraded accuracy and robustness of signal tracking loops. Compared with the frequency tracking loop and delay tracking loop, carrier tracking loop is much weaker, and will lose lock much more continually in scintillation. Therefore, a carrier tracking algorithm for BeiDou signals scintillation mitigation based on adaptive EKF (extended Kalman filter) was proposed. The integration of in-phase and quadrature channels was used to estimate the phase lock indicator values which are the control parameter to adjust the measurement vector of EKF adaptively with different scintillation scenarios. Through the adaptive measurement vector, the accuracy and robustness of the tracking can be improved and the probability of filter divergence can be decreased. Experimental results prove the validity of the analysis and the proposed carrier tracking algorithm.

**Key words**: ionosphere scintillation; phase lock indicator; adaptive extended Kalman filter; discriminator error; probability of loss-of-lock

电离层不均匀性会造成全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号的绕射和散射,形成电离层闪烁[1-2],引起信号幅度和相位的快速衰落,严重时导致信号失锁,会显著影响监测接收机等系统设备的连续性和稳定性[3-4]。中国区域电离层闪烁较美国及欧洲等国家和地区更为复杂多变,尤其是赤道上空电离层的异常导致中国南方地区电离层活动十分活跃[5],对北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS)用户性能产生了非常严重的影响。相比于频率跟踪和伪码跟踪,载波跟踪环路更为脆弱[6-7],更易受电离层闪烁的影响而失锁。当相位误差较小时,鉴别器在0°附近的线性近似是相位锁定环路(Phase Lock Loop, PLL)的基础。尽管这种近似在大部分情况下能够满足,但在电离层闪烁影响下,信号幅度衰减和相位波动分别可达15 dB和±2 rad[8],这些误差必然会传递到信号的跟踪过程,增大PLL的鉴相误差,使鉴别器的线性近似条件不再满足,显著影响PLL的精度和稳健性。

由于电离层闪烁具有突发性、偶发性和区域性,因此难以从系统角度发掘有效的抗电离层闪烁措施,更多的是从增强用户终端稳健性入手研究电离层闪烁减弱技术[9-10]。文献[8]提出了快速自适应带宽跟踪算法,其跟踪环路带宽能够根据电离层闪烁的变化进行快速调整,一定程度上提升了载波跟踪环路的性能;文献[11]在分析幅度闪烁对同相和正交支路影响的基础上研究了频

* **收稿日期**:2015-12-30
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(61403413)
**作者简介**:孙鹏跃(1988—),男,陕西咸阳人,博士研究生,E-mail:sunnnpy@163.com;
孙广富(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:sunguangfu_nnc@163.com

率辅助 PLL 算法,发现在同相支路增加预滤波模块能够有效减轻幅度闪烁的影响;文献[12 - 14]研究了基于固定增益扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的抗电离层闪烁载波跟踪算法,可根据等效环路带宽和预检积分时间确定卡尔曼增益,降低了周跳次数和失锁概率,但其滤波增益固定,无法适应不同强度的闪烁环境;文献[15]的跟踪算法尽管能够根据信号载噪比调整滤波增益以适应不同强度的电离层闪烁,但其滤波过程的观测向量仍由反正切鉴别器得到,存在传统相位锁定环路(Conventional Phase Lock Loop, CPLL)线性近似的限制;文献[16]对电离层幅度和相位闪烁建立自回归模型,虽然避免了 CPLL 的非线性问题,但随着闪烁的增强,环路的稳健性仍有待提高。因此,进一步提高电离层闪烁影响下导航信号的跟踪性能已成为 BDS 导航信号抗电离层闪烁载波跟踪研究的一个热点。

## 1　闪烁条件下 PLL 误差模型

电离层闪烁会引起 GNSS 信号幅度和相位的快速波动,接收机收到的信号为:

$$r(t) = A_0\delta A C(t-\tau_d)D(t-\tau_d)\cos(\omega t + \phi_0 + \delta\phi) + n(t) \tag{1}$$

式中,$A_0$ 为信号幅度,$C(t)$ 为扩频码,$\tau_d$ 为伪码延迟,$D(t)$ 为电文序列,$\omega$ 为载波频率, $\phi_0$ 为初始相位, $n(t)$ 为加性高斯白噪声,$\delta A$ 和 $\delta\phi$ 为电离层闪烁引起的幅度和相位波动。电离层闪烁的强度一般采用幅度闪烁指数 $S_4$ 和相位闪烁指数 $\sigma_\phi$ 来表征[1-4]:

$$\begin{cases} S_4 = \dfrac{\sqrt{E[SI^2] - (E[SI])^2}}{E[SI]} \\ \sigma_\phi = \sqrt{E[\phi^2] - (E[\phi])^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中,$SI = A^2 = (A_0\delta A)^2$ 为信号幅度, $\phi = \phi_0 + \delta\phi$ 为载波相位。

在电离层闪烁条件下, I 和 Q 支路的相干积分结果为:

$$\begin{cases} IP_k = A(t)\cos(\varphi_R + \varphi_S) + n_I \\ QP_k = A(t)\sin(\varphi_R + \varphi_S) + n_Q \end{cases} \tag{3}$$

式中,$A(t) = A_0\delta A D(t)$,$\varphi_S$ 为电离层闪烁引入的鉴相误差,$\varphi_R$ 为真实相位误差,$n_I$ 和 $n_Q$ 为两路正交的零均值高斯白噪声。进一步分析有:

$$\begin{cases} IP_k = A(t)\cos\varphi_R\cos\varphi_S - A(t)\sin\varphi_R\sin\varphi_S + n_I \\ \quad\; = A_S(t)\cos\varphi_R + n_{SI} + n_I \\ QP_k = A(t)\sin\varphi_R\cos\varphi_S + A(t)\cos\varphi_R\sin\varphi_S + n_Q \\ \quad\; = A_S(t)\sin\varphi_R + n_{SQ} + n_Q \end{cases} \tag{4}$$

式中,$A_S(t) = A(t)\cos\varphi_S$ 定义为闪烁影响下的积分包络,$n_{SI} = -A(t)\sin\varphi_R\sin\varphi_S$ 和 $n_{SQ} = A(t)\cdot\cos\varphi_R\sin\varphi_S$ 定义为闪烁引入的加性非高斯噪声。式(4)表明,电离层闪烁不仅会造成 I 和 Q 积分结果包络的快速波动,而且会在其上叠加额外的非高斯噪声 $n_{SI}$ 和 $n_{SQ}$,这两方面影响将会严重降低环路后续的鉴别器和滤波器的性能。

常用的四种鉴别器分别为 ATAN($QP_k/IP_k$), $QP_k \times IP_k$, $QP_k/IP_k$ 以及 $QP_k \times \mathrm{sign}(IP_k)$,在无噪声的理想情况下,ATAN 是唯一在[$-\pi/2, \pi/2$]上保持线性的鉴别器,然而,在噪声情况下,所有鉴别器均只在 0°附近保持线性,这是 CPLL 的理论基础。在电离层闪烁影响下,ATAN 鉴别器输出为:

$$\begin{aligned} \varphi_D &= ATAN\left(\frac{QP_k}{IP_k}\right) = \arctan\left[\frac{A_S(t)\sin\varphi_R + n_{SQ} + n_Q}{A_S(t)\cos\varphi_R + n_{SI} + n_I}\right] \\ &\approx \arctan\left[\frac{A_S(t)\sin\varphi_R}{A_S(t)\cos\varphi_R}\right] = \varphi_R \end{aligned} \tag{5}$$

式中,$\varphi_D$ 为鉴别器输出误差。在闪烁较弱时,$n_{SI}$ 和 $n_{SQ}$ 较小,$\varphi_D$ 近似等于真实相位误差 $\varphi_R$;随着闪烁强度的增强,$n_{SI}$ 和 $n_{SQ}$ 的影响不断增大,则 ATAN 鉴别器的非线性特性越来越明显,以致鉴别器输出 $\varphi_D$ 无法正确反映 $\varphi_R$ 的变化。

当 PLL 锁定输入信号后,相差 $\varphi_D$ 在零值附近波动,然而,在电离层闪烁影响下,输入信号的噪声必然会反映在鉴相结果上,相差 $\varphi_D$ 会因式(1)中 $\delta\phi$ 而快速波动,影响 PLL 的稳定性。假设幅度和相位闪烁无相关性,则 PLL 鉴相误差标准差为[17-18]:

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{OSC}^2} \tag{6}$$

式中,$\sigma_S$ 为相位闪烁均方差,$\sigma_T$ 为热噪声均方差,$\sigma_{OSC}$为晶振噪声均方差。为简化分析,此处不考虑其他相位误差的影响,如多径误差等,并且,由于晶振噪声与电离层闪烁无关,故假设其固定为 5.7°。电离层闪烁条件下,热噪声均方差 $\sigma_T$ 主要受幅度闪烁影响,计算方法为[3]:

$$\sigma_T = \frac{180}{\pi}\sqrt{\frac{B_n}{(C/N_0)(1-S_4^2)}\left[1 + \frac{1}{2T_{coh}(C/N_0)(1-S_4^2)}\right]} \tag{7}$$

式中:$B_n$ 为 PLL 带宽,Hz;$C/N_0$ 为载噪比,Hz;$T_{coh}$ 为预检积分时间,s。在无幅度闪烁条件下,$S_4$ 为 0,则式(7)变为标准的热噪声均方差公式[17]。

相位闪烁在短时间间隔上是强相关的,其观测功率谱密度近似遵循 $Tf^{-p}$ 的形式,$p$ 的范围为 2 ~ 3,其中 $T$ 为强度因子(单位 $\mathrm{rad}^2/\mathrm{Hz}$),与相位

闪烁指数 $\sigma_\phi$ 相关。相位闪烁均方差可近似为[3]:

$$\sigma_S \cong \frac{180}{\pi}\sqrt{\frac{\pi T}{k f_n^{p-1}\sin\left(\frac{2k+1-p}{2k}\pi\right)}} \tag{8}$$

式中,$k$ 为 PLL 阶数,$f_n$ 为环路自然频率。对于 3 阶 PLL 而言,$k$ 为 3,$f_n$ 为 1.91 Hz。将式(7)和式(8)代入式(6),则可得到电离层闪烁下 PLL 的鉴相误差标准差为:

$$\sigma_{\mathrm{PLL}}^2 = \frac{B_n}{(C/N_0)(1-S_4^2)}\left[1+\frac{1}{2T_{\mathrm{coh}}(C/N_0)(1-S_4^2)}\right] + \frac{\pi T}{k f_n^{p-1}\sin\left(\frac{2k+1-p}{2k}\pi\right)} + 0.01 \tag{9}$$

由式(9)可知,相比幅度闪烁,PLL 鉴相误差更易受相位闪烁影响。图 1 给出了 3 阶 PLL 在不同电离层闪烁条件下的鉴相误差标准差,环路带宽 $B_n$ 为 15 Hz,预检积分时间 $T_{\mathrm{coh}}$为 5 ms,载噪比 $C/N_0$为 40 dB-Hz。

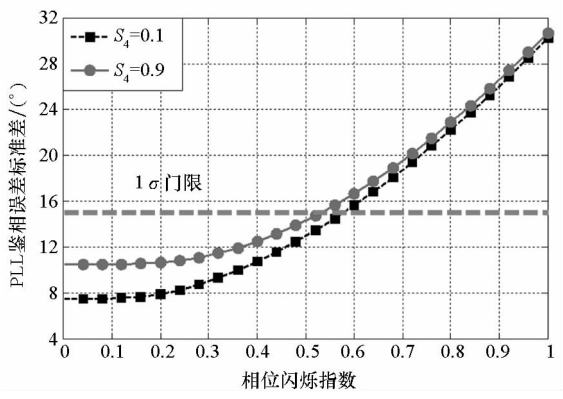



图 1　不同强度闪烁下 PLL 相位抖动

Fig. 1　PLL phase jitter under different ionospheric scintillation

图 1 表明,当相位闪烁指数为 0.55 左右时,PLL 相位抖动达到 1$\sigma$ 经验门限 15°[18]。而只有在相位闪烁指数小于 0.4 时,PLL 抖动才会随着幅度闪烁的增强而明显增大,之后,PLL 抖动主要受相位闪烁影响,这与式(9)的理论分析结果一致。

## 2　闪烁自适应 EKF 载波跟踪算法

在电离层闪烁条件下,GNSS 信号相位估计是一种非平稳、非线性的参数估计,为了避免 CPLL 的鉴别器和环路滤波器在闪烁条件下的性能恶化,并进一步提高跟踪环路的稳健性,提出基于闪烁自适应 EKF 的抗电离层闪烁载波跟踪算法。首先对传统基于 EKF 的载波相位估计进行简要回顾[18],其系统观测向量为:

$$\boldsymbol{x}(k) = \begin{bmatrix} A(k)\cos(\varphi_E(k)) \\ A(k)\sin(\varphi_E(k)) \end{bmatrix} + \boldsymbol{n}(k) \tag{10}$$

式中,$\varphi_E = \varphi_R + \varphi_S$ 为闪烁条件下总的相位误差,$\boldsymbol{n}^T(k) = [n_I(k) \quad n_Q(k)]$为观测噪声。令 $\boldsymbol{s}(k) = [\varphi_E(k)\ \omega_0(k)\ \omega_1(k)\ \omega_2(k)]^T$ 为系统状态向量,其中 $\omega_0(k)$, $\omega_1(k)$, $\omega_2(k)$分别为 $\varphi_E(k)$的 1,2,3 阶导数,则描述系统动态的状态转移方程为:

$$\boldsymbol{s}(k+1) = \boldsymbol{\Phi}\cdot\boldsymbol{s}(k) + \boldsymbol{\zeta}(k) \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{\Phi}$ 为状态转移矩阵;$\boldsymbol{\zeta}(k)$为状态噪声,其实质为状态向量泰勒展开式的余项。

系统观测方程可建模为:

$$\boldsymbol{x}(k) = \begin{bmatrix} A(k)\cos(\boldsymbol{L}\boldsymbol{s}(k)) \\ A(k)\sin(\boldsymbol{L}\boldsymbol{s}(k)) \end{bmatrix} + \boldsymbol{n}(k) \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{L} = [1\ 0\ 0\ 0]$,将其在 $\hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1)$处线性化,则可得到系统观测矩阵 $\boldsymbol{H}(k)$为:

$$\boldsymbol{H}(k) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{s}}h(\boldsymbol{s})\Big|_{\boldsymbol{s}=\hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1)} = \begin{bmatrix} -A(k)\sin(\hat{\varphi}_E(k|k-1)) \\ A(k)\cos(\hat{\varphi}_E(k|k-1)) \end{bmatrix}\boldsymbol{L} \tag{13}$$

在上述线性模型的基础上,EKF 载波相差估计的递推方程可总结如下:

状态预测:$\hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1) = \boldsymbol{\Phi}\hat{\boldsymbol{s}}(k-1|k-1)$

预测方差:$\boldsymbol{M}(k|k-1) = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{M}(k-1|k-1)\cdot\boldsymbol{\Phi}^T + \boldsymbol{Q}$

增益矩阵:$\boldsymbol{K}(k) = \boldsymbol{M}(k|k-1)\boldsymbol{H}^T(k)[\boldsymbol{H}(k)\cdot\boldsymbol{M}(k|k-1)\boldsymbol{H}^T(k) + \boldsymbol{R}]^{-1}$

状态滤波:$\hat{\boldsymbol{s}}(k|k) = \hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1) + \boldsymbol{K}(k)[\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{H}(k)\hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1)]$ (14)

状态方差:$\boldsymbol{M}(k|k) = [\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}(k)\boldsymbol{H}(k)]\cdot\boldsymbol{M}(k|k-1)$

其中:$\boldsymbol{Q}$ 为状态噪声协方差,$\boldsymbol{\Phi}$ 与 $\boldsymbol{Q}$ 的具体计算参见文献[18];$\boldsymbol{R}$ 为观测噪声协方差;$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

尽管上述 EKF 载波相位估计算法避免了 CPLL 鉴别器在闪烁条件下的非线性问题,但可以看到,式(14)仍需要以观测向量 $\boldsymbol{x}(k)$更新系统状态。而当闪烁变强时,$\boldsymbol{x}(k)$会无法正确反映原始信号的信息,进而降低式(14)所述滤波算法的精度,甚至引起状态滤波发散。针对该问题,提出一种基于相位锁定指示(Phase Lock Indicator, PLI)的闪烁自适应 EKF 算法——PLI - EKF,其能够根据闪烁强度对观测向量进行加权处理,确保观测向量能够更好地反映原始信号信息,进一步提高闪烁条件下相位锁定环路的稳健性。

PLI 值可由 I 和 Q 支路的相干积分结果 $IP_k$ 和 $QP_k$ 计算得到,定义为[19]:

$$PLI = \frac{IP_k^2 - QP_k^2}{IP_k^2 + QP_k^2} = \cos(2\varphi_E) \tag{15}$$

其值在[ -1, +1]之间波动,其值越大,则跟踪环路的精度和稳健性越高,反之,则越差。在电离层闪烁影响下,PLI 值会随着闪烁而快速波动。图 2 给出了不同幅度和相位闪烁条件下的 PLI 值,可以看出,当闪烁较弱时,PLI 值主要集中在 1 附近,随着闪烁的增强,PLI 值逐渐减小,其值能够很好地反映电离层闪烁的强弱,因此,PLI 值可以作为不同闪烁条件下观测向量自适应调整的控制参数。

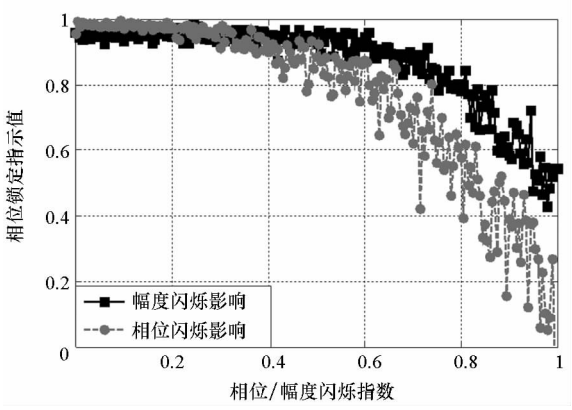



图 2　不同闪烁条件下的相位锁定指示值

Fig. 2　PLI value under different scintillation conditions

鉴于此,设计如式(16)所示的闪烁自适应观测向量:

$$\boldsymbol{x}_{PLI}(k) = PLI(k)\boldsymbol{x}(k) + [1 - PLI(k)]\boldsymbol{x}_0(k) \tag{16}$$

式中,$\boldsymbol{x}_0(k)$为观测向量修正值。当闪烁较弱时,PLI 值集中于 1 左右,则自适应观测向量 $\boldsymbol{x}_{PLI}(k)$主要由当前时刻的观测向量 $\boldsymbol{x}(k)$决定;随着闪烁的增强,PLI 值逐渐缩小,则 $\boldsymbol{x}(k)$的权值逐渐缩小,$\boldsymbol{x}_{PLI}(k)$逐渐受到修正向量 $\boldsymbol{x}_0(k)$的修正,其更新策略为:

$$\boldsymbol{x}_0(k) = \boldsymbol{x}_{PLI}(k-1) + \boldsymbol{H}(k-1)\Delta\boldsymbol{s}(k-1) \tag{17}$$

式中,$\Delta\boldsymbol{s}(k-1) = \hat{\boldsymbol{s}}(k|k-1) - \hat{\boldsymbol{s}}(k-1|k-1)$为系统状态向量的增量,主要反映了信号动态。当闪烁较弱时,PLI 值较大,$\boldsymbol{x}_{PLI}(k-1)$主要由 $\boldsymbol{x}(k-1)$确定,则所设计的修正值 $\boldsymbol{x}_0(k)$实质是上一个观测向量的一步预测;当闪烁较强时,PLI 值较小,$\boldsymbol{x}_{PLI}(k-1)$主要由 $\boldsymbol{x}_0(k-1)$确定,继续递推可知,$\boldsymbol{x}_0(k)$实质是观测向量的多步预测。

式(16)、式(17)的设计可以确保自适应观测向量 $\boldsymbol{x}_{PLI}(k)$能够较好地反映原始信号的信息,有效降低了 EKF 滤波发散的概率。用修正后的观测向量替换式(14)中状态滤波方程的观测向量 $\boldsymbol{x}(k)$即可实现基于 PLI 的闪烁自适应 EKF 算法,载波相位跟踪环路架构如图 3 所示(图中 $N_F$ 为频率系数)。

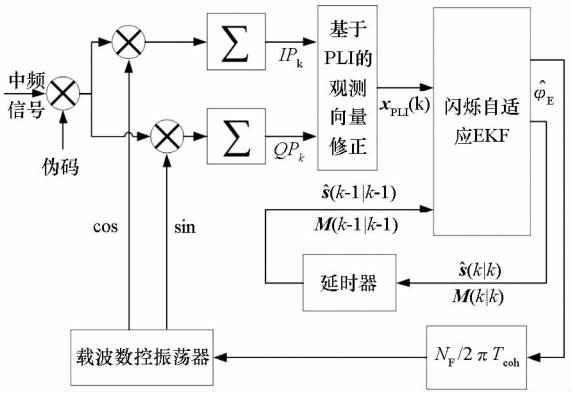



图 3　基于自适应 EKF 的载波跟踪环路架构

Fig. 3　Architecture of carrier tracking loop based on adaptive EKF

可以看到,与 CPLL 相比,上述跟踪环路用基于 PLI 的观测向量修正和闪烁自适应 EKF 模块替代了 CPLL 中的鉴别器和环路滤波器,其以 I 和 Q 支路的积分结果直接估计信号载波相位,避免了传统鉴别器的非线性问题。而与传统基于 EKF 算法的跟踪环路相比,改进算法增加了基于 PLI 的观测向量自适应修正模块,能够根据不同的闪烁强度对观测向量进行自适应修正,进一步提高了环路的精度和稳健性。

## 3　仿真验证

共设计了五种闪烁场景,如表 1 所示。导航信号模拟以 BDS B1 频点卫星 5 为例,载噪比设置为 40 dB-Hz,信号中频频率设为 9.548 MHz,每种场景仿真生成 10 min 的导航信号,利用高速示波器采样中频信号,采样频率为 38.192 MHz,并将原始信号保存为二进制文件。采用本单位研制的集成了 PLI - EKF 跟踪环路的北斗软件接收机,对高速示波器采样的中频信号进行处理,不同闪烁条件下,信号幅度和相位波动特性如表 1 所示。

通过对比 PLI - EKF 跟踪算法和传统 EKF 跟踪算法以及 CPLL 的鉴相误差标准差和失锁概率,评估 PLI - EKF 跟踪算法的抗电离层闪烁性能。对于所有的仿真,软件接收机参数设置如表 2 所示。

**表 1　北斗 B1 信号幅度和相位波动特性**

Tab. 1　Fluctuation of amplitude and phase of BeiDou signal

| 闪烁强度 | 幅度波动/dB | 相位波动/rad |
|---|---|---|
| 弱闪烁: $S_4=0.1$ $\sigma_\varphi=0.05$ | [ -1, 1] | [ -0.1, 0.1] |
| 较弱闪烁: $S_4=0.3$ $\sigma_\varphi=0.25$ | [ -2.2, 2.2] | [ -0.2, 0.2] |
| 中等闪烁: $S_4=0.5$ $\sigma_\varphi=0.35$ | [ -5, 4] | [ -0.6, 0.7] |
| 较强闪烁: $S_4=0.6$ $\sigma_\varphi=0.5$ | [ -7, 5.6] | [ -1, 1.1] |
| 强闪烁: $S_4=0.9$ $\sigma_\varphi=0.75$ | [ -10, 6.5] | [ -1.8, 1.8] |

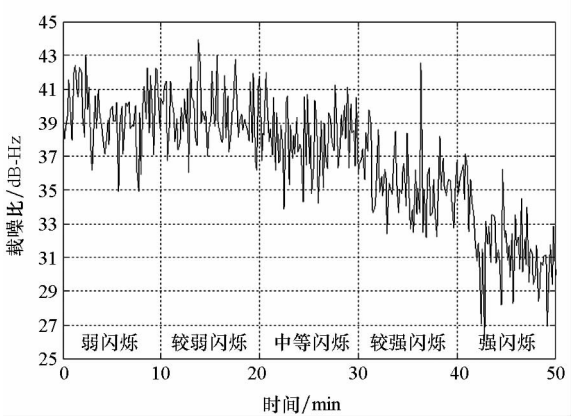
**表 2　软件接收机参数设置**

Tab. 2　Parameter settings of software receiver

| 跟踪算法 | 鉴别器 | $B_n$/Hz | $T_{coh}$/ms |
|---|---|---|---|
| CPLL | ATAN | 15 | 5 |
| 传统 EKF | | 自适应 | 5 |
| PLI – EKF | | 自适应 | 5 |

首先,对不同闪烁条件下锁相环观测量的变化规律进行分析,图 4 分别给出了接收机估计的载噪比和鉴相误差随着电离层闪烁的变化。由图可以看到,随着闪烁的增强,$C/N_0$ 的衰减越来越大,在强闪烁条件下, $C/N_0$ 的衰减可达 13 dB-Hz,这将会导致 PLL 失锁。同样,鉴相误差也随着闪烁的增强显著增大,这是由于输入信号的误差会不可避免地反映在鉴别器的输出上。

其次,针对表 1 设定的五种闪烁场景,分别计算每种闪烁场景下 10 min 内 PLL 鉴相误差的标准差,由于采用软件接收机仿真验证跟踪环路性能,因此可直接对环路鉴相误差序列进行统计分析,计算得到其标准差。令跟踪环路鉴相误差序列为 $\boldsymbol{\varphi}_E=\{\varphi_E(1),\varphi_E(2),\cdots,\varphi_E(N)\}$,其中



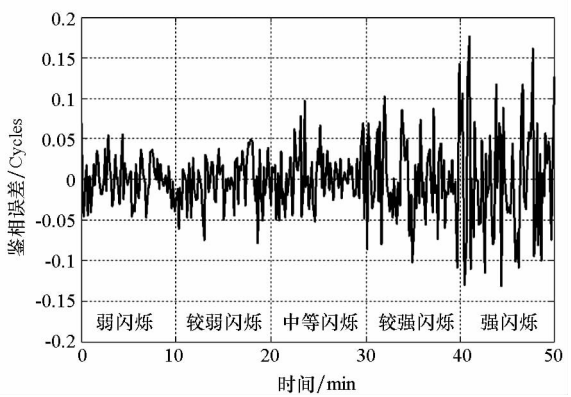




图 4　不同闪烁强度下载噪比和鉴相误差的恶化情况

Fig. 4　Degradation of $C/N_0$ and carrier phase error under different scintillation conditions

$N=60\ 000$为每分钟的鉴相误差序列长度,则鉴相误差标准差为:

$$STD(\boldsymbol{\varphi}_E)=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}|\varphi_E(k)-\overline{\boldsymbol{\varphi}_E}|^2} \quad (18)$$

式中,$\overline{\boldsymbol{\varphi}_E}$为鉴相误差序列均值。不同跟踪算法的鉴相误差标准差如图 5 所示。

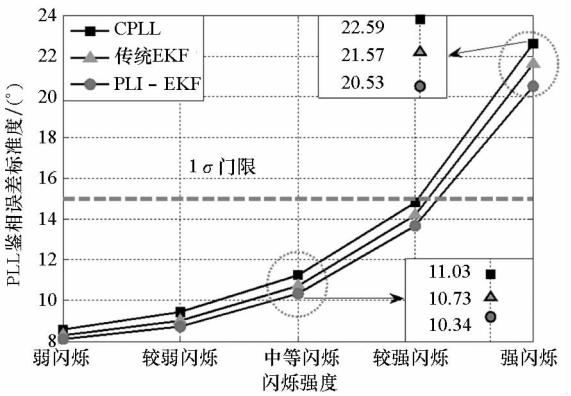



图 5　不同闪烁强度下鉴相误差标准差对比

Fig. 5　Standard deviation of phase error of the three loops under different scintillation conditions

图 5 表明,在不同电离层闪烁下,PLI – EKF 环路的鉴相误差标准差均小于 CPLL 和传统 EKF 的,并且闪烁越强,性能改善越明显。在中等和强闪烁下,相比于 CPLL,PLI – EKF 环路的鉴相误差标准差分别降低了 8% 和 9% 左右。这是由于随着闪烁强度的增强,信号的载噪比衰减和鉴相误差的波动增大,导致鉴别器工作于非线性区域,而 PLI – EKF 并不存在非线性的限制,故其跟踪性能更好。另外,随着闪烁的增强,观测向量的误差也越来越大,而 PLI – EKF 针对观测向量进行了自适应修正,故其跟踪性能比传统 EKF 有所提升。

同样可以看到,当闪烁较小时,三种跟踪算法的性能相当,这是由于此时鉴别器处于线性区域,且观测向量的误差较小。

最后,为了更加客观地分析不同环路的抗电离层闪烁性能,对电离层闪烁条件下 PLL 的失锁概率进行统计分析。在给定 PLL 相关参数后,可得其跟踪门限为 $C_t/N_0$(单位为 Hz),则 PLL 的失锁概率为:

$$P_{\text{loss}} = P(C/N_0 < C_t/N_0) = P\left(\frac{\overline{IP_k^2} - \overline{QP_k^2}}{\overline{QP_k^2}T_{\text{coh}}} < C_t/N_0\right) \tag{19}$$

式中,$C/N_0$ 为接收机估计的载噪比,$\overline{IP_k^2}$ 和 $\overline{QP_k^2}$ 分别为载波环路 I 和 Q 支路的平均功率,可由环路积分结果计算得到。在电离层闪烁下,其会随着电离层闪烁而快速波动。

针对上述的数据仿真及接收机参数,可设 PLL 的跟踪门限为 35 dB-Hz,I 和 Q 支路功率平均间隔为 100 ms,则式(19)的失锁概率为:

$$P_{\text{loss}} = P(\overline{IP_k^2}/\overline{QP_k^2} < 13.56) \tag{20}$$

此时对应的 PLL 鉴相误差为:

$$\varphi_{\text{loss}} = \arctan(\overline{QP_k}/\overline{IP_k}) = 15.56° \tag{21}$$

根据式(20)的定义,针对表 1 设定的五种闪烁场景分别计算三种跟踪算法的失锁概率,结果如图 6 所示。

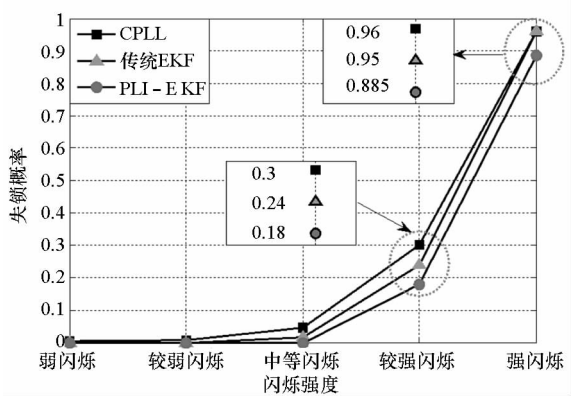



图 6 不同闪烁强度下失锁概率对比

Fig. 6 Probability of loss-of-lock of the three loops under different scintillation conditions

图 6 表明,在较强闪烁下,相比于 CPLL 和传统 EKF,PLI - EKF 的失锁概率分别降低了 40% 和 25%。但在强闪烁下,PLI - EKF 的失锁概率并没有像鉴相误差标准差一样降低更多,这是由于在强闪烁下,尽管环路的鉴相误差标准差改善更多,但标准差已远大于 $1\sigma$ 门限,且此时信号载噪比已远低于跟踪门限,故失锁概率改善反而没有中等闪烁明显。同样,当闪烁较小时,由于载噪比和鉴相误差恶化均不严重,故三种跟踪算法的失锁概率基本相同。

## 4 结论

鉴别器在 0°附近的线性近似是 CPLL 的理论基础,然而,在电离层闪烁影响下,该线性近似条件不再满足;而随着闪烁的增强,EKF 算法跟踪环路的精度也逐渐下降,甚至出现滤波发散。针对上述问题,提出基于相位锁定指示自适应 EKF 的抗电离层闪烁载波跟踪算法,其避免了传统鉴别器在闪烁条件下的非线性问题,更重要的是,该算法能够根据闪烁强度对 EKF 的观测向量进行自适应修正,不仅提高了 EKF 跟踪环路的精度,并且降低了滤波发散的概率。然而,在强闪烁条件下,该算法的性能改善并不十分明显,这主要是由于此时系统非线性增强,而 EKF 在对非线性系统线性化时丢弃了高阶量信息,导致估计误差增大。

## 参考文献(References)

[1] Jiao Y, Morton Y T, Taylor S, et al. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals[J]. Radio Science, 2013, 48(6): 698 - 708.

[2] Kintner P M, Ledvina B M, de Paula E R. GPS and ionospheric scintillations[J]. Space Weather, 2007, 5(9): S09003.

[3] Conker R S, El-Arini M B, Hegarty C J, et al. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability [J]. Radio Science, 2004, 38(1): 1.

[4] Strangeways H J. Determining scintillation effects on GPS receivers[J]. Radio Science, 2009, 44(1): 843 - 854.

[5] Luo W H, Liu Z Z, Li M. A preliminary evaluation of the performance of multiple ionospheric models in low-and mid-latitude regions of China in 2010—2011[J]. GPS Solution, 2014, 18(2): 297 - 308.

[6] Humphreys T E, Psiaki M L, Hinks J C, et al. Simulating ionosphere-induced scintillation for testing GPS receiver phase tracking loops[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 707 - 715.

[7] Seo J, Walter T, Enge P. Availability impact on GPS aviation due to strong ionospheric scintillation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1963 - 1973.

[8] Skone S, Lachapelle G, Yao D, et al. Investigating the impact of ionospheric scintillation using a GPS software receiver[C]// Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2005: 1126 - 1137.

[9] Sreeja V, Aquino M, Elmas Z G, et al. Correlation analysis between ionospheric scintillation levels and receiver tracking

performance[J]. Space Weather, 2012, 10: 48 - 50.

[10] Lopez-Salcedo J A, del Peral-Rosado J A, Seco-Granados G. Survey on robust carrier tracking techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 670 - 688.

[11] Xu R, Liu Z Z, Chen W. Improved FLL-assisted PLL with in-phase pre-filtering to mitigate amplitude scintillation effects[J]. GPS Solutions, 2014, 19(2): 263 - 276.

[12] Zhang L, Morton Y. Tracking GPS signals under ionosphere scintillation conditions [C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009: 227 - 234.

[13] Kou Y H, Zhou X Y, Morton Y, et al. Processing GPS L2C signals under ionospheric scintillation [C]// Proceedings of IEEE / ION Position Location and Navigation Symposium, 2010: 771 - 782.

[14] Macabiauetal C. Kalman filter based robust GNSS signal tracking algorithm in presence of ionospheric scintillations [C]// Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2012: 3420 - 3434.

[15] Zhang L, Morton Y, Miller M M. A variable gain adaptive Kalman filter-based GPS carrier tracking algorithm for ionosphere scintillation signals [C] // Proceedings of 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2010: 3107 - 3114.

[16] Vilà-Valls J, Closas P, Fernández-Prades C. Advanced KF-based methods for GNSS carrier tracking and ionospheric scintillation mitigation[C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2015: 1 - 10.

[17] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS:principles and applications[M]. 2nd. USA: Artech House, 2006.

[18] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. GPS theory and practice[M]. USA: Springer Wien New York, 2001: 248.

[19] Ghafoori F, Skone S. GPS scintillation modeling and receiver design strategies for low-latitude regions[C] //Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2014: 2394 - 2409.