

文章编号: 2095-4980(2018)01-0075-06

一种双环路高动态 QPSK 载波跟踪器设计

张晋升, 王艳峰, 丁瑞强, 吕咸耀

(航天恒星科技有限公司, 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100086)

摘 要: 针对低轨卫星正交相移键控(QPSK)连续波通信, 提出一种在高动态环境下载波频率的跟踪方法。采用双环路载波跟踪机制, 其中外部环路用于频偏牵引, 减少较大频偏引起的匹配滤波器频谱截断失真; 内部环路用于精确解调数据, 能稳定跟踪含有加速度 $\leq 30g$ 的信号。采用加速度补偿方法, 解决在百毫秒级中断间隔情况下, 残余频偏造成匹配滤波器相位突变的问题。该方法能够快速准确地消除高动态载波频偏, 在信噪比为 10 dB 时经上板测试误码率小于 10^{-5} 量级。采用 FPGA+DSP 实现架构, 开发敏捷, 应用灵活, 性能可靠。

关键词: 高动态跟踪; 双环路载波跟踪; 加速度补偿

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0075

A dual-loop structured QPSK carrier tracker for high-dynamic applications

ZHANG Jinsheng, WANG Yanfeng, DING Ruiqiang, LYU Xianyao

(State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Space Star Technology Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: A method of tracking carrier frequency in high dynamic environment is proposed for Quadrature Phase Shift Keying(QPSK) continuous wave communication of Low Earth Orbit(LEO) satellite. Using dual-loop carrier tracking mechanism, the external loop is utilized for frequency offset traction, which can quickly reduce the large frequency offset caused by the matched filter cutoff spectrum distortion; the internal loop is utilized for accurate data demodulation, which can stably track the signal containing the acceleration less than $30g$. The method of acceleration compensation is adopted to solve the problem of the phase mutation of the matched filter caused by the residual frequency deviation in the millisecond interval. This method can eliminate the high dynamic carrier frequency offset quickly and accurately. When the Signal to Noise Ratio(SNR) is 10 dB, the error rate of the terminal is less than 10^{-5} . Using digital Field Programmable Gate Array+Digital Signal Processor(FPGA+DSP) implementation framework, the method is flexible, reliable and agile for development.

Keywords: high dynamic carrier tracking; dual-loop carrier tracking; acceleration compensation

低轨(LEO)卫星通信一般提供实时语音、数据、传真、卫星无线电定位业务, 具有传输时延短、路径损耗小以及地面终端功耗低的特点, 因此研发 LEO 卫星系统正成为未来移动通信的重要发展方向。低轨卫星相对于地面高速移动, 如果地面终端也在高速运动, 接收信号会引入高动态频率信息。卫星距离地面 1 000 km 高度, 加速度最大为 $30g$ 时, 频率变化率接近 1 500 Hz/s。多普勒频率变化率较大, 在经过匹配滤波器时, 传统的载波跟踪环路不再适用。例如, 文献[1-3]提出在 GPS L1 C/A 扩频信号中, 最大多普勒频偏为 5 kHz, 远小于信号传输带宽 2.046 MHz, 经过匹配滤波器造成的衰减较小, 不需要进行频率牵引; 而文献[4-5]提出采用极大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)的方法, 由于是一种前馈估计, 不具有能适应加速度信号的环路滤波器, 动态环境时误码率较高。文献[6]提出传统卡尔曼滤波器需要根据目标的运动状态选择合适的动态模型并且调节相应的状态噪声, 参数切换频繁。本文创新性地提出双环路载波跟踪器, 由外部牵引环路和内部解调环路组成。其中外部环路用于频率牵引, 减少匹配滤波器造成的信号频谱失真; 内部解调环路用于稳定跟踪信号并且精确解调数据。同时提出利用加速度补偿方法, 减小 2 个环路之间的相位突变。具备这 2 个特点的载波跟踪器动态适应性高, 环路跟踪稳定, 误码率低。本设计采用 FPGA+DSP 的架构, 开发周期短, 外部环路由现场可编程门阵列(FPGA)实现, 内部环路由 DSP 实现。缩短 FPGA 开发周期, 减轻 DSP 计算压力。

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-05-26

1 高动态对匹配滤波器影响

1.1 匹配滤波截止失真

在载波跟踪过程中, 多普勒频率变化使得接收信号中心频点在 0 Hz 附近摆动, 经过匹配滤波器会产生不同的能量衰减, 造成误码; 特别地, 当积分多普勒频偏较大时, 频谱超出滤波器带宽范围, 能量由于截断而失真, 严重时会造成载波跟踪环失锁。

1.2 匹配滤波相位突变

载波跟踪过程中, 双环路之间依靠中断通信, DSP 环路反馈给 FPGA 的是一个中断间隔 T_i (例如 200 ms) 内的频率变化估计值。匹配滤波器具有线性相位延迟特性, 因此, 较大频偏估计信号经过时会造成明显的相位跳变。假设采用 N 阶直接型有限冲激响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器, 残余频差 f_e 造成相位突变计算如下:

$$\phi_e = 2\pi f_e (N-1) T_i \quad [\text{rad}] \quad (1)$$

观察式(1)可得, 在不减少中断时间和滤波器阶数的情况下, 通过减小 f_e 可以减小相位延迟 ϕ_e 。

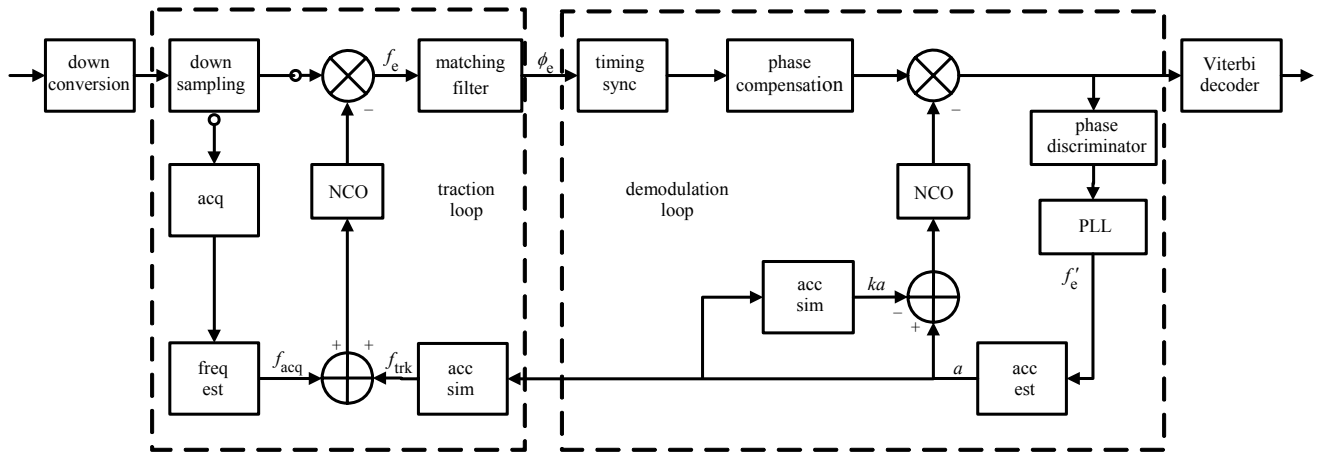


Fig.1 Block diagram of dual-loop carrier tracker algorithm
图 1 双环路载波跟踪器算法框图

2 双环路载波跟踪器原理分析

双环路载波跟踪器原理请见图 1。首先, 外部牵引环路主要作用是将高动态接收信号的中心频率牵引到 0 Hz 附近, 尽可能全部落入匹配滤波器的带宽范围内。其次, 内部解调环路主要作用是通过数字锁相环对含有高动态信息的残余频偏 f_e 精确估计, 进行数据解调; 同时将频率信息 f_{trk} 反馈给外部环路, 修正多普勒频率牵引值。最后, 残余频偏经过匹配滤波器后, 造成双环路之间存在较大相位突变, 由加速度估计器和加速度模拟器来共同完成加速度补偿, 减弱相位突变的影响。

2.1 外部牵引环路

分为频率捕获阶段和频率跟踪阶段。在频率捕获阶段, 通过采样点捕获和频率精估 2 个模块, 完成对初始多普勒频偏的估计。经过匹配滤波器、符号定时同步、锁相环后, 外部环路进入频率跟踪阶段, 接收内部环路计算出的残余频偏估计值 f_{trk} , 与捕获阶段的频偏值 f_{acq} 进行累加, 即 $f_{\text{acq}} + f_{\text{trk}}$, 再进行载波残余频偏的调整。

QPSK 频率精估器采用文献[7]中提到的方法, 具有频率估计分辨率高的特点。首先对符号内的采样点累加, 接着通过四次方运算, 滑动平均滤波, 最后进行 FFT 运算, 峰值对应第 k 根谱线再乘以频率分辨率 Δf 为估计出的频点。其中, 频率估计范围为 $(-R_s/2, R_s/2)$, 其中 R_s 为符号速率, FFT 点数取 N , 精估频率 f_{acq} 计算:

$$f_{\text{acq}} = k \Delta f = \frac{k R_s}{4N} \quad (2)$$

2.2 内部解调环路

主要由相位补偿、鉴相器和环路滤波器构成。采用极大似然估计方法相位补偿^[4-5]可以使得首次跟踪相位快速牵引; 判决反馈鉴相器计算量小, 可以避免四次方运算造成较大的信噪比损耗^[7]。

根据文献[3],三阶锁相环跟踪含有加速度的信号时稳态误差为零,环路滤波器典型结构见图 2,其中 $a_3 = 1.1$, $b_3 = 2.4$, $T_s = 1/R_s$, $\omega_p = B_L / 0.7845$, 环路噪声带宽 B_L 取 50 Hz。

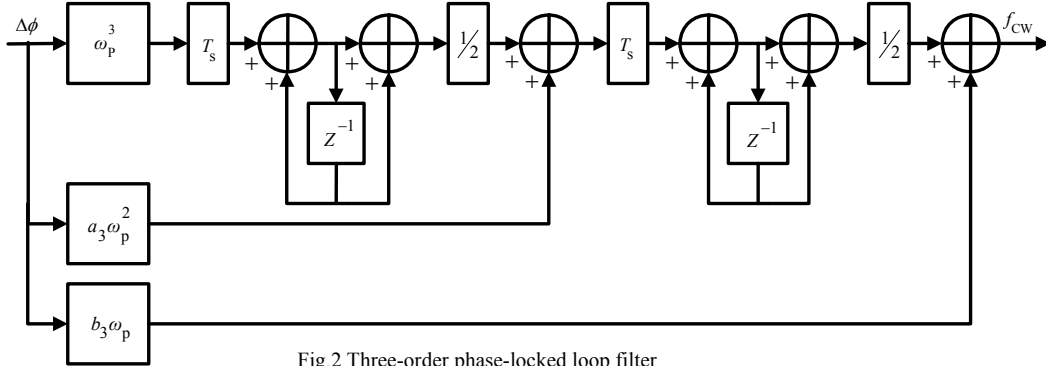


Fig.2 Three-order phase-locked loop filter
图 2 三阶 PLL 环路滤波器

环路滤波器传递函数为:

$$H(z) = \left\{ z^{-2} \left(\frac{\omega_p^3 T_s^2}{4} - \frac{a_3 \omega_p^2 T_s}{2} + b_3 \omega_p \right) + z^{-1} \left(\frac{\omega_p^3 T_s^2}{2} - b_3 \omega_p \right) + \left(\frac{\omega_p^3 T_s^2}{4} + \frac{a_3 \omega_p^2 T_s}{2} + b_3 \omega_p \right) \right\} \frac{1}{1 - 2z^{-1} + z^{-2}} \quad (3)$$

三阶锁相环的相位测量误差源包括相位抖动误差和动态应力误差,公式(4)为相位抖动误差,误差源主要分为热噪声、机械颤动引起的频率抖动以及艾兰均方差 3 种;其中,艾兰均方差 σ_r 为 10^{-10} ,机械振动误差 σ_v 为 2° ,光速 c 为 3×10^8 m/s, λ_l 为波段波长。

$$\sigma_{\text{PLL}} = \sqrt{\left(\frac{180}{\pi} \right)^2 \frac{B_L}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T_s C/N_0} \right) + \sigma_r^2 + \left(360 \frac{c}{\lambda_l} T_s \sigma_r \right)^2} \quad (4)$$

公式(5)是动态应力误差,分别包括加加速度、速度变化率造成相位误差。其中加加速度 $d^3 R/dt^3$, 加速度 $d^2 R/dt^2$, 残余频偏用 f_d 表示。

$$\theta_e = \left(\frac{d^3 R (0.7845)^3}{dt^3 0.19(B_L)^3} + \frac{51.4}{2} \frac{d^2 R}{dt^2} T_s^2 + f_d T_s \right) \cdot 360 \quad (5)$$

对锁相环跟踪门限 C/N_0 (载噪比)的估计方法是,在给定环路噪声带宽 B_L 和动态情况下,3 倍的相位测量误差和动态应力误差之和不超过 $\pi/4$ 的鉴相范围,即:

$$3\sigma_{\text{PLL}} + \theta_e \leq 45^\circ \quad (6)$$

2.3 加速度补偿

在双环路之间中断时刻,内部环路读取 L 个符号的缓存数据,计算出 T_i 内的频偏估计值 f_e' ,估算出频偏变化率 a ,然后在下一次中断时刻将其反馈给外部环路。当中断间隔较短且 L 较大时,可以认为 T_i 内的 a 是常数。加速度估计器可以求出当前 L 个符号的频率变化率先验值 a , 即:

$$a = f_e' / L \quad [\text{Hz/symbol}] \quad (7)$$

残余频偏由 f_e' 减少为 a , 根据式(1),经过匹配滤波的相位突变为原来的 $1/L$, 减少了相位干扰。

同时在内外 2 个环路上,加速度模拟器输入相同的 a ,以相反极性进行频率累加。假设第 k 个符号输出的校正频率 Δf_k 为:

$$\Delta f_k = ka = kf_e' / L, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

在符号 L 时刻,实际 FPGA 环路频偏为 f_e , DSP 环路输出的频率值为 f_e' ,估计误差为 e_L , 则有:

$$f_e = f_e' + e_L \quad (9)$$

在符号 $L+l$ 时刻,假设实际频率相对于符号 L 变化了 $\Delta f_{L,l}$,经由式(8),FPGA 环路频率牵引后的残余频偏 $f_{e,2}$ 为:

$$f_{e,2} = (f_e + \Delta f_{L,l}) - \Delta f_l = f_e + \Delta f_{L,l} - la \quad (10)$$

由式(9),DSP 环路频率校正后残余频率 $f_{e,2}'$:

$$f_{e,2}' = f_{e,2} - (f_e' - \Delta f_l) = e_L + \Delta f_{L,l} \quad (11)$$

对比式(10)和式(11)发现,通过加速度模拟器,内部解调环路去除多普勒变化率 a 的影响;而且当 $\Delta f_{L,1}$ 远小于匹配滤波器带宽的情况下,此时解调环路只剩下环路滤波器估计误差 e_L 的影响。因此,双环路跟踪可以保证内外环路稳定跟踪。

3 仿真实验及结果分析

为了分析高动态频偏对双环路载波跟踪的影响,采集实际数据进行如下仿真实验,其中,符号速率 R_s 为 18 Ksps,中断间隔 T_i 为 200 ms,每帧符号数 L 为 3 600。

3.1 双反馈跟踪环路,采用加速度补偿

仿真条件:采集数据 E_s/N_0 为 30 dB,频率变化率 500 Hz/s,跟踪时间 50 s,仿真结果见图 3。跟踪误差趋于稳定;均值约 92.56 Hz,标准差约为 1.992 Hz。50 s 跟踪无误码,解调误码率小于 10^{-6} 。

结果分析:在跟踪高动态信号时,由式(4)计算相位抖动理论误差约为 94.8 Hz,式(5)计算动态应力理论误差约为 0.14 Hz,相对于实际跟踪误差的残差为 0.388 Hz。环路跟踪稳定,频率误差主要由相位抖动造成,三阶锁相环对仅含加速度信号的动态应力误差趋于 0,同时匹配滤波器相位突变为原来的 1/3 600。因此,经过加速度补偿后,多普勒频偏减少为原来的 1/3 600,经过匹配滤波器造成的相位延迟可以忽略。

3.2 加速度 30g 的跟踪结果

仿真条件:采集数据 E_s/N_0 (E_s 为信号的能量; N_0 为噪声功率谱密度)为 10 dB,模拟实际卫星运动速度,即加速度 $\leq 30g$,加加速度 $\leq 0.5g/s$,跟踪时间 420 s,包括加加速度、匀加速、减加速、匀速 4 个阶段。仿真结果见图 4。

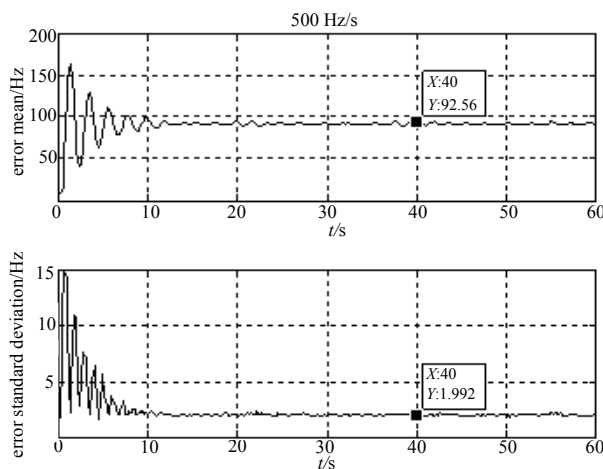


Fig.3 Tracking error with acceleration compensation
图 3 加速度补偿跟踪误差

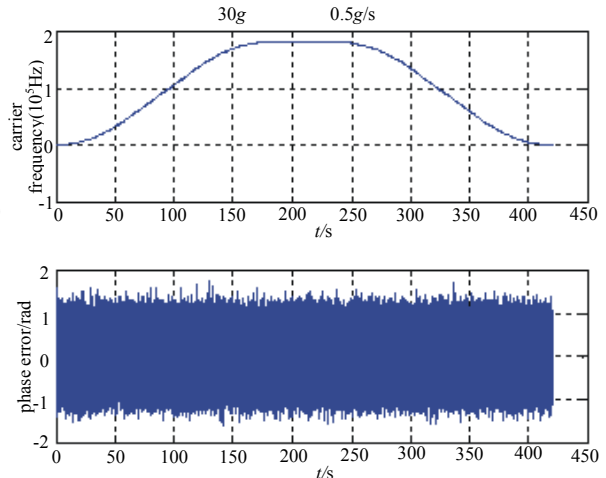


Fig.4 Tracking results at 30g
图 4 加速度 30g 的跟踪结果

通过文献[8]方法,进行微弱信号高动态跟踪结果分析:图 4 为载波跟踪和鉴相结果曲线,曲线平滑,跟踪稳定,很好地反映卫星高速运动时的多普勒变化情况;统计仿真误码率,经过 420 s 连续跟踪、解调和维特比译码后无误码,误码率远小于 10^{-6} 。含有加速度补偿的双反馈跟踪环路具有良好的跟踪性能,误码率低,跟踪稳定。

4 设计实现及结果验证

双环路载波跟踪器通过 FPGA+DSP 的架构来实现。其中,FPGA 采用 Xilinx XC7K325T 芯片,综合采用 ISE14.7 中的 XST 工具,上板验证采用 Chipscope; DSP 采用 TMS320T6416。

FPGA 部分完成信号通道、外部牵引环路以及通信接口功能。其中系统时钟 f_s 为 8.64 MHz,经过 120 倍下采样后,数据速率降为 4 倍过采样。通道部分包括下变频、下采样等模块;外部牵引环路包括匹配滤波器、频率精估器、加速度模拟器;最后还有外部存储器接口(External Memory Interface, EMIF)和中断发生器。

FPGA 部分占用资源较少,综合实现后资源统计结果见表 1,其中占用嵌入式块随机存取存储器(Block Random Access Memory, BRAM)总共 1.056 Mb,其他资源均小于 XC7K325T 芯片的 15%。EMIF 通信中,FPGA 采用乒乓随机存取存储器(RAM)存储数据,MEM_A 或 MEM_B 在中断时刻锁存 3 600 个符号的采样点。DSP 接收到中断后,通道增强型直接内存存取(Enhanced Direct Memory Access, EDMA)一次性读取 MEM_B 或 MEM_A 中的数据,进行定时同步,载波同步,解算出多普勒频偏,然后存放在加速度估计寄存器中;在下次中断到来时刻,FPGA 读取该寄存器值,接着送入载波数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)中进行频率调整,完成双反馈环路跟踪。

DSP 实现内部解调环路,包括定时同步环、载波跟踪环、加速度估计器、模拟器以及维特比译码模块。DSP 程序参数可通过寄存器定义,重新配置后可用于其他速率信号的解调。处理时钟 800 MHz; DSP 运行时占用内部 RAM 约为 46 Kb,占用资源较少。

上板测试条件:采用安捷伦 5182B 信号源产生信号,性噪比约为 10 dB,加速度 $\leq 30g$,加加速度 $\leq 0.5g/s$ 。通过 Chipscope 抓取频率精估模块输出,见图 5。峰值清晰,位置为 15,最大值 146 289,经计算多普勒频偏约为 32.95 Hz。FPGA 牵引环路中频率精估器输出结果准确。经过长时间拷机测试,该载波跟踪器性能稳定可靠,误码率小于 10^{-5} 量级。

5 结论

本文设计的双环路高动态 QPSK 载波跟踪器,很好地应用在低轨卫星通信接收机中,具有性能稳定、误码率低、实现简单的特点。其中外部牵引环路可以将输入信号的多普勒频率牵引到匹配滤波器范围内;通过内部环路可以跟踪高动态连续信号,并且精确解调。双环路之间通过加速度补偿方法,可以消除较大多普勒频偏造成的匹配滤波器相位突变问题。设计实现后通过上板验证,该方法可以在信噪比为 10 dB,并且 FPGA 和 DSP 通信存在 200 ms 中断间隔的情况下,跟踪加速度大于 30g 的高动态信号,误码率小于 10^{-5} 量级。

采用 FPGA+DSP 实现架构设计,缩短了 FPGA 开发设计、仿真验证以及上板调试周期,提高了开发效率;同时将 DSP 程序参数通过寄存器重新配置,使该架构可以适用于多种调制方式、编码方式、多种卫星动态信息以及不同灵敏度信号的解调。

参考文献:

- [1] 郑兴平,寇艳红. 高动态 GPS 接收机跟踪环路设计与实现[J]. 无线电工程, 2010,40(1):26-28. (ZHENG Xingping,KOU Yanhong. Design and implementation of high dynamic GPS receiver tracking loop[J]. Radio Engineering, 2010,40(1):26-28.)
- [2] 左启耀,袁洪,林宝军. 高动态环境下 GPS 信号跟踪环路优化算法研究[J]. 宇航学报, 2008,29(2):160-165. (ZUO Qiyao,YUAN Hong,LIN Baojun. Optimal algorithm research of GPS signal tracking loop under the high dynamic circumstance[J]. Journal of Astronautics, 2008,29(2):160-165.)
- [3] PHILLIP W W. Performance comparisons between FLL loop under RF interference conditions[C]// ION GPS 1998. Nashville,TN,USA:[s.n.], 1998:577-582.
- [4] 郇浩,陶选如,陶然,等. 多普勒频率变化率快速最大似然估计辅助的高动态载波跟踪环路[J]. 电子与信息学报, 2014,36(3):577-582. (HUAN Hao,TAO Xuanru,TAO Ran,et al. Carrier tracking loop in high dynamic environment aided by fast maximum likelihood estimation of Doppler frequency rate-of-change[J]. Journal of Electronics Information Technology, 2014,36(3):577-582.)
- [5] 程俊仁,刘光斌,张倩,等. MLE 辅助 PLL 的高动态 GPS 载波跟踪[J]. 宇航学报, 2015,36(1):103-108. (CHEN Junren, LIU Guangbin,ZHANG Qian,et al. MLE Assisted PLL Based High Dynamic GPS Carrier Tracking[J]. Journal of Astronautics, 2015,36(1):103-108.)

表 1 XST 综合占用资源统计

Table1 Logic synthesis result by XST

item	flip flops	LUTs	BRAM 18 Kb	DSP48
XC7K325T	407 600	203 800	1 335	840
resource occupancy	265 27	213 84	60	125
percentage	6.5%	10.5%	4.5%	14.9%

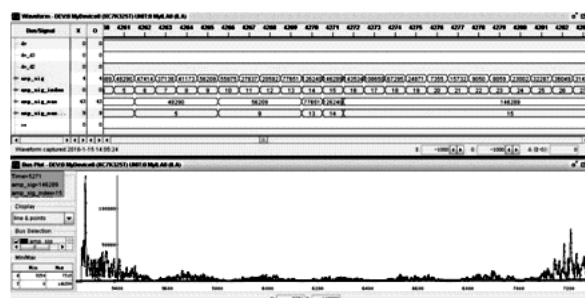


Fig.5 Frequency fine estimation result in FPGA loop

图 5 FPGA 环路频率精估结果

- [6] 姚舜扬,尹建君,张建秋. 多项式预测 GNSS 信号矢量跟踪算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):681-687. (YAO Shunyang,YIN Jianjun,ZHANG Jianqiu. Polynomial prediction GNSS vector tracking algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):681-687.)
- [7] BISCHOF C,SCHÖN S. High-rate GPS velocity and acceleration determination in highly dynamic flights[C]// ION GNSS+2015. Tampa,Florida,USA:[s.n.], 2015:14-18.
- [8] MOSCHAS F,STIROS S. PLL bandwidth and noise in 100 Hz GPS measurement[J]. GPS Solutions, 2015(19):173-185.

作者简介:



张晋升(1984-),男,兰州市人,硕士,工程师,主要从事导航基带信号处理设计、SoC 设计.email:kszjs0204@163.com.

王艳峰(1984-),男,河北省沧州市人,博士,高级工程师,主要从事卫星通信系统设计、集成电路设计.

丁瑞强(1988-),男,太原市人,硕士,工程师,主要从事嵌入式系统设计.

吕咸耀(1987-),男,山东省青岛市人,硕士,工程师,主要从事集成电路设计.

(上接第 74 页)

- [5] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016. (WU Jiabin. The research for technology of high precise laser facula position detection based on the quadrant detector[D]. Changchun,China:Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics Chinese Academy Sciences, 2016.)
- [6] 陈波,徐扬,郑鹏,等. 几种 FFT 加窗三次样条插值的间谐波检测方法的比较[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016,39(5):613-616. (CHEN Bo,XU Yang,ZHENG Peng,et al. Comparison of several interharmonics detection approaches based on windowed cubic spline interpolation FFT[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016,39(5):613-616.)
- [7] 段宇翔,苏飞. 变换域全相位信号处理算法[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3):614-622. (DuanYuxiang,Su Fei. All-phase Signal Processing Algorithm in Transform Domain[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3):614-622.)
- [8] 赵海军,李敏,李明东,等. 一种基于快速阵列算法实现的 IIR 数字滤波器[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016,38(2):219-224. (ZHAO Haijun,LI Min,LI Mingdong,et al. Realization of an IIR digital filter based on fast array algorithm[J]. Journal of Yunnan University(Natural Science Edition), 2016,38(2):219-224.)
- [9] 于爱华,黄朝耿,李刚,等. 一种新型低复杂度的 IIR 格型滤波器[J]. 电子学报, 2013,41(9):1703-1709. (YU Aihua,HUANG Chaogeng,LI Gang,et al. A new class of low complexity IIR lattice filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2013,41(9):1703-1709.)
- [10] 曹阳,刘世涛. 空间激光通信移动平台的自抗扰视轴稳定控制研究[J]. 光子学报, 2015,45(4):59-64. (CAO Yang, LIU Shitao. Optical axis ADRC stabilization of free space optical communication based on space mobile platform[J]. Acta Photonica Sinica, 2015,45(4):0406001.)
- [11] 宋江鹏,孙广利,周荻,等. 反射镜光电平台视轴稳定技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015,44(6):1904-1911. (SONG Jiangpeng,SUN Guangli,ZHOU Di,et al. Line-of-sight stabilization techniques for mirror electro-optical platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015,44(6):1904-1911.)

作者简介:



王选钢(1983-),男,四川省泸州市人,博士,工程师,主要研究方向为激光跟踪、激光探测.email:wxxg20020788@163.com.

左丹(1990-),女,四川省绵阳市人,硕士,工程师,主要研究方向为激光跟踪控制算法.

张瑶(1990-),女,长春市人,硕士,工程师,主要研究方向为激光跟踪系统光学设计.

冯新华(1980-),男,陕西省宝鸡市人,硕士,工程师,主要研究方向为跟踪系统信号处理.

侯贵双(1978-),男,陕西省安康市人,硕士,工程师,主要研究方向为跟踪系统结构设计.

岳立(1997-),男,四川省巴中市人,硕士,工程师,主要研究方向为跟踪系统信号处理.