

## 对流层散射信道传递时间信号的抖动抑制模型\*

刘 赞, 陈西宏, 刘 进, 彭勃宇

(空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:** 对流层散射信道传递时间同步信号过程中, 信道的多径效应及噪声会引起信号抖动。为抑制抖动、提高时间同步精度, 引入经验模态分解和小波阈值组合的抖动抑制模型。组合抖动抑制模型中, 首先根据经验模态分解原理对原始信号进行分解, 然后利用小波阈值对分解得到的各分量进行处理, 最终利用处理结果重构信号。为提高组合模型的抖动抑制效果和原始信号的保持能力, 利用连续性好、柔和度高的阈值函数对小波阈值中的传统阈值函数进行改进。利用实测数据验证模型的结果表明, 在抖动抑制和信号保留方面, 组合模型较单一模型以及常用的 Kalman 模型优势明显。

**关键词:** 对流层散射; 时间同步; 秒信号; 经验模态分解; 小波阈值

**中图分类号:** TN967 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)06-182-05

## Jitter mitigation model for time signal transferred via troposcatter

LIU Zan, CHEN Xihong, LIU Jin, PENG Boyu

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** During the transmission process of time synchronization signal in troposcatter channel, the multipath effect and noise of the channel can contribute jitter to time synchronization signal. In order to mitigate this jitter, the EMD (empirical mode decomposition) combined with wavelet threshold model was proposed. In the combined model, the EMD was used to decompose the original signal, the wavelet threshold was adopted to process the decomposed components and then the processed results were utilized to reconstruct the final signal. In order to improve the jitter mitigation effect and the signal authenticity of the combined model, the traditional threshold function in wavelet threshold was perfected by the better coherent and gentler threshold function. Experimental data were used to demonstrate this combined model. Compared with the simplex model and the Kalman model, the combined model has advantage in effect of de-noising as well as authenticity.

**Key words:** troposcatter; time synchronization; one pulse per second; empirical mode decomposition; wavelet threshold

时间同步技术在电网、多基地雷达等分布式系统中应用广泛<sup>[1-5]</sup>。文献[4-5]中提出利用对流层散射信道传递秒信号(One Pulse Per Second, 1PPS)来实现时间同步, 该方案能够弥补卫星时间同步系统易受干扰、微波时间同步系统受制于地形和地球曲率等的不足, 但文献中并未研究对流层散射信道特性对时间同步精度造成的影响。对流层散射信道具有明显多径效应, 多径效应以及信道噪声造成时间同步所需的 1PPS 产生抖动, 其在时间同步所必需的钟差数据中表现为噪声。钟差中的噪声对时间同步的建立以及保持会造成不利影响。因此, 在利用对流层散射信道实现时间同步过程中, 有效地抑制抖动具有重要意义。

文献[6]采用 Kalman 算法对卫星系统所测

钟差数据进行滤波平滑处理以减小 1PPS 抖动造成的影响。但在利用对流层散射信道实现时间同步过程中, 时钟的不断调整以及对流层散射信道明显的时变特性导致 Kalman 算法中关键的状态方程和观测方程难以确定。文献[7]中提出利用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)抑制卫星信道的多径效应, 其原理是对接收到的卫星信号进行 EMD 分解, 并将分解得到的各频率分量中含噪声较多的高频部分直接舍去。在非线性、非周期性信号中, EMD 算法具有独特优势, 但其在舍弃高频部分的同时, 对信号的有用信息破坏较大, 且对低频部分中含有的噪声未作任何处理。小波阈值在信号去噪领域应用广泛<sup>[8-9]</sup>, 其基本思想是对预处理信号进行小波变换, 结合阈值和阈值函数对小波系数进行处理, 从

\* 收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671468)

作者简介: 刘赞(1990—), 男, 河北保定人, 博士研究生, E-mail: kgdliuzan@163.com;

陈西宏(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: xhchen0315217@163.com

而达到去除噪声的目的。在利用小波阈值去噪过程中,连续性和柔度差的传统阈值函数易破坏原始信号中的有用信息。

为克服 Kalman 算法中参数难以确定、EMD 算法带来的有用信号丢失等问题,引入 EMD 和小波阈值组合模型。组合模型中,对原始信号进行 EMD 分解,对分解所得的频率分量均进行小波阈值处理,并在小波阈值算法中引入一种连续性高和柔度好的阈值函数规则,从而提高去噪效果,增加模型的适用性,最终达到抑制 1PPS 抖动的目的。

## 1 多径效应影响分析

对流层散射信道的多径效应造成合成信号在不同时刻的路径延迟不一致,不一致的延迟导致解调出来的 1PPS 前沿发生抖动和展宽,抖动和展宽在最终测得的钟差数据中表现为噪声。多径效应造成信号的延迟谱可由式(1)求出<sup>[10]</sup>。

$$W(\tau) \approx B_{11} \iiint g_1 g_2 F \delta \left[ \tau - \frac{d}{2c} (\theta_{20} \theta_1 + \theta_{10} \theta) \right] d\theta_1 d\theta d\varphi \quad (1)$$

式中: $B_{11}$ 表示固定常数; $g_1$ 和 $g_2$ 分别表示收发天线的方向性函数; $F$ 表示气象因子; $\delta$ 表示散射介质向各方向湍动均方根的平均值; $\tau$ 表示延迟因子; $d$ 表示收发两点连线距离; $c$ 表示光速; $\theta_{10}$ 和 $\theta_{20}$ 分别表示发收两端视平线和收发点连线的夹角; $\theta_1$ 表示散射点和发射端视平线夹角; $\theta$ 表示前向散射角; $\varphi$ 表示收端方位角。最终通过复杂的积分近似得到天线方向性尖锐时,多径延迟标准偏差如式(2)所示<sup>[10]</sup>。

$$\sigma(\tau) = \frac{H\varphi_v}{2c\sqrt{\ln 2}} \quad (2)$$

式中, $H$ 表示最低散射点距收发端连线距离, $\varphi_v$ 表示垂直切面发端波束宽度。根据式(2)结合几何关系,求得电波波束宽度取 $0.8^\circ \sim 1.2^\circ$ 时多径效应造成的延迟标准偏差如图1所示。

如图1所示,标准偏差随基线距离和波束宽度的增大而增大,影响量级为数十纳秒,即多径效应给 1PPS 的前沿带来数十纳秒的抖动。此量级的抖动导致钟差序列中含有同等级别的噪声。因此,为抑制多径效应以及外界噪声造成的 1PPS 抖动、提高最终时间同步精度,必须研究一种高效的抖动抑制算法。

## 2 EMD 和小波阈值组合抑制抖动原理

目前,多利用滤波算法对钟差序列进行处理,

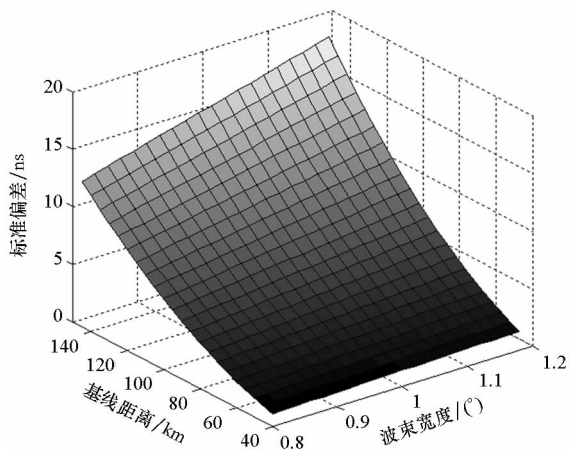


图1 对流层散射造成的抖动量

Fig. 1 Jitter introduced by troposcatter

以去除其含有的噪声。针对散射信道的时变特性,引入 EMD 和小波阈值组合模型。

### 2.1 EMD 算法

EMD 是对信号进行不断筛分的过程。在筛分过程中,提出了本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)的概念。对信号 $f(t)$ 进行 EMD 分解的具体步骤可参考文献[11-12]。EMD 算法最终将信号 $f(t)$ 分解为 $n$ 个 IMF 分量和余项 $r_n(t)$ 线性和的形式,即:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中, $h_i(t)$ 代表不同阶次的 IMF。其反映了原始信号频率从高到低不同频段成分,噪声通常集中于高频部分。EMD 去噪即将分解后的高频部分直接舍弃后利用剩余部分进行信号重构。

### 2.2 小波阈值算法

小波阈值处理有小波分解、阈值处理和小波重构三个过程。在阈值处理过程中,阈值函数的选取在一定程度上影响着最终的去噪结果。目前应用较广的硬、软阈值函数准则分别如式(4)、式(5)所示。

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \lambda) & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\omega_{j,k}$ 表示小波分解得到的系数, $\hat{\omega}_{j,k}$ 表示经阈值处理后得到的系数。根据式(4)~(5)可得,硬阈值函数准则较好地保留了幅度大的小波系数,但在 $\lambda$ 处具有不连续性;软阈值函数准则虽然具有较好的连续性,但压缩了幅度大的小波系数,导致重构后的信号出现偏差。两准则对较小的小波

系数均直接置为零, 柔和度较差, 易导致混淆于噪声中的有用信息丢失。另外, 不同的 IMF 具有不同的频率成分, 其必定对应不同的最优小波阈值算法。因此, 为弥补上述两准则的缺陷, 增加整个模型的适用性, 引入折中阈值函数准则, 如式(6)所示。

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} - 0.5 \text{sign}(\omega_{j,k}) \frac{\lambda^m}{|\omega_{j,k}|^{m-1}} & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0.5 \text{sign}(\omega_{j,k}) \frac{|\omega_{j,k}|^{m+1}}{\lambda^m} & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $m$  表示阈值函数的调节因子。由式(6)可知, 该准则具有较好的连续性, 且对  $|\omega_{j,k}| < \lambda$  部分, 可根据  $m$  的大小做相应的压缩处理。因此, 该阈值函数能够较好地保留高频部分中的有用信息。

利用 MATLAB 中的加入噪声的 HeaviSine 信号验证上述折中小波阈值函数。选用 sym7 小波、6 层分解、改进后阈值, 分别利用硬、软阈值函数以及折中阈值函数准则对 3600 个数据进行去噪。在折中阈值函数准则中, 进行多次仿真以选取效果较好的  $m$  值。利用信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 评价算法的去噪效果, 其计算方法为:

$$SNR = 10 \lg \left[ \frac{\sum_{k=1}^N s_k^2}{\sum_{k=1}^N (s_k - g_k)^2} \right] \quad (7)$$

式中,  $s_k$  表示真实未加噪信号,  $g_k$  表示去噪后的信号。硬、软以及折中三组阈值函数方案的 SNR 分别为 24.59 dB, 24.15 dB, 24.94 dB。三组方案在区间 [2500, 3000] 的去噪效果如图 2 所示。

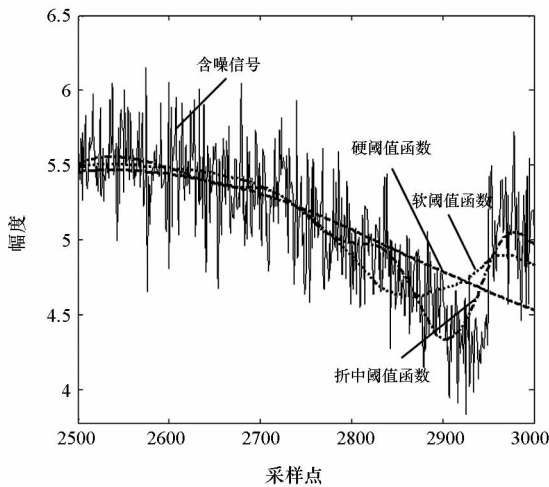


图 2 模拟信号去噪结果图

Fig. 2 De-noising results of analog signal

由图 2 可得, 小波阈值算法能够有效地抑制噪声, 折中阈值函数准则的 SNR 较硬、软阈值函

数两种准则的均有提高。

### 2.3 组合模型

结合 EMD 分解和小波阈值的特点, EMD 和小波阈值组合模型的流程如图 3 所示。

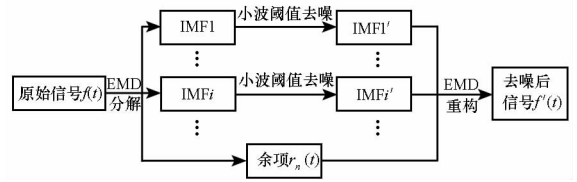


图 3 EMD 和小波阈值组合模型的流程图

Fig. 3 Flow chart of EMD combined with wavelet threshold

如图 3 所示, 利用 EMD 对原始信号进行分解, 得到频率从高到低排列的 IMF 和余项  $r_n(t)$ 。利用小波阈值处理每个 IMF, 其中阈值函数选取折中准则。最后根据处理后的  $r_n(t)$  对信号进行重构。组合模型弥补了 EMD 直接舍弃高频部分且对低频部分不做处理的缺陷, 同时也克服了小波阈值中传统阈值函数规则的不利影响。组合模型对每个 IMF 均进行了小波阈值处理, 在处理过程中选取了适用性强的折中阈值函数准则, 一定程度上减轻了小波阈值参数选取的影响, 提高了整体组合模型的适用性。

### 3 方案验证

为验证上述组合模型, 设计对流层单向传递时钟信号试验, 如图 4 所示。

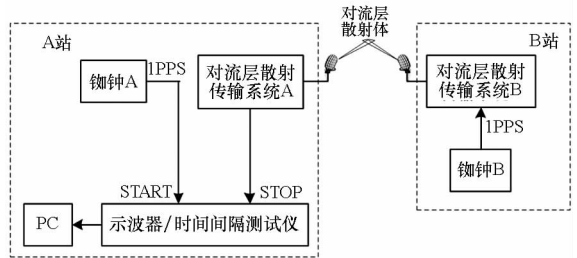


图 4 对流层散射传递时间信号框图

Fig. 4 Diagram of time signal transferred via troposcatter

如图 4 所示, B 站时钟发出的时间信号经对流层传输设备和对流层散射信道后, 由 A 站接收并作为时间间隔计数器 (Time Interval Counter, TIC) 的关门信号, TIC 的开门信号由 A 站的时钟产生。TIC 测得的钟差数据由实际钟差、信道和设备延迟、多径和信道噪声造成的秒信号抖动组成, 因此可利用此试验方案测得的钟差进行模型验证。记录 3600 个数据, 提取钟差数据的趋势项, 如图 5 所示。

如图 5 所示, 1PPS 的抖动使得钟差数据中含

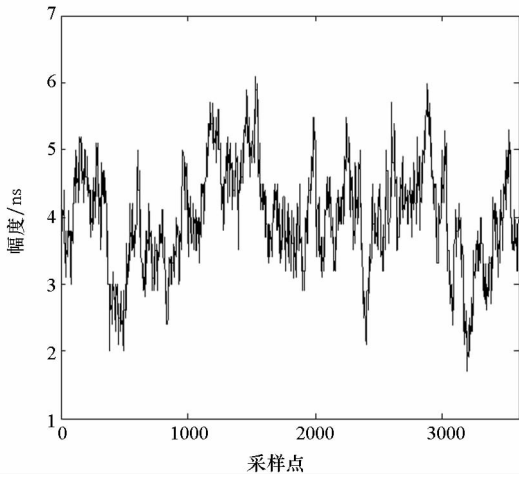


图 5 钟差数据趋势项

Fig.5 Trend component of clock error data

有噪声,为提高时间同步所需钟差的质量,必须对噪声进行处理。为验证组合模型在抖动抑制中的优势,采用四种方案:

**方案 1:组合模型。**按 2.3 小节中组合方式,小波阈值模块中,选取应用较为广泛的 VisuShrink 阈值和本文的折中阈值函数规则。

**方案 2:EMD 模型。**对钟差数据进行 EMD 分解后并进行多次取舍,利用剩余 IMF 和  $r_n(t)$  进行信号重构,得到最优的去噪结果。

**方案 3:小波阈值模型。**对钟差数据进行小波阈值去噪,为方便方案之间的对比,阈值规则、阈值函数规则均与方案 1 中相同。

**方案 4:Kalman 模型。**由于本次获取钟差数据过程中,时钟并未进行调节,因此在 Kalman 模型<sup>[13]</sup>中状态转移矩阵以及观测方程均取 1。

Kalman 模型与组合模型在部分区间上的对比结果如图 6 所示。

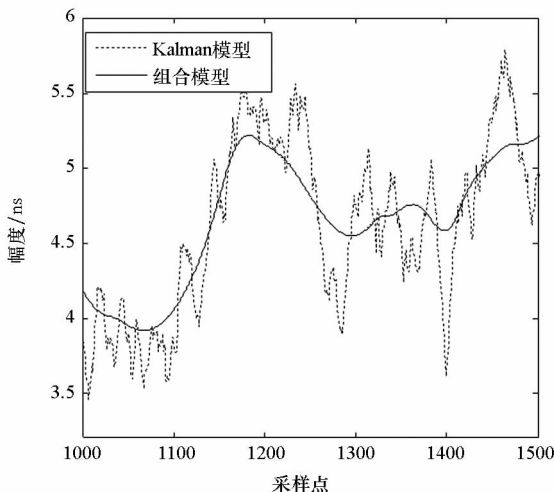


图 6 Kalman 模型与组合模型的去噪结果

Fig.6 De-noising results of Kalman and combined model

组合模型、EMD 模型以及小波阈值模型在部分区间上的对比结果如图 7 所示。

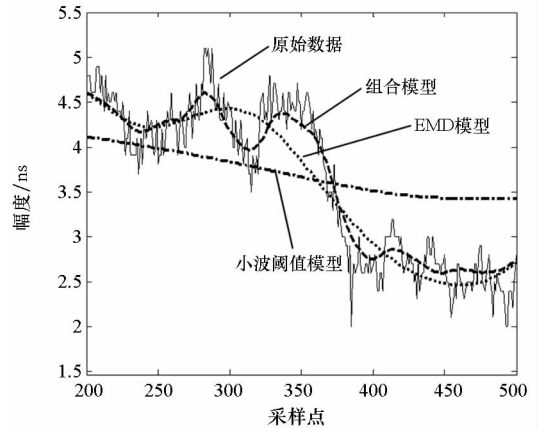


图 7 三种模型的去噪结果

Fig.7 De-noising results of three models

由于隐藏在实测数据中的真实纯净数据未知,故无法根据式(7)计算模型的 SNR。因此结合去噪前后的数据,得出三种模型滤除噪声的功率谱密度如图 8 所示。

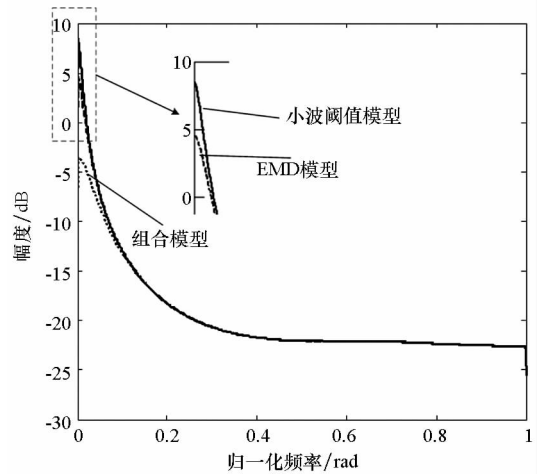


图 8 三模型去除噪声的功率谱密度

Fig.8 Power spectral density of noises extracted by three models

由图 8 可见,三个模型提取出的噪声在高频部分幅度相近,组合模型在低频部分幅度较低,说明组合模型提取出的噪声序列含有用信息较少,进一步验证了组合模型的优势。

最终根据图 6 ~ 8 可得:针对此试验所获得实测钟差数据,Kalman 滤波算法由于参数设置的缺陷,并不能很好地去除钟差数据中的噪声、抑制时间信号的抖动。小波阈值作用于整个信号,在对信号去噪的同时,也滤去了信号的有用信息;单一 EMD 舍去高频 IMF 的同时,也将高频中有用信息舍去。两者虽能滤除噪声,但对信号破坏较大。

组合模型方案能够在滤除每个 IMF 的噪声的同时保留信号的有效成分,有效地抑制秒信号抖动。

## 4 结论

本文为抑制对流层散射信道实现时间同步过程中秒信号的抖动,提高时间同步精度,引入了 EMD 和小波阈值组合模型,并改进了小波阈值中的阈值函数部分。最后利用试验获取的钟差数据进行了模型验证。结果表明:组合方案较单一小波阈值、EMD 以及 Kalman 模型优势明显,能够有效地去除噪声,抑制秒信号的抖动,且模型的适用性较高。

## 参考文献 (References)

- [1] Son S C, Kim N W, Lee B T, et al. A time synchronization technique for coap-based home automation systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2016, 62(1): 10 - 16.
- [2] 向为,徐博,牟卫华,等. 基于锁相环的 GNSS 授时接收机钟差校准算法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 115 - 119.  
XIANG Wei, XU Bo, MOU Weihua, et al. A clock error calibration algorithm based on phase lock loop in GNSS time synchronization receiver[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 115 - 119. (in Chinese)
- [3] Liu H, Zhang R F, Liu J N, et al. Time synchronization in communication networks based on the BeiDou foundation enhancement system [J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(1): 9 - 15.
- [4] 刘强,孙际哲,陈西宏,等. 对流层双向时间比对及其时延误差分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 341 - 347.  
LIU Qiang, SUN Jizhe, CHEN Xihong, et al. Analysis of two way troposphere time transfer and its delay errors[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(4): 341 - 347. (in Chinese)
- [5] Li C L, Chen X H. Beyond line-of-sight two-way time synchronization via troposcatter [J]. Electronics Letters, 2016, 52(25): 2067 - 2068.
- [6] Zheng N S, Cai L S, Bian H F, et al. Hybrid particle filtering algorithm for GPS multipath mitigation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1554 - 1561.
- [7] 崔冰波,陈熙源. 基于一种改进 EMD 算法的 GPS 多径效应抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3): 346 - 351.  
CUI Bingbo, CHEN Xiyuan. Multipath mitigation of GPS signal based on improved EMD algorithm [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(3): 346 - 351. (in Chinese)
- [8] Yasin A S, Pavlov A N, Hramov A E. Digital filtering of noisy data concerned with the effect of the threshold level and choice of a wavelet[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2016, 61(2): 145 - 150.
- [9] 吴光文,王昌明,包建东,等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1340 - 1347.  
WU Guangwen, WANG Changming, BAO Jiandong, et al. A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1340 - 1347. (in Chinese)
- [10] 张明高. 对流层散射传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 103 - 119.  
ZHANG Minggao. Troposcatter propagation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 103 - 119. (in Chinese)
- [11] Li X Y, Jin J, Shen Y, et al. Noise level estimation method with application to EMD-based signal denoising[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(4): 763 - 771.
- [12] 康瑞清,张朝晖,孙冰. 经验模态分解在地磁匹配导航中的研究[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(6): 858 - 862.  
KANG Ruiqing, ZHANG Zhaohui, SUN Bing. Empirical mode decomposition method for geomagnetic matching navigation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(6): 858 - 862. (in Chinese)
- [13] 孙鹏跃,唐小妹,陈华明,等. 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[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 25 - 31.  
SUN Pengyue, TANG Xiaomei, CHEN Huaming, et al. Adaptive extended Kalman filter carrier tracking algorithm for BDS signals under ionosphere scintillation conditions [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(3): 25 - 31. (in Chinese)