

利用实时小波降噪的抗电离层闪烁载波跟踪*

孙鹏跃,唐小妹,黄仰博,陈华明,孙广富
(国防科技大学 电子科学学院,湖南 长沙 410073)

摘要:电离层闪烁影响下的导航信号载波跟踪呈现非平稳、非线性和非高斯特性,这使得传统基于鉴别器和 Kalman 滤波的载波跟踪改进算法并不能有效减弱电离层闪烁的影响。提出了基于实时小波降噪的抗电离层闪烁载波跟踪算法,其能够更好地刻画闪烁信号的非平稳特性。通过对跟踪环路同相与正交支路的积分结果进行小波降噪,有效滤除了电离层闪烁引入的非高斯噪声,减弱了闪烁对环路鉴别器的不良影响,提高了跟踪环路的精度与稳健性。实验验证了相关分析和小波降噪跟踪算法的有效性。

关键词:电离层闪烁;载波跟踪;实时小波降噪;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(2017)05-038-07

Carrier tracking in presence of ionosphere scintillation using online wavelet de-noising

SUN Pengyue, TANG Xiaomei, HUANG Yangbo, CHEN Huaming, SUN Guangfu

(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Since carrier tracking in presence of ionospheric scintillation is non-stationary, nonlinear and non-Gaussian, the conventional discriminator or Kalman filter-based methods used to enhance the robustness of tracking loops are less effective. A carrier tracking algorithm for scintillation mitigation was proposed based on online wavelet de-noising, which can characterize the non-stationary scintillation signal much better. By designing a sliding window-based online wavelet de-noising filter after the integration of I and Q channels, the non-Gaussian noise caused by scintillation can be filtered effectively. As a result, the effect of ionospheric scintillation on loop discriminator is mitigated, and the accuracy and robustness of the tracking loop is improved. Experimental results prove the validity of the analysis and the proposed carrier tracking algorithm.

Key words: ionospheric scintillation; carrier tracking; online wavelet de-noising; discriminator error; probability of loss-of-lock

由于电离层闪烁的突发性、偶发性和区域性,难以从系统角度发掘有效的抗电离层闪烁措施,更多是从用户终端入手研究电离层闪烁减弱技术^[1-2]。在这方面国内外尚无简单、有效的解决措施,这对于刚起步的北斗系统用户来说,难度更大。在电离层闪烁影响下,导航信号呈现非平稳特性,到达接收机的信号幅度和相位会快速波动,严重影响接收机跟踪环路的精度和稳健性^[3-5]。更重要的是,闪烁会引入非高斯噪声,使得传统高斯噪声假设下的环路跟踪性能急剧下降。

相比于频率跟踪和伪码跟踪而言,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。在闪烁影响下,信号幅度衰减和相位波动分别可达 15 dB 和 ± 2 rad^[8],不再满足环路鉴别器的线性近似条件,显著影响基于鉴别器的

载波跟踪的性能^[8-9]。而对于利用 Kalman 滤波的载波跟踪算法而言,尽管在高动态条件下其能够有效改善跟踪环路的性能,但由于闪烁引入的非高斯噪声,使得不再满足 Kalman 滤波的高斯噪声假设,因而其在闪烁条件下的性能提升非常有限^[10-13]。

对于非平稳、非高斯的闪烁信号而言,小波降噪具有良好的适应性,可以较好地刻画其非平稳特性,如边缘、尖峰、断点等。这使得小波降噪已逐渐应用于卫星导航的各个领域^[2,14],文献[15]提出了一种基于小波降噪的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)弱信号捕获算法,能够有效提高弱信号的检测概率。文献[16]提出了利用小波变换估计高纬地区 GPS L1 信号相位闪烁的优化算法,相比于传统基于傅里叶变换的功率谱密度算法,其能够更好地刻画

* 收稿日期:2016-06-27

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:sunnnp@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

相位闪烁的快速波动。文献[17]研究了基于小波降噪的自适应 GPS 周跳检测与修复算法,通过对原始载波相位双差进行小波阈值降噪,有效提升了 GPS 载波周跳检测的概率。

尽管如此,由于小波降噪难以实现递推计算,限制了其在递推结构的载波跟踪中的应用,本文研究了基于实时小波降噪的抗电离层闪烁载波跟踪算法。

1 闪烁条件下载波跟踪的非平稳特性

载波跟踪环路一般都是以 I, Q 支路的积分结果作为观测量对载波相差进行估计的。无论是基于鉴相器的传统相位锁定环路 (Conventional Phase Locked Loop, CPLL), 还是基于 Kalman 滤波的直接相位估计, I, Q 支路积分结果的非平稳特性都会严重影响载波跟踪的精度和稳健性。下面,以 I 支路为例,分析闪烁条件下环路积分结果的平稳性。

电离层闪烁条件下, GNSS 接收信号可建模为:

$$r(t) = A_0 \delta A C(t - \tau_d) D(t - \tau_d) \cos(\omega t + \varphi_0 + \delta\varphi) + n(t) \quad (1)$$

式中: A_0 为信号幅度; $C(t)$ 为扩频码; $D(t)$ 为电文序列; ω 为载波频率; φ_0 为初始相位; $n(t)$ 为加性高斯白噪声; δA 和 $\delta\varphi$ 为电离层闪烁引起的幅度和相位波动, 分别服从 Nakagami-m 分布和零均值高斯分布^[18]。Nakagami-m 分布的概率密度函数为:

$$f(\delta A) = \frac{m^m (\delta A)^{2m-2}}{\Gamma(m)} e^{-m(\delta A)^2} \quad (2)$$

式中: $\Gamma(m)$ 为伽马函数, δA 均值为 1, 方差为 m^{-1} 。当接收信号与本地信号同步后, I 支路积分结果为:

$$IP_k = A_k \cos(\omega_d k T_c + \varphi_S) + n_1 \quad (3)$$

式中: $A_k = A_0 \delta A D_k$ 为幅度闪烁影响的积分包络; ω_d 为接收机动态引起的多普勒频移; T_c 为积分时间; φ_S 为电离层闪烁引入的相位误差, 服从零均值高斯分布, 方差为 σ_S^2 ; n_1 为 I 支路的零均值高斯白噪声。

假设幅度闪烁和相位闪烁不相关, 并忽略导航电文对信号平稳性的影响^[4], 首先分析 I 支路积分结果均值特性。

$$\begin{aligned} E[IP_k] &= A_0 E[\delta A] E[\cos(\omega_d k T_c + \varphi_S)] + E[n_1] \\ &= A_0 \cos(\omega_d k T_c) E[\cos(\varphi_S)] - A_0 \sin(\omega_d k T_c) E[\sin(\varphi_S)] \\ &= A_0 \cos(\omega_d k T_c) e^{-0.5\sigma_S^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} E[\cos\varphi_S] = \int_{-\infty}^{\infty} \cos\varphi_S \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} e^{-\frac{(\varphi_S)^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\varphi_S = e^{-0.5\sigma_\varphi^2} \\ E[\sin\varphi_S] = \int_{-\infty}^{\infty} \sin\varphi_S \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} e^{-\frac{(\varphi_S)^2}{2\sigma_\varphi^2}} d\varphi_S = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)表明, 闪烁条件下, I 支路积分结果均值不为常值, 与时间相关。

继续分析其自相关函数。

$$\begin{aligned} E[IP_k IP_{k+\tau}] &= E\{A_k \cos(\omega_d k T_c + \varphi_S) A_{k+\tau} \cos[\omega_d(k + \tau) T_c + \varphi_S]\} \\ &= A_0^2 E[(\delta A)^2] E\{\cos(\omega_d k T_c + \varphi_S) \cdot \cos[\omega_d(k + \tau) T_c + \varphi_S]\} \\ &= A_0^2 (1 + m^{-1}) R_{\varphi_S}(k, \tau) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $R_{\varphi_S}(k, \tau)$ 为相位闪烁自相关函数。

$$\begin{aligned} R_{\varphi_S}(k, \tau) &= 0.5 \cos(\omega_d \tau T_c) + 0.5 E\{\cos[2\varphi_S + \omega_d \cdot (2k + \tau) T_c]\} \\ &= 0.5 \cos(\omega_d \tau T_c) + 0.5 \cos[\omega_d(2k + \tau) T_c] \cdot E[\cos(2\varphi_S)] \\ &\quad - 0.5 \sin[\omega_d(2k + \tau) T_c] E[\sin(2\varphi_S)] \\ &= 0.5 \cos(\omega_d \tau T_c) + 0.5 e^{-2\sigma_\varphi^2} \cos[\omega_d(2k + \tau) T_c] \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得 I 支路积分结果的自相关函数。

$$E[IP_k IP_{k+\tau}] = A_0^2 (1 + m^{-1}) \{0.5 \cos(\omega_d \tau T_c) + 0.5 e^{-2\sigma_\varphi^2} \cos[\omega_d(2k + \tau) T_c]\} \quad (8)$$

式(8)不仅与 τ 相关, 也与时间相关。因此, 综合式(4)和式(8)可知, 闪烁条件下 I 支路积分结果为非平稳随机过程, Q 支路也可通过类似的分析得出相同的结论。

进一步分析, 式(3)可展开为:

$$\begin{aligned} IP_k &= A_{S,k} \cos(\omega_d k T_c) - A_k \sin(\omega_d k T_c) \sin\varphi_S + n_1 \\ &= A_{S,k} \cos(\omega_d k T_c) + n_{S1} + n_1 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $A_{S,k} = A_k \cos\varphi_S$ 定义为闪烁影响下的积分包络, $n_{S1} = -A_k \sin(\omega_d k T_c) \sin\varphi_S$ 定义为闪烁引入的加性非高斯噪声。式(9)表明, 电离层闪烁不仅会造成 I, 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_{S1} 和 n_{SQ} , 这两方面影响将会严重降低后续载波跟踪的精度和稳健性。图 1 给出了强闪烁条件下 I, Q 支路积分结果的波动。闪烁模拟采用康奈尔闪烁模型 (Cornell Scintillation Model, CSM), 其输入只需要两个参数: 闪烁强度 S_4 指数和去相关时间 τ_0 , 其分别反映了闪烁的强度和快慢。可以看到, I 支路积分包络波动强烈, 而 Q 支路由于噪声的原因不会出现大尺度上的波动, 主要体现了噪声的强度。

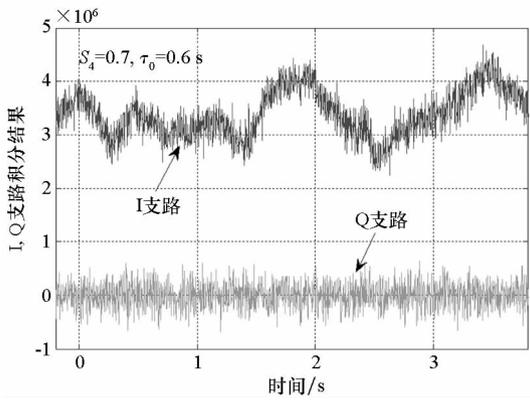


图 1 强闪烁下积分波动

Fig. 1 Fluctuation of integrations under severe scintillation

2 小波降噪载波跟踪算法

由于闪烁条件下 GNSS 信号载波跟踪的非平稳、非线性以及非高斯特性,增强环路精度和稳健性的传统手段效果并不明显。小波降噪能够更好地适应闪烁信号的非平稳特性,并能够有效消除闪烁引入的非高斯噪声。然而,由于小波消噪无法进行递推计算,难以应用于载波跟踪环路,本文提出了基于滑动窗的实时小波降噪载波跟踪,能够有效减弱电离层闪烁对载波跟踪的影响。

考虑到载波跟踪的实时性要求,采用简单、有效的小波阈值降噪算法,以 I 支路为例,积分结果可建模为:

$$IP_k = A_{s,k} \cos(\omega_d k T_c) + n_{s1} + n_1 = s_k + \sigma_k w_k \quad (10)$$

式中, s_k 为积分结果, w_k 为总强度为 σ_k 的加性噪声。如前所述,在闪烁条件下 s_k 的包络会快速波动, w_k 为非高斯噪声。

小波阈值降噪一般包含以下三个步骤:分解、阈值降噪以及重构。

由于载波跟踪是一种递推过程,要进行小波降噪,首先需要对积分采样值进行加窗,才能实现递推计算。传统的滑动窗可表示为:

$$W_i = \begin{cases} \text{none} & i < L_x \\ \{x(i-L_x+1), \dots, x(i)\} & i \geq L_x \end{cases} \quad (11)$$

其中, L_x 为窗口宽度, $x(i)$ 为积分结果的采样值。式(11)表明,当积分结果采样数据长度不足窗口宽度时,不进行降噪操作。当数据长度达到 L_x 后,采用最新的 L_x 个采样点进行降噪,并将降噪后的 $\hat{x}(L_x)$ 作为当前的降噪结果输出。

由于传统滑动窗将窗口边缘的数据输出作为降噪结果,会因为边界效应降低降噪的效果,因此,采用窗口扩展以减弱边界效应导致的信号失

真。扩展后的滑动窗可表示为:

$$W_i = \begin{cases} \text{none} & i < L_x \\ \{x(i-L_x+1), \dots, x(i), \overbrace{x(i), \dots, x(i-L_e+1)}^{\text{extension}}\} & i \geq L_x \end{cases} \quad (12)$$

式中: L_e 为扩展长度,因此,窗口总宽度为 $L_w = L_x + L_e$,为了降低运算量, L_e 应小于 L_x 。降噪完成后,将 $[\hat{x}(L_x) + \hat{x}(L_x + 1)]/2$ 输出作为当前时刻的降噪结果。由于降噪值并不位于窗口边缘,因此能够有效降低边界效应的影响。可以看到上述加窗设计并不需要当前时刻点之后的数据,因而,并不会导致“滤波值”输出在时间上有所滞后,但仍然需要缓存当前时刻之前 L_x 个点的结果。因此,相比于传统闭环跟踪而言,上述算法需要增加一定的存储设计,只要处理器实现小波降噪算法的实时性够高,那么上述加窗设计造成的滤波延时很小。

在对积分结果加窗后,首先通过 Mallat 快速离散小波变换对积分结果进行分解,计算小波系数,分解后的信号可表示为:

$$IP \triangleq cA_J + \sum_{j=1}^J cD_j \quad (13)$$

式中, J 为最大分解尺度, cA_J 为尺度 J 上的尺度系数向量, cD_j 为第 j 尺度上的小波系数向量。式(13)表明,积分结果可被分解为多个尺度,在每个尺度上,信号可被分解为表示低频分量的尺度系数向量和表示高频分量的小波系数向量。在分解过程中采用 Daubechies 2 小波,并且最大分解尺度由滑动窗的宽度 L 决定。

为了滤除噪声,需要对每个尺度上的小波系数向量 $cD_j = \{d_{j,m} \mid m = 1, \dots, M_j\}$,也就是高频部分进行阈值处理。对于软阈值降噪而言,其阈值函数为:

$$\hat{d}_{j,m} = \begin{cases} \text{sgn}(d_{j,m}) (|d_{j,m}| - Thr_j) & |d_{j,m}| \geq Thr_j \\ 0 & |d_{j,m}| < Thr_j \end{cases} \quad (14)$$

式中, Thr_j 为尺度 j 上的阈值。合适的阈值是影响小波降噪的关键因素。应用最为广泛的是通用阈值 $T_{uni} = \sigma_j \sqrt{2 \ln L_w}$,其中 σ_j 为第 j 尺度上的噪声水平。在实际应用中,噪声标准差一般是未知的,可通过同一尺度上的小波系数的中值进行估算。

$$\sigma_j = \frac{\text{median}(|cD_j|)}{0.6745} \quad (15)$$

对于高斯噪声而言,不同尺度上的噪声方差相同,这样就有效降低了计算量,提高了实时性。

然而,闪烁条件下的噪声为非高斯噪声,其不同分解尺度下的噪声水平并不相同,图2给出了积分结果在不同分解尺度下的噪声水平。

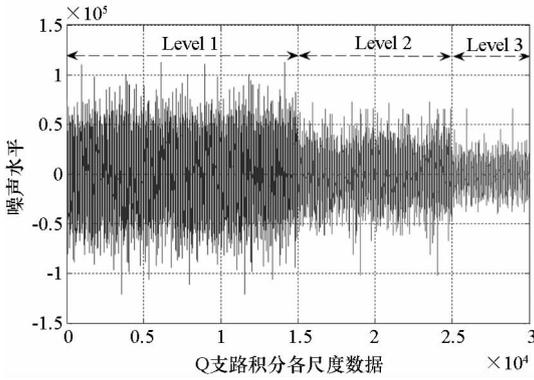


图2 不同分解尺度下的噪声水平

Fig.2 Noise level at different decomposition level

可以看到,随着分解尺度的增加,噪声水平不断降低。如果在不同尺度上采用同样的阈值,那么必然会造成信息的丢失;但如果在不同尺度上独立估计噪声方差,又会引入大量的运算,降低降噪的实时性。为了解决该问题,采用如下的递推阈值。

$$Thr_j = \begin{cases} \frac{median(cD_1)}{0.6745} \sqrt{2 \ln L_w} & j = 1 \\ Thr_{j-1} \frac{j}{j + \alpha} & j = 2, 3, \dots, J \end{cases} \quad (16)$$

式中: α 为正的调节因子,可根据不同的噪声特性进行调整。可以看到,上述的阈值设计只需要在第1尺度上估计噪声水平,后续阈值可递推计算,这样就有效降低了计算量,并且能够得到与实际应用相适应的递减阈值。

降噪后的积分结果可通过降噪后的小波系数向量和尺度系数向量进行重构。重构是分解的逆过程,在尺度 J 上,可通过降噪后的小波系数 \hat{cD}_J 和原始尺度系数 cA_J 重构尺度 $J-1$ 上降噪后的尺度系数 \hat{cA}_{J-1} ,其过程可表示为:

$$\hat{cA}_{J-1} \triangleq cA_J + \hat{cD}_J \quad (17)$$

之后,从尺度 J 到1以递推方式计算降噪后的尺度系数向量,可以得到降噪后的积分结果为:

$$\hat{IP} \triangleq \hat{cA}_1 + \hat{cD}_1 \quad (18)$$

至此,通过上述三个步骤,即可完成积分结果的小波降噪。之后,可采用传统载波跟踪环路的简单设计,将降噪后的积分结果输入鉴别器进行载波相位估计,具体的载波跟踪环路架构如图3所示。

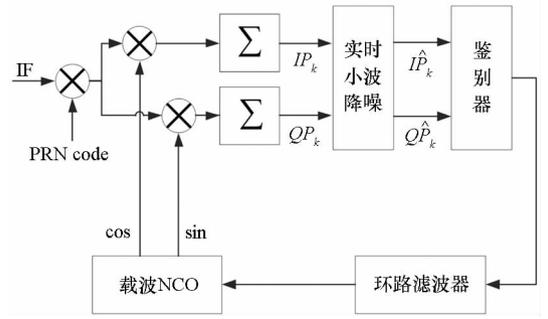


图3 基于实时小波降噪的载波跟踪架构

Fig.3 Structure of online wavelet de-noising-based PLL

3 仿真实验

采用广泛应用于闪烁模拟的CSM产生电离层闪烁信号^[19-20],其产生的闪烁序列能够反映真实闪烁信号的特性。导航信号模拟以北斗B1频点卫星5为例,信号中频频率设为9.548 MHz,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实时小波降噪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,分析在强闪烁和中等闪烁条件下,不同载噪比时小波降噪相位锁定电路(Wavelet Denoising Phase Locked Loop, WD-PLL)与CPLL以及扩展卡尔曼滤波相位锁定环路(Extended Kalman Filter-based Phase Locked Loop, EKF-PLL)的性能。对于所有的仿真结果而言,软件接收机参数设置见表1。

表1 软件接收机参数设置

Tab.1 Settings of software receiver

跟踪算法	鉴别器	B_n/Hz	T_{coh}/ms
CPLL	ATAN	15	2
EKF-PLL	—	自适应	2
WD-PLL	ATAN	15	2

为了在小波降噪的实时性和精度之间折中,采用可变的滑动窗宽度,即在跟踪初始阶段采用较窄的窗口($L_x = 32, L_e = 8$),使跟踪环路快速进入降噪过程。当数据长度达到 $2L_x$ 后,则将窗口宽度扩展为 $2L_x$ ($L_e = 16$),但窗口宽度不能无限增加;当数据长度达到 $8L_x$ 时,则窗口宽度固定为 $8L_x$ ($L_e = 64$)。这样就能在初始阶段进行快速滤波,以提高实时性,又能在数据长度足够时达到较好的降噪效果。

3.1 中等闪烁

对中等闪烁条件下不同跟踪算法的性能进行对比分析。电离层闪烁参数设置见表 2。

表 2 中等闪烁模拟参数设置

Tab. 2 Settings of moderate scintillation simulation

伪随机 噪声码	闪烁强度	载噪比/ dB-Hz	信号 长度/min
BDS Sat5	$S_4 = 0.5$, $\tau_0 = 0.5$ s	30 : 2 : 50	50

其中共有 10 种场景,每种场景持续 5 min,载噪比以步进 2 dB-Hz 递增,分别计算每种闪烁场景下不同 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,如图 4 所示。

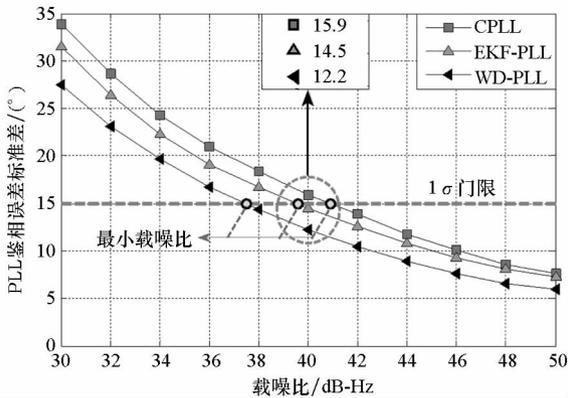


图 4 中等闪烁下鉴相误差标准差对比

Fig. 4 Phase jitter comparison of the PLLs in moderate scintillation

图 4 表明,在不同载噪比条件下,小波降噪跟踪算法的相位抖动均小于 CPLL 和传统 EKF 载波跟踪,并且,载噪比越低,改善越明显。这是由于随着载噪比的降低,噪声越大,小波降噪的优势就越明显。当载噪比为 40 dB-Hz 时,小波降噪的相位抖动相比于 CPLL 和 EKF 算法分别降低了 3.7°(23%) 和 2.3°(15%)。将环路鉴相误差标准差达到 1σ 门限(15°)时对应的载噪比定义为最小载噪比,则在中等闪烁下,小波降噪跟踪算法的最小载噪比相比于 CPLL 和 EKF 算法分别降低了 3.4 dB-Hz 和 2.1 dB-Hz。同样可以看到,当载噪比较高时,三种跟踪算法的性能相当,这是由于此时噪声相对于信号而言很小,其对跟踪环路的影响可忽略。

为了进一步分析不同环路在闪烁条件下的稳

健性,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/N_0 ,则 PLL 的失锁概率为:

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

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, Q 支路的平均功率,其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。针对表 2 设定的 10 种闪烁场景分别计算 3 种跟踪算法的失锁概率,结果如图 5 所示。

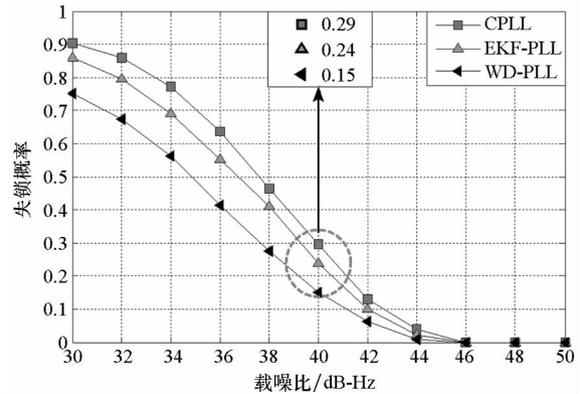


图 5 中等闪烁条件下失锁概率对比

Fig. 5 Probability of loss-of-lock comparison of the PLLs in moderate scintillation

图 5 表明,在不同载噪比条件下,相比于传统 EKF 跟踪算法而言,小波降噪的性能改善更为明显。这是由于在闪烁条件下,噪声不再服从高斯分布,使得 EKF 算法的性能严重下降,甚至出现滤波发散。当载噪比为 40 dB-Hz 时,小波降噪的失锁概率相比于 CPLL 和 EKF 算法分别降低 0.14(48%) 和 0.09(37%)。同样,当载噪比较高时,3 种跟踪算法的失锁概率都趋于零。

3.2 强闪烁

在评估小波跟踪算法在中等闪烁条件下的跟踪性能后,对强闪烁条件下的算法性能进行仿真与评估。电离层闪烁模拟参数设置与表 2 类似,仅将其中的闪烁强度修改为强闪烁($S_4 = 0.8$, $\tau_0 = 0.2$ s),其余设置不变。图 6 和图 7 分别给出了强闪烁条件下小波降噪跟踪算法与另外两种算法的相位抖动与失锁概率。

图 6 和图 7 表明,在强闪烁条件下,尽管小波降噪跟踪算法相比于 CPLL 和 EKF 载波跟踪仍有较为明显的改进,但跟踪性能恶化情况已非常明显。当载噪比为 40 dB-Hz 时,小波降噪载波跟踪

的相位抖动相比于CPLL和EKF跟踪分别降低了 6.5° (24%)和 3.5° (17%)。但此时小波降噪跟踪的相位抖动早已超过 1σ 门限,故此时的失锁概率已达0.68左右。

另外,在强闪烁条件下,即使载噪比增加到50 dB-Hz,但3种跟踪环路的失锁概率也无法减小到零。这是由于在强闪烁条件下,即使载噪比很高,但闪烁引起的载噪比衰减可达15~20 dB-Hz,因此,跟踪环路仍会出现信号失锁的情况。

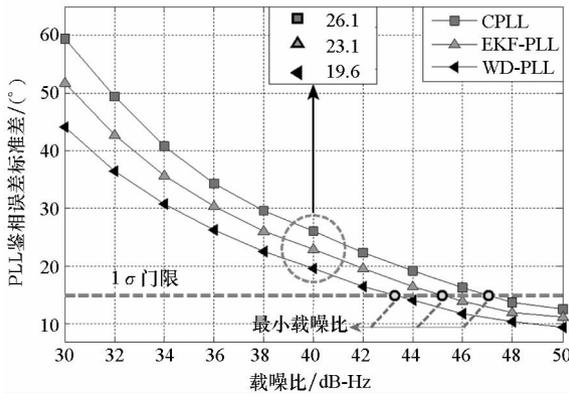


图6 强闪烁下鉴相误差标准差对比

Fig.6 Phase jitter comparison of the PLLs in severe scintillation

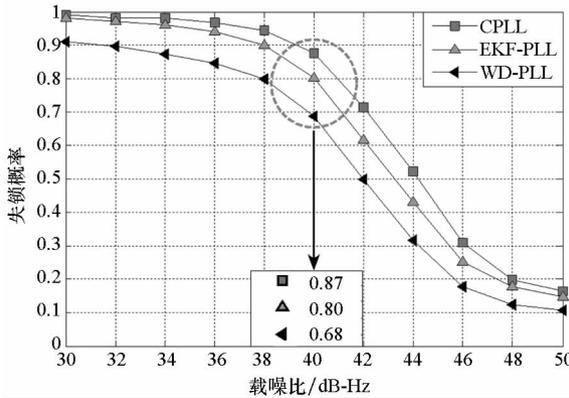


图7 强闪烁条件下失锁概率对比

Fig.7 Probability of loss-of-lock comparison of the PLLs in severe scintillation

4 结论

电离层闪烁会引起导航信号幅度和相位的快速波动,使基于I、Q支路积分结果的载波跟踪呈现非平稳、非线性和非高斯特性,导致传统基于鉴别器和Kalman滤波的载波跟踪改进算法并不能有效减弱电离层闪烁的影响。针对上述问题,提出了基于实时小波降噪的抗电离层闪烁载波跟踪算法,通过传统跟踪环路的相关器之后增加小波降噪模块,有效滤除了闪烁引入的非高斯噪声,

为后续的鉴别器或Kalman滤波提供较为纯净的同相和正交支路积分结果。仿真结果表明:在中等闪烁下,小波降噪算法能够有效提高跟踪环路的精度和稳健性;但在强闪烁下,尽管小波降噪相比于传统PLL和EKF载波跟踪有所改善,但跟踪环路的性能恶化情况已非常明显,需要继续寻求更为稳健的载波跟踪算法,如开环跟踪等。

另外,研究的内容还有以下几点需在后续工作中进一步的完善:

1)接收机运动和时钟波动都有可能引起I、Q积分值的波动,而这种波动是应该正确反映在鉴别器误差中的。但本文并未对上述波动与电离层闪烁所引起的相关值波动进行区别分析,有可能会接收机动态和时钟波动的信息被小波降噪模块滤除。

2)所设计的滤波方法不能从电离层闪烁发生的最初几个积分值开始发挥作用,尽管仿真结果说明了该算法的有效性,但这种处理上的滞后所造成的影响需要进一步分析和验证。

3)并未对闪烁信号噪声特性以及小波降噪的实时性进行实测值分析。

参考文献 (References)

- [1] Sreeja V, Aquino M, Elmas Z G, et al. Correlation analysis between ionospheric scintillation levels and receiver tracking performance[J]. Space Weather, 2012, 10(6): 1-13.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, 2016, 38(1): 1-1-1-23.
- [5] Strangeways H J. Determining scintillation effects on GPS receivers[J]. Radio Science, 2016, 44(1): 1-11.
- [6] Humphreys T E, Psiaki M L, Hinks J C, et al. Simulation 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] Xu R, Liu Z Z, Chen W. Improved FLL-assisted PLL with

- in-phase pre-filtering to mitigate amplitude scintillation effects[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 263 – 276.
- [10] Zhang L, Morton Y T. 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.
- [11] Barreau V, Vigneau W, Macabiau C, et al. Kalman filter based robust GNSS signal tracking algorithm in presence of ionospheric scintillations [C]//Processing of Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal, 2012: 3420 – 3434.
- [12] Vilà-Valls J, Closas P, Fernández-Prades C. On the identifiability of noise statistics and adaptive KF design for robust GNSS carrier tracking [C]//Processing of Aerospace Conference, 2015.
- [13] Won J H. A novel adaptive digital phase-lock-loop for modern digital GNSS receivers [J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(1): 46 – 49.
- [14] Mosavi M R, Pashaian M, Rezaei M J, et al. Jamming mitigation in global positioning system receivers using wavelet packet coefficients thresholding [J]. *IET Signal Processing*, 2015, 9(5): 457 – 464.
- [15] Jin T, Liu Y. A novel GNSS weak signal acquisition using wavelet denoising method [C]//Processing of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2008: 303 – 309.
- [16] Tiwari R, Strangeways H J, Tiwari S, et al. GPS L1 phase scintillation using wavelet analysis at high latitude [C]//Processing of the 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, 2011: 227 – 230.
- [17] Liu T, Li S, Wang R, et al. Adaptive detection and modification algorithm of GPS cycle slips based on wavelet analysis [C]//Processing of International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011: 1907 – 1910.
- [18] Kintner P M, Ledvina B M, de Paula E R. GPS and ionospheric scintillations [J]. *Space Weather*, 2007, 5(9): 1 – 23.
- [19] Humphreys T E, Psiaki M L, Kintner P M. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1624 – 1637.
- [20] Humphreys T E, Psiaki M L, Ledvina B M, et al. A data-driven testbed for evaluating GPS carrier tracking loops in ionospheric scintillation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1609 – 1623.

(上接第 20 页)

- [15] 曹娜. 基于 PPP 的地基 GPS 水汽反演及其应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
CAO Na. Precipitable water vapor retrieval with ground-based GPS based on PPP and its application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [16] 迟道才, 王琦, 张旭东, 等. 基于谐波分析的降水量预测模型研究 [J]. *节水灌溉*, 2011(10): 42 – 44.
CHI Daocai, WANG Qi, ZHANG Xudong, et al. Research on precipitable prediction model based on harmonic analysis [J]. *Water Saving Irrigation*, 2011(10): 42 – 44. (in Chinese)
- [17] Yeh T K, Hong J S, Wang C S, et al. Determining the precipitable water vapor with ground-based GPS and comparing its yearly variation to rainfall over Taiwan [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(12): 2496 – 2507.
- [18] 董慧涵. 香港降水分析 [J]. *广州师院学报: 自然科学版*, 1999, 20(7): 81 – 87.
DONG Huihan. Analysis of Hongkong's precipitation [J]. *Journal of Guangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 1999, 20(7): 81 – 87. (in Chinese)
- [19] Ginn W L, Lee T Z, Chan K Y. Past and future changes in the climate of Hong Kong [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2010, 24(2): 163 – 175.
- [20] 董慧涵, 黄洁玫, 朱红梅. 香港气候的基本特征 [J]. *广州师院学报: 自然科学版*, 1994(1): 42 – 49.
DONG Huihan, HUANG Jiemei, ZHU Hongmei. The basic characteristic of Hongkong climate [J]. *Journal of Guangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 1994(1): 42 – 49. (in Chinese)
- [21] Shi K. Detrended cross-correlation analysis of temperature, rainfall, PM 10 and ambient dioxins in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 97: 130 – 135.