

DOI: 10.13203/j.whugis20130315

文章编号: 1671-8860(2014)11-1329-05

# FPLL 载波跟踪环仿真及高动态 GPS 信号测试

刘晓莉<sup>1</sup> 陈东东<sup>2</sup> 贺 喜<sup>3</sup> 刘经南<sup>3</sup>

1 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉, 430072

2 65027 部队, 辽宁 丹东, 118003

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430072

**摘要:** 针对高动态环境下普通 GPS 接收机跟踪环路容易失锁的问题, 考虑到锁频环动态性能好、锁相环跟踪精度高的特点, 实现了二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪环(FPLL)。根据 FPLL 结构原理和误差分析理论, 提出了一种 FPLL 环路的码相位和载波相位精度分析方法。借助 GPS 软件接收机平台, 在 Matlab 环境下仿真实现了 FPLL 载波跟踪环, 并利用 Spirent GSS7700 仿真器采集高动态 GPS 模拟信号对 FPLL 环路进行了测试。测试结果和精度分析表明, 在导航信号的载噪比为 40 dB-Hz, 加速度为 26 g, 加加速度为 9 g/s 的条件下, 该高动态跟踪环路能够达到码相位  $1.31 \text{ m}(1\sigma)$ , 载波相位为  $4.24 \times 10^{-3} \text{ m/s}(1\sigma)$  的跟踪精度。

**关键词:** 锁频环(FLL); 锁相环(PLL); 锁频辅助锁相环(FPLL); 高动态信号; 测量精度

中图法分类号:P228

文献标志码:A

高动态环境下, 导航信号附加了较大且变化率较快的多普勒频移, 普通接收机的跟踪环路由于带宽窄及对动态应力敏感等原因容易失锁。因此, 导航接收机跟踪环路的设计, 是实现高动态条件下 GPS 接收机精确稳定跟踪导航信号的关键。

目前, 国内外有关高动态环境下的 GPS 软件接收机跟踪环路研究主要分为以下 3 个方面: ① 惯性导航 (Inertial Navigation System, INS) 辅助, 即由 INS 产生载波多普勒频移估计值, 提供给 GPS 模块中的跟踪环路, 减小由于相对运动产生的多普勒频移对导航信号跟踪的影响。惯性导辅助组合导航受限于 INS 的精确度, 并且增加了额外器件, 降低了接收机可靠性<sup>[1-2]</sup>。② 软件 GPS 航接收机中广泛采用锁频环与锁相环融合跟踪策略。其中二阶锁频环辅助三阶锁相环环路结构相对简单, 高动态下跟踪精度高, 得到广泛应用, 但此结构存在动态阈值判断问题<sup>[3]</sup>。文献[4]提出了一种基于模糊控制理论的智能判断动态阈值的算法, 缩短了跟踪时间, 提高了跟踪精度。③ 将传统锁相环的鉴相器和环路滤波器由理论上的最佳或准最佳估计器代替, 载波振荡器由估计器控制输出, 达到准确跟踪载波的目的<sup>[5-6]</sup>。不足之处在于估计器的算法仅适用于数据的后期处

理, 无法用于信号的实时跟踪。

本文仿真实现了一种预检测积分时间为 1 ms, 环路鉴别器由二象限反正切鉴相器和四象限反正切鉴频器组成, 环路滤波器采用二阶锁频环(FLL)辅助三阶锁相环(PLL)的 Costas 环的组合结构。测试结果和精度分析表明, 上述二阶锁频环辅助三阶锁相环的组合结构, 记为 FPLL, 能够满足高动态条件下准确跟踪导航信号的要求。本文将对北斗卫星导航系统的高动态应用提供有益参考。

## 1 锁频环辅助锁相环(FPLL)

在高动态环境下, 载波附加了较大且变化剧烈的多普勒频移, 为改善接收机的动态性能, 同时又保证载波测量的精度, 我们采用了二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪环。

### 1.1 FPLL 原理

锁频辅助锁相的载波跟踪环原理结构如图 1 所示。

在中低速环境下使用锁相环, 采用较窄的带宽来获得较精确的载波相位; 在高动态环境下则转入锁频环, 采用较宽的带宽来适应载体的动态

收稿日期: 2013-07-13

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41231174)。

第一作者: 刘晓莉, 博士, 副教授, 研究方向为卫星导航信号处理, 微弱信号检测等。E-mail: xliu@whu.edu.cn

通讯作者: 陈东东, 硕士。E-mail: 26037754@qq.com

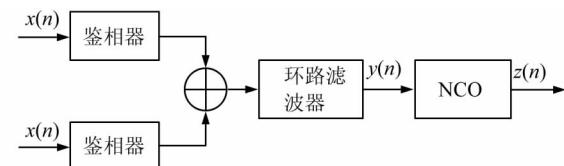


图 1 锁频辅助锁相原理框图

Fig. 1 FPLL Schematics

变化。从而,当接收机动态性能变化时,载波跟踪环路能够自适应地完成锁频环和锁相环之间的切换。

在图 1 原理的实现中,考虑到二象限反正切算法在 $\pm 90^\circ$ 内始终保持线性,且其输出的鉴相结

果与信号幅值无关<sup>[8]</sup>,因此,我们选择了二象限反正切算法鉴相器。另外,四象限反正切鉴频器算法在 $\pm 500$  Hz 内保持线性,且因为该鉴频器基于最大似然估计原理设计,鉴频性能相比其它算法最佳<sup>[8]</sup>。所以,我们选用了四象限反正切算法鉴频器。

## 1.2 环路滤波器

从锁相环和锁频环的分析比较可知<sup>[8]</sup>,锁频环的动态性能优于锁相环,锁相环的跟踪精度优于锁频环。为保证高动态环境下对载波信号的准确跟踪,我们采用了二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪环。环路滤波器结构<sup>[3,8]</sup>如图 2 所示。

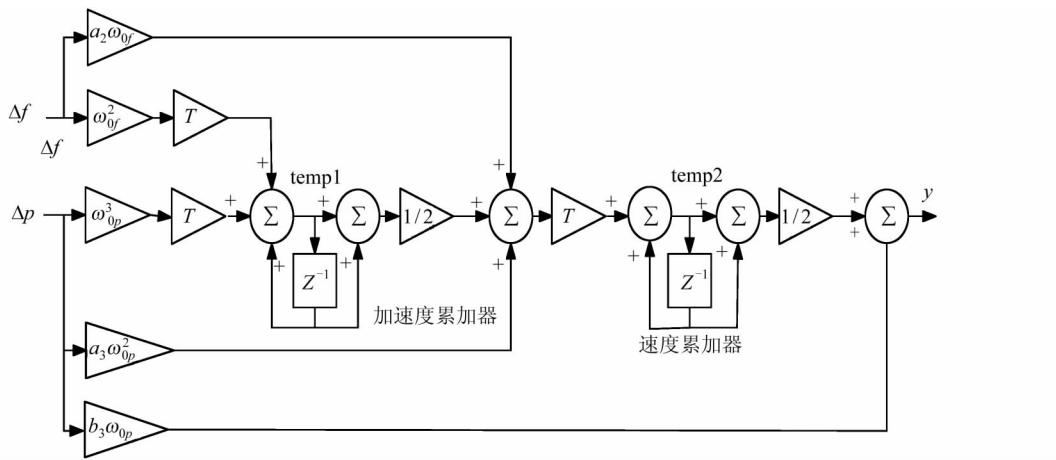


图 2 二阶锁频环辅助三阶锁相环滤波器框图

Fig. 2 Loop Filter Schematics for FPLL

图 2 中,temp1 和 temp2 为中间变量; $\omega_{of}$  和  $\omega_{op}$  分别为二阶 FLL 环路滤波器和三阶 PLL 环路滤波器的特征频率,这两个值分别由各自的环路带宽决定;B 为环路带宽;T 为积分累加时间; $\Delta f$  为鉴频器输出的频率误差; $\Delta p$  为鉴相器输出的相位误差。

图 2 中,当  $\Delta f = 0$  时,滤波器为三阶锁相环形式;当  $\Delta p = 0$  时,滤波器为二阶锁频环形式。当接收机从捕获状态切换到跟踪状态时,频率尚未锁定,捕获估算的载波频率和实际信号载波频率频差较大,主要依靠 FLL 牵引信号到稳态跟踪状态,之后环路逐步过渡到 PLL,环路锁定后,频差为零,FLL 的控制作用消失。因此,当高动态使锁相环难以完成对信号的跟踪时,FPLL 载波跟踪环从锁相环变成锁频环形式,保持对信号的跟踪,实现了滤波器根据多普勒频移自适应切换,载波跟踪环结构实时调整的功能。

## 2 测量误差

GPS 接收机的载波跟踪环属于闭环负反馈

系统,其工作原理可以由图 1 说明。跟踪环路通过环路滤波器输出  $y(n)$  不断调整数控振荡器 NCO 的输出信号  $z(n)$  的参数,使输出信号  $z(n)$  的相位或者频率与输入信号  $x(n)$  保持一致。因此,跟踪环的误差可以通过计算鉴别器的输出得到。

### 2.1 载波跟踪环路测量误差

载波相位精度评估方法根据载波跟踪环中锁相环的鉴相器输出相位差值及标准差  $1\sigma$  计算公式<sup>[9]</sup>得到。

图 1 中,鉴相器的输出为:

$$\theta_d(nT) = \theta_1(nT) - \theta_2(nT) \quad (1)$$

式中, $\theta_1(nT)$  为跟踪环输入信号的相位采样值; $T$  为采样间隔; $\theta_2(nT)$  为环路 NCO 输出信号的相位采样值。根据标准差计算式<sup>[9]</sup>:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n}} \quad (2)$$

式中,第  $i$  次测量的误差为  $\delta_i = \theta_i - \bar{\theta}$ ,  $\theta_i$  为第  $i$  次测量的测量值; $\bar{\theta}$  为第  $i$  次测量的真实值。

由式(1)和式(2)可知,载波跟踪环的载波相位的测量标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\theta_1(i) - \theta_2(i)]^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \theta_d(i)^2}{n}} \quad (3)$$

式中,第*i*次测量的相位误差 $\theta_d(i) = \theta_1(i) - \theta_2(i)$ ,其中 $\theta_1(i)$ 为跟踪环输入信号的第*i*次相位采样值, $\theta_2(i)$ 为环路NCO输出信号的第*i*次相位采样值,载波相位的 $1\sigma$ 误差由式(3)计算得到。

## 2.2 码跟踪环路测量误差

GPS接收机码跟踪环路采用延迟锁定环(delay lock loop, DLL)结构,并由载波辅助,减弱了多普勒频移带给码环的影响。为保证码相位精度,本文中DLL使用归一化非相干超前—滞后功率鉴别器。归一化非相干超前—滞后功率鉴别器的S曲线表达式<sup>[10]</sup>为:

$$B(\delta\tau) = \frac{4\delta\tau - 4\delta^2\tau}{1 - 2|\delta\tau| + \delta\tau^2} \quad (4)$$

式中, $\delta$ 为码片间距与码片周期的比值; $\tau$ 为码片周期。分别取 $\delta=0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ 可以得到DLL环路鉴相器S曲线,如图3所示。

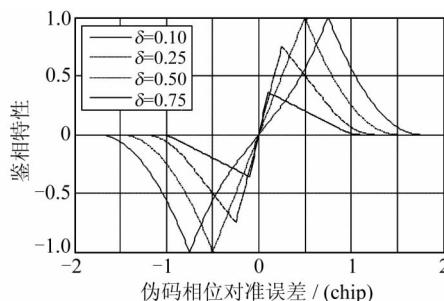


图3 DLL环路鉴相器特性

Fig. 3 Discriminator Characteristics of DLL

由图3可以看出,当 $\delta=0.5$ 时,即延迟间隔为半个码片时,码环鉴相输出在 $\pm 0.5$ 个码片之间为线性,且增益为2,即鉴别器的输出是码相位

误差的2倍。此外,码相位精度的计算还需要顾及中频信号的采样频率。

## 2.3 载噪比

本文采用工程上通用的SMM(summing mean method)计算载噪比<sup>[9,11-12]</sup>。该算法运算复杂度低,实现简单,稳定性好,且计算误差小。

GPS接收机信号载噪比估算公式为<sup>[12]</sup>:

$$[C/N] = 10 \times \lg \left( \frac{\frac{1}{2}A^2}{D[r(n)] - \frac{1}{2}A^2} \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} [C/N_0] &= [C/N] + [B_N] = \\ &[C/N] + 10 \lg (2.046 \times 10^6) = \\ &[C/N] + 63.1 \text{ dB} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $C$ 为信号功率; $N$ 为噪声功率; $A$ 为导航信号幅度; $D[r(n)]$ 为接收信号的方差; $B_N$ 为前端滤波器带宽; $N_0$ 为噪声功率谱密度。

## 3 测试结果及分析

本文采用Spirent GSS7700仿真器、Newstar 210M中频信号采集器、GPS软件接收机建立了测试平台。由仿真器产生测试所需的高动态GPS $L_1$ 信号,中频信号采集器首先将GPS射频信号下变频至16.367 667 MHz的中频模拟信号;然后,通过对中频模拟信号以4.123 968 MHz频率,2 bit采样。最后,将中频数字信号送入GPS软件接收机进行处理,完成FPLL载波跟踪环路的测试及误差分析。

实际测试中,利用GPS软件接收机采集了5组GPS高动态信号,其信号参数见表1第2栏。本文所设计的FPLL跟踪环路的性能测试结果如图7(a)~7(e)所示。可以看出,FPLL能够稳定跟踪高动态信号。利用误差计算方法,FPLL载波跟踪环和码跟踪环的测试精度如表1。表1第3栏给出了相应的 $1\sigma$ 测试误差。

表1 高动态环境下FPLL跟踪精度  
Tab. 1 Tracking Performance with High Dynamic Signals of FPLL

数据		测试数据参数				测试误差( $1\sigma$ )	
名称	数据编号	载噪比/(dB·Hz)	速度最大值/(km·s <sup>-1</sup> )	加速度最大值/g	加加速度最大值/(g·s <sup>-1</sup> )	码相位误差/m	载波相位误差/(10 <sup>-3</sup> m·s <sup>-1</sup> )
space. bin	1	39.33				1.41	4.15
	2	39.35				1.27	4.16
	3	40.02	25.98	26.51	9.02	1.17	4.43
	4	40.94				1.35	4.42
	5	40.94				1.35	4.31
高动态数据误差均值						1.31	4.24

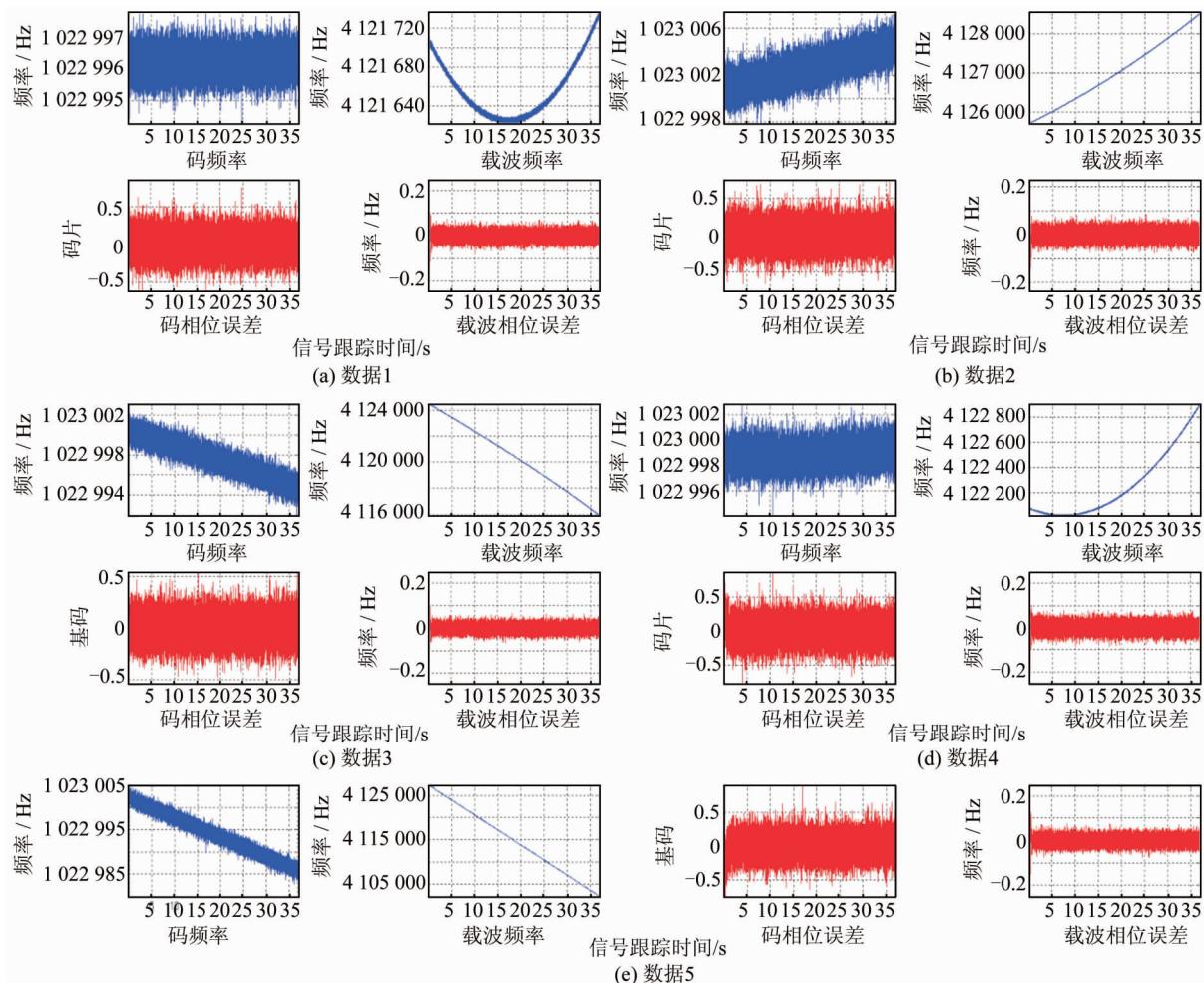


图4 高动态环境FPLL的跟踪性能

Fig. 4 Tracking Performance with High Dynamic Signals of FPLL

由表2可以得到, FPLL在码速率为1.023 Mbps时的 $1\sigma$ 码相位误差均值为1.31 m, 载波相位精度为 $4.24 \times 10^{-3}$  m/s。

## 4 结语

针对高动态GPS信号,本文实现了一种二阶锁频环辅助三阶锁相环的载波跟踪环FPLL,其中,鉴相器采用二象限反正切算法,鉴频器采用四象限反正切算法。通过对高动态环境下接收机跟踪环的理论误差和测试误差的分析,给出了测量误差计算方法,并搭建了数据测试平台,对高动态的模拟GPS导航信号进行了测试。结果显示,在导航信号的载噪比为40 dB-Hz,加速度为26 g,加加速度为9 g/s时,FPLL能够达到的精度为码相位 $1.31$  m( $1\sigma$ ),载波相位为 $4.24 \times 10^{-3}$  m/s( $1\sigma$ )。测试结果表明,FPLL载波跟踪环能够有效准确地跟踪高动态GPS信号。

## 参 考 文 献

- [1] Yu Xingwang, Zhang Xiaohong, Liu Jingnan, et al. GPS /DR Original Observation Integrated Navigation and Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 236-239(于兴旺,张小红,刘经南,等.GPS /DR 原始观测值组合导航定位研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(2):236-239)
- [2] Zhang Kang, Li Lianzhong, Yan An. Research on High Dynamic Deeply Integrated INS+GNSS Navigation Technology[C]. The 4th CSNC Essays-S9 Integrated Navigation and New Navigation Methods, Wuhan, 2013(张康,李连仲,颜安.高动态惯性+卫星深耦合组合导航技术研究[C].第四届中国卫星导航学术年会,武汉,2013)
- [3] Ward P W. Performance Comparisons Between FLL, PLL and a Novel FLL Assisted PLL Carrier Tracking Loop Under RF Interference Conditions [C]. ION GNSS 1998, Nashville, TN, 1998
- [4] Tang Bin, Yu Xiaqiong, Dong Xurong, et al. Design

- Intelligent Carrier Tracking Loop Based on Software GPS Receiver[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(7):807-810(唐斌,喻夏琼,董绪荣,等.智能GPS软件接收机载波跟踪环路设计[J].北京航空航天大学学报,2007,33(7):807-810)
- [5] Xiang Yang, Hu Xiulin. Maximum Likelihood Estimation Based High Dynamic GPS Carrier Tracking Loop[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(7): 1 563-1 567(向洋,胡修林.基于最大似然估计的高动态GPS载波跟踪环[J].电子学报,2010,38(7):1 563-1 567)
- [6] Hurd W, Statman J, Vilnrotter V. High Dynamic GPS Receiver Using Maximumlikelihood Estimation and Frequency Tracking[J]. *IEEE Tran on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(4):425-437
- [7] Kaplan E D, Hegarty C. Understanding GPS: Principles and Applications [M]. 2nd Edition. Norwood, MA: Artech House, 2006:155-174
- [8] Lindsey W C. Synchronization Systems in Communication and Control[M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1972: 478-480
- [9] Qian Zheng, Wang Zhongyu, Liu Guili. Analysis and Data Processing of Test Errors [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008(钱郑,王中宇,刘桂礼.测试误差分析与数据处理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008)
- [10] Li Yunrong. Performance Analysis and Achievement for Signal Acquisition and Tracking About GPS Receiver[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007(李云荣.GPS接收机信号捕获与跟踪的性能分析及实现[D].武汉:武汉大学,2007)
- [11] Zhang Tisheng, Zheng Jiansheng, Zhang Hongping, et al. Carrier Phase Extracting and Positioning Performance Analysis for the High Precision Single-frequency GPS Receiver Design[C]. The 2th China Satellite Navigation Conference, Shanghai, 2011(张提升,郑建生,章红平,等.高精度GPS单频接收机载波相位提取与定位性能分析[C].第二届中国卫星导航学术年会,上海,2011)
- [12] Jiang Junwei, Duan Xiaohui, Lin Yang, et al. New Algorithm for GPS C/N0 Estimation[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(24):7 786-7 788(蒋君伟,段晓辉,林阳,等.一种GPS信号载噪比估计的新算法[J].系统仿真学报,2009,21(24):7 786-7 788)

## Simulation and Testing of FPLL Carrier Tracking Loops with High Dynamic GPS Signals

LIU Xiaoli<sup>1</sup> CHEN Dongdong<sup>2</sup> HE Xi<sup>3</sup> LIU Jingnan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

<sup>2</sup> Troops 65027, Dandong 118003, China

<sup>3</sup> Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** The conventional tracking loops in GPS receivers usually lose locked high dynamic signals. Thus, to achieve better FLL performance in dynamic situations and higher PLL measurement accuracy, we implemented a second order FLL in an assisted third order PLL (FPLL) based carrier tracking loop. These methods were employed to analyze the measurement accuracy FPLL of code and carrier phases, and implemented on our software receiver platform with Matlab. FPLL was tested using the data collected through Spirent GSS7700 simulator. The results show that the average measurement accuracy for code the phase and carrier phase was  $1.31 \text{ m} (1\sigma)$  and  $4.24 \times 10^{-3} \text{ m/s} (1\sigma)$ , respectively, as the signals are around 40 dB/Hz of SNR (signal to noise ratio), with 26 g of acceleration and 9 g/s of jerk.

**Key words:** frequency lock loop (FLL); phase lock loop (PLL); FLL assisted PLL (FPLL); high dynamic signal; measurement accuracy

**First author:** LIU Xiaoli , associate professor, specializes in signal processing for satellite navigation systems and weak signal detection.  
E-mail: xliu@whu.edu.cn

**Corresponding author:** CHEN Dongdong, postgraduation. E-mail: 26037754@qq.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41231174.