

基于数字零中频纳米位移遥测技术研究

樊红星^{1,2}, 周 燕^{1,2}, 范松涛¹, 李丽艳¹

(1. 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对航空航天领域对超静平台纳米量级位移遥测的需求, 研制了一套体积小、质量轻、便携式的激光多普勒纳米位移遥测系统; 系统在电学部分采用基于数字零中频的解调方案, 模拟器件的减少有助于提高系统的探测准确度和精度; 理论分析了基于数字零中频的纳米位移振动解调算法, 并进行了算法实现和试验验证, 研究结果表明, 该算法最小探测相位达到 1° , 对应振动位移 2.15 nm。在此基础上, 利用 PI-E501 标准振动源, 在作用距离为 10 m 处, 对研制的激光多普勒纳米位移遥测系统进行了性能测试, 实现了振动频率 10 Hz 和 1 000 Hz 下和幅度 1 000、200、10 nm 的遥测, 测试结果表明: 该遥测系统满足工作频段在几十到几百赫兹, 振动位移为微米甚至更低的航空航天领域对超静平台测量的要求。

关键词: 超静平台; 数字零中频; 纳米位移; 相位; 遥测

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117008

Research on nanometer displacement telemetry based on digital zero intermediate frequency

Fan Hongxing^{1,2}, Zhou Yan^{1,2}, Fan Songtao¹, Li Liyan¹

(1. Opto-electric System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A small volume, light weight, portable laser Doppler nanometer displacement telemetry system was presented that meet the demand of nanometer detection for the ultra-stable platform in the aerospace industry. In the electrical module, the system adopted the demodulation scheme based on digital zero intermediate frequency, thus the decrease of the analog devices was helpful to improve the detection resolution and precision of the system. Digital zero intermediate frequency demodulation method for the nanoscale vibration amplitude was analyzed theoretically and implemented. The proof experiment shows that the minimum phase of 1° , equal to vibration amplitude 2.15 nm detectable capacity is achieved. PI-E501 standard vibration source, placed at 10 meter distance from the system, was employed to testify the performance of the laser Doppler nanometer displacement telemetry system and telemetry with amplitudes of 1000, 200, 10 nm at the frequency 10 Hz and 1000 Hz was achieved. This system performance verification experiment shows that the laser Doppler nanometer displacement

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61475150)

作者简介: 樊红星(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光多普勒干涉测振方面的研究。Email: fanfhx@semi.ac.cn

导师简介: 周燕(1972-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事微弱光探测与成像方面的研究。Email: zhoyan@semi.ac.cn

telemetry system achieve the ability of dozens of hertz to hundred hertz frequency, microns or even smaller vibration amplitude detection for the ultra-stable platform in the aerospace industry.

Key words: ultra-stable platform; digital zero intermediate frequency; nanometer displacement; phase; telemetry

0 引言

在航空航天领域,由于卫星处于复杂的外部环境和承载各种科研仪器,在工作过程中其自身系统不可避免地长期处于振动状态,这种微振动对航天器有效载荷尤其是光学器件和微重力实验等结果危害十分严重^[1],随着航空航天技术的深入发展,航天器微振动测量技术也得到了各国航天人的重视。针对航天器微振动的测量,一般采用加速度传感器,但是对于一些轻薄被测物和异型被测面的测量,还需要借助遥测手段;激光多普勒测振技术具有非接触,探测距离远,抗干扰性强,灵敏度高,对被测物无附加载荷的优点,成为近年来航空航天领域测振研究的方向^[2-3]。

激光干涉测振技术研究主要集中在自混合干涉法,零差干涉法和外差干涉法。激光自混合干涉法对光反馈功率要求较高,在远距离振动检测或者被测面反射系数低的情况下,反馈光能量较小,这样给系统的信号解调处理带来难度^[4];零差干涉法无载波,抗干扰性差,目标信号探测精度较低,而且无法判断运动方向;而外差干涉法抗干扰性强,灵敏度高,探测距离远,因此成为目标研究较多的激光测振方法,因此文中将对基于外差干涉的纳米位移遥测技术进行研究。信号解调作为激光多普勒位移测量重要的部分,主要的解调算法有 PGC 解调^[5],锁相解调^[6]、混频法^[7]、正交解调方法^[8],随着对解调抗干扰性,精度,分辨率和动态范围要求增加,近几年的研究主要集中在 IQ 解调算法实现上。

2002 年,德国 Polytec 公司的 Martin Bauer 等人利用模拟降频和数字下变频相结合的方法得到了位移和速度,在 0.5 Hz~350 kHz 频率范围内实现位移的高精度解调^[9],该方法会产生直流漂移和镜像干扰的问题,而且模拟模块易受温度等干扰;为了改进这一研究,2015 年,美国马里兰大学 John R Rzasa 和韩国西江大学的 Kyuman Cho 等人采用载

波模拟正交化和数字解调的方法实现了 50 nm 的位移测量,理论最小探测能力可以达到 0.5 nm^[10],但在实际应用中 IQ 两路正交信号的幅度一致性难以保证;基于此,文中提出采用数字零中频方法进行目标信号的解调,一是减小模拟器件的影响,二是解决传统模拟解调方法中分辨率低,精度低,抗干扰性差的问题,实现高灵敏度,大动态范围的位移测量。

1 系统构成及基本原理

激光多普勒纳米位移遥测系统构成原理框图如图 1 所示。

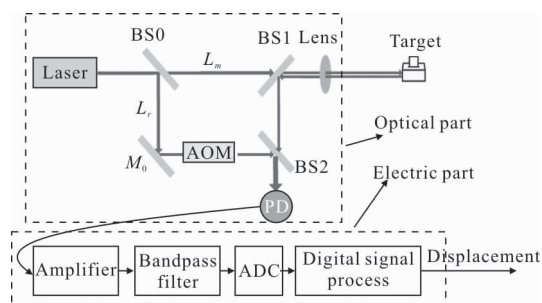


图 1 激光多普勒纳米位移遥测系统原理图

Fig.1 Schematic of laser Doppler nanometer displacement telemetry system

系统由光学模块和电学模块两部分构成,光学模块主要由激光器 Laser、分光棱镜 BS、反射镜 M_0 、声光频移器 AOM、光学镜头 Lens 和光电探测器 PD 组成,主要实现光的发射,移频,接收,干涉和光电转换功能;电学模块由模拟放大模块,滤波模块,数据采集模块和信号处理模块,主要实现模拟信号调理和数字解调;其工作原理如下:

激光器 Laser 产生一束相干光,分光棱镜 BS0 将其分为参考光 L_r 和信号光 L_m ,信号光 L_m 通过分光棱镜 BS1 后经过光学镜头 Lens 发射,打到被测物表面,被测面的振动位移引起反射光与入射光产生相位差 φ ;参考光 L_r 经过声光调制器 AOM 后,频移量为 f_0 ,频移后的参考光与反射信号光在分光棱镜 BS2 处发生干涉,干涉信号携带被测面的振动信

息,然后进入探测器 PD;探测器 PD 将干涉光信号转换为载波相位调制电信号,载波相位调制信号经过模拟调理后,数字信号处理模块进行解调得到物体振动位移。

2 解调算法的实现及试验验证

2.1 数字零中频解调算法理论分析

文中采用的信号解调处理流程如图 2 所示。

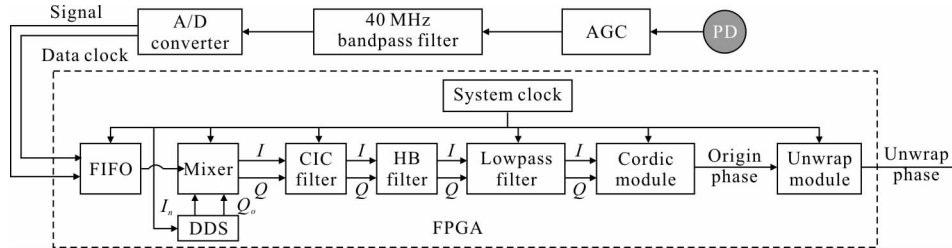


图 2 电学信号处理流程图

Fig.2 Flow chart of electric signal process

光电探测器 PD 输出信号的表达式为:

$$s(t)=A+B\cos[2\pi f_0 t+\varphi(t)] \quad (1)$$

式中: A 为信号直流分量; B 为交流部分信号幅度; f_0 为声光频移器的调制频率; $\varphi(t)$ 为目标相位信号;经过 AGC 自动增益放大模块后,直流消除,幅度得到放大,然后信号经过 40 MHz 带通滤波器后,带外噪声信号消除;目标信号带宽 BW 计算如下:

$$BW=2(f_d+f_{vib}) \quad (2)$$

式中: $f_d=2v/\lambda$ 为载波 f_0 多普勒频移; f_{vib} 为目标信号 $\varphi(t)$ 振动频率;则载波频率 f_0 至少等于 f_d+f_{vib} ,位移 d 和速度 v 关系:

$$d=v*t_{vib}=v/4f_{vib} \quad (3)$$

由公式(2)和(3)可得到:

$$f_0=f_{vib} * \left(1 + \frac{8d}{\lambda}\right) \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,当激光器波长 λ 一定时,位移 d 和振动频率 f_{vib} 的测量范围由载波频率 f_0 决定;理论上载波频率 f_0 越高,系统可探测的位移 d 和振动频率 f_{vib} 越大^[9]。

相位调制载波信号 $s(t)$ 经过增益放大和滤波处理后,A/D 转换器进行信号采集,将模拟信号离散化,设 A/D 转换器的采样率为 f_s ,其采样率 f_s 满足带通采样定理,取值:

$$f_0 \leq f_s \leq 2f_0 \quad (5)$$

采样后的数字信号为:

$$s(n)=A(n)\cos[2\pi f_c n+\varphi(n)] \quad (6)$$

f_c 为离散化后的信号频率,离散后的数字信号进入 FPGA 后,首先进入 FIFO,FIFO 缓冲模块将数

据传输和数据处理分开,而且实现了不同时钟源的过渡^[11];在 Mixer 混频单元将本振信号与离散化后的载波调制信号混频:

$$H(n)=s(n)e^{-j\omega_c n}=A(n)\cos[\omega_c n+\varphi(n)]\cos(\omega_c n)-jA(n)\sin[\omega_c n+\varphi(n)]\sin(\omega_c n)=I(n)-jQ(n) \quad (7)$$

其中,

$$I(n)=\frac{1}{2}A(n)\{\cos[2\omega_c n+\varphi(n)]+\cos[\varphi(n)]\} \quad (8)$$

$$Q(n)=\frac{1}{2}A(n)\{\sin[2\omega_c n+\varphi(n)]+\sin[\varphi(n)]\} \quad (9)$$

数字正交化减小了传统的模拟正交化方法引入的幅相误差,在数字信号截取过程中采用四舍五入法进一步减小了幅相误差和直流偏置误差,因此文中采用数字零中频方法有效地提高了解调精度和准确度;带通采样后数据速率较高,这对后续滤波器等模块的设计带来很大调制,因此混频后经过 CIC 滤波器和 HB 滤波器抽取处理,降低数据量,经过低通滤波器滤波后,消除混频中的高频成分,得到:

$$I(n)=\frac{1}{2}A(n)\cos[\varphi(n)] \quad (10)$$

$$Q(n)=\frac{1}{2}A(n)\sin[\varphi(n)] \quad (11)$$

$I(n)$ 和 $Q(n)$ 两路基带信号进入到 FPGA 内部进行相位解调,在 FPGA 内采用 Cordic 坐标旋转法完成对相位的计算,通过相位获得位移量^[12]。物体的振动位移与载波调制的相位有如下关系:

$$d=\frac{\varphi}{4\pi}\lambda \quad (12)$$

式中： d 为物体振动的位移； φ 为载波相位的变化； λ 为激光波长。

因此，通过正交解调算法，利用数字零中频就可以实现激光对振动位移的检测。

2.2 数字零中频解调算法验证

数字零中频算法采用 Verilog 语言在 FPGA Platform 开发平台实现。实验场景如图 3 所示。

如图 3 所示，算法验证采用信号发生器 (Tek4102A 射频信号发生器) 产生载波调相信号，载波频率 $f_0=40$ MHz，设 A/D 数据采集模块的时钟频率为 42.5 MHz，则离散后的数字信号频率为 2.5 MHz^[13]；在 FPGA 平台中经过混频，低通，滤波，相位解调和相位 unwrap 后，经过 D/A 数模转换器得到调制相位值 $\varphi(t)$ ，进一步根据公式(12)得到位移值。

实验过程中，调节相位调制频率的范围为 [10 Hz，

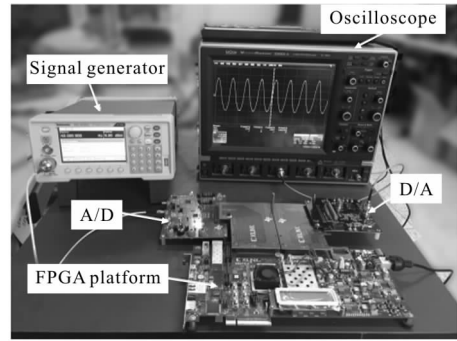


图 3 算法验证场景图

Fig.3 Scene graph of algorithm validation

1 kHz]，调制深度的范围为 $[1^\circ, 180^\circ]$ (对应调制位移的范围 [2.15 nm, 387.5 nm])；通过 Lecroy204MXi-A 示波器中获得的解调出的波形值，几个典型值如图 4 所示。

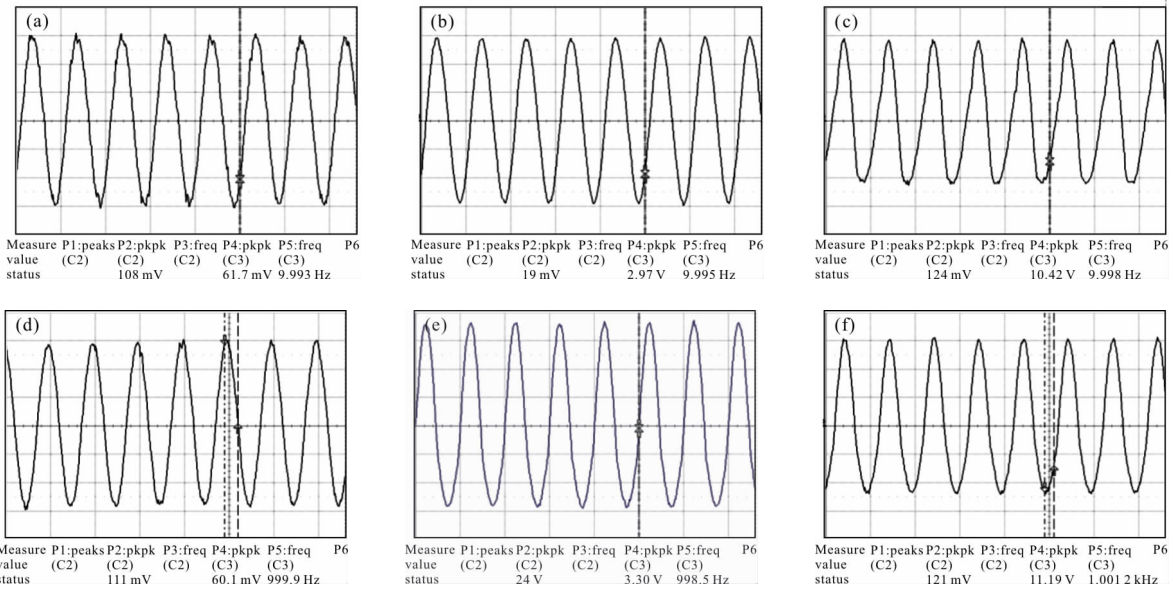


图 4 (a)~(c) 为调制频率 10 Hz，调制相位 $1^\circ, 50^\circ$ 和 180° 的解调波形；(d)~(f) 为调制频率 1 kHz，调制相位 $1^\circ, 50^\circ$ 和 180° 的解调波形

Fig.4 Oscilloscope of demodulated phases of $1^\circ, 50^\circ$ and 180° modulation with 10 Hz frequency modulation(a)~(c);

1 kHz frequency modulation(d)~(f)

算法经过定标，将图 4 (a)~(f) 解调得到的示波器电压值转换为相位值和位移值，调制参数，解调参数及误差如表 1 所示。

由表 1 可知，该算法在调制深度 $[1^\circ, 180^\circ]$ 范围内可以解调出信号，对应解调出的位移可以从纳米量级到百纳米量级；调制相位信号频率一定时，解调幅度误差目标信号随着调制幅度增大而

减小，调制相位信号幅度一定时，解调幅度误差随着目标信号调制频率增大而减小，在低频几个纳米的振动位移内，解调相对误差较大，最大误差 6%；在百纳米位移以上，解调相对误差较小。由于示波器量程和射频信号源调制深度有限，算法验证仅测试了调制深度 $[1^\circ, 180^\circ]$ 范围内的解调能力。

表 1 调制参数和解调参数

Tab.1 Modulated parameters and demodulated parameters

Modulation		Demodulation		
Phases /($^{\circ}$)	Frequency /Hz	Phases /($^{\circ}$)	Relative error	Displacement /nm
1	10	1.06	6.00%	2.28
50	10	50.60	1.20%	108.93
180	10	179.84	0.08%	387.15
1	1 000	1.04	4.00%	2.24
50	1 000	49.58	0.84%	106.73
180	1 000	180.12	0.07%	387.76

3 系统实验验证

解调算法在开发平台完成验证后,搭建集成光学收发一体镜头、干涉光路、电学解调模块、声光频移器、激光器和枪瞄镜于一体的激光多普勒纳米位移遥测系统,该系统具有体积小,便携的特点,辅助光学枪瞄装置有助于快速定位,系统硬件组成如图 5 所示。

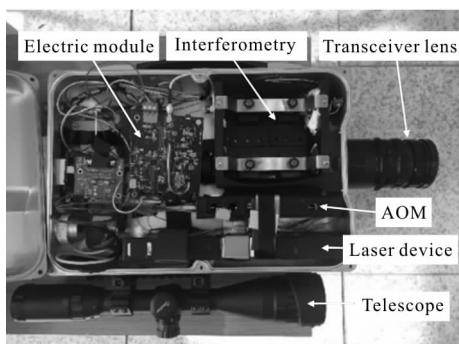


图 5 激光多普勒纳米位移遥测系统内部构成

Fig.5 Internal composition of laser Doppler nanometer displacement telemetry system

文中采用 PI-E501 标准振动源对激光多普勒纳米位移遥测系统进行性能验证实验。实验场景如图 6 所示,系统距离标准振动源 10 m,发射出的光垂直打在标准振动源 PI-E501 起振单元上,经过标准振动源调制的回波信号经过激光多普勒纳米位移遥测系统 LDNDTS 接收解调后,可以恢复出标准振动源的位移信号,在软件 Display Software 中显示。

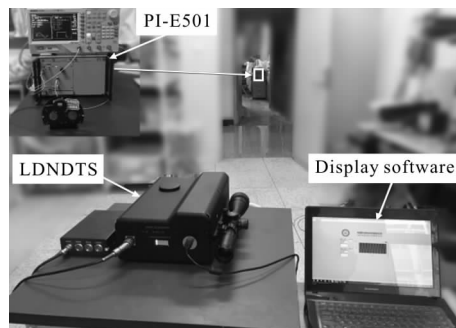


图 6 激光多普勒纳米位移遥测系统性能验证方案

Fig.6 Performance test scheme of laser Doppler nanometer displacement telemetry system(LDNDTS)

实验时,通过选取 PI-E501 标准振动源的电压值,设置振动参数的位移范围为[10 nm 1 000 nm],频率范围为[10 Hz 1 kHz],将文中研制系统解调位移曲线与 PI-E501 输出位移曲线对比。选取几个典型值,如图 7 和图 8 所示。

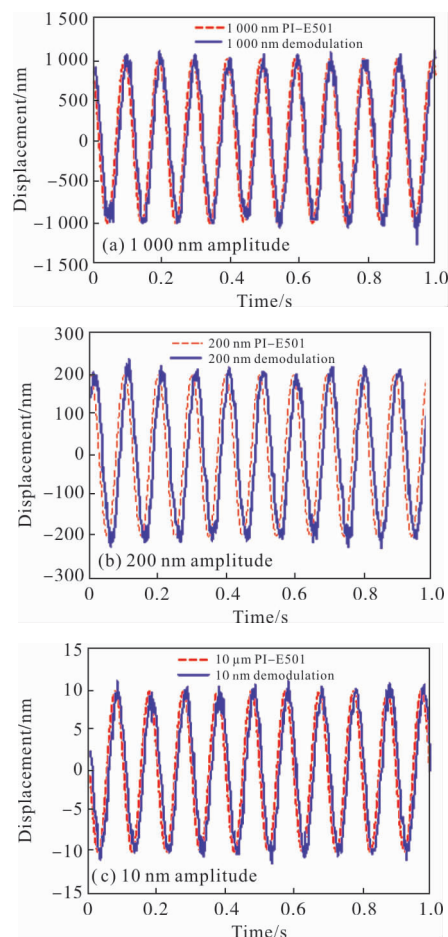


图 7 PI-E501 输出 10 Hz 时的位移和文中系统解调位移

Fig.7 Displacements at 10 Hz of PI-E501 and demodulated displacements

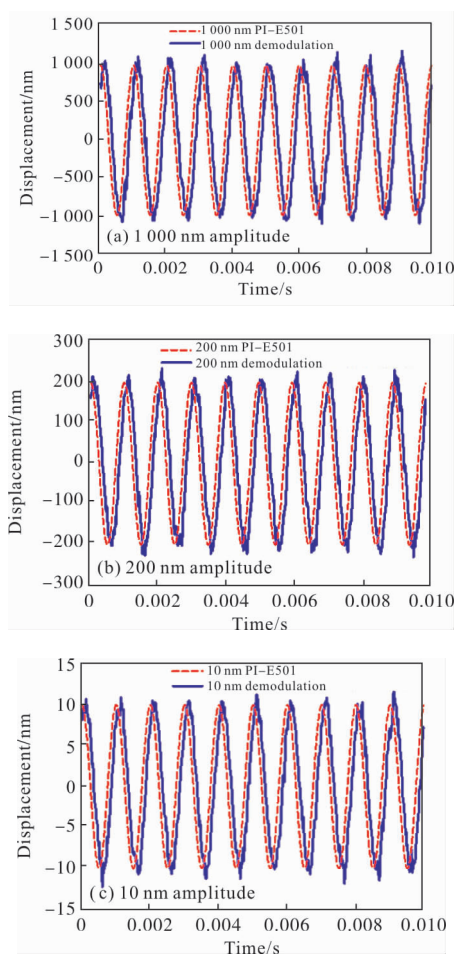


图 8 PI-E501 输出 1 000 Hz 频率时的位移和文中系统解调位移

Fig.8 Displacements at 1 000 Hz of PI-E501 and demodulated displacements

图 7 为 PI-E501 标准振动源输出频率 10 Hz 时,不同幅度下的位移和文中系统获得的位移,其中红色曲线为 PI-E501 输出位移,幅度分别为 1 000、200、10 nm,蓝色波形为文中系统解调出的位移信号,其幅值分别为 1 000、200、10 nm,从图中可以看出,文中系统解调波形和 PI-E501 输出波形基本重合,说明解调准确;图 8 为 PI-E501 标准振动源输出振动频率 1 000 Hz 时的位移和该论文系统获得的位移信号,红色波形曲线为 PI-E501 输出位移,幅度分别为 1 000、200、10 nm,蓝色波形为文中系统获得的位移信号,其幅值分别为 1 000、200、10 nm;从实验结果可以看出,被测位移参数在不同幅度不同频率时,文中研制系统的解调波形和 PI-E501 输出波形基本重合,证明文中研制系统的解调性能良好;通过以上测试分析表明:该论文研制激光多普勒

纳米位移遥测系统可以解调位移范围在纳米到微米量级,频率范围在 10 Hz~1 kHz 的振动信号,能够满足航空航天领域对超静平台测量的要求。

4 结 论

文中重点研制了基于数字零中频纳米位移解调的电学解调模块,实现了最小位移为 2.15 nm 的信号解调,同时针对航天航空领域对位移测量的要求(位移一般在微米量级甚至更小,频带宽一般为几赫兹到几百赫兹),采用标准振动源作为参考,实现了频率范围内微米级及以下振动幅度准确测量,为进一步实现在线超静平台遥测系统的研究奠定了理论与试验基础。

参 考 文 献:

[1] Zhao Wei. The development of microvibration environment analysis and measurement technology of spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(4): 210-214. (in Chinese)

[2] Li Ning, Han Xiaojian, Li Junhui. The ground test method of the spacecraft microvibration signal [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(1): 67-71. (in Chinese)

[3] Ban T, Brock A. Space system component design validation using scanning laser vibrometry [R]. German: Polytec GmbH, 2012.

[4] Wu Peng, Qin Shuijie. Study of solid-state microchip laser feedback technology in remote vibration measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0206005. (in Chinese)

[5] Yan Chunhui, Wang Tingfeng, Zhang Heyong, et al. Arctangent compensation algorithm of laser speech detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0906004. (in Chinese)

[6] Liu Jian, Feng Guoying, Gu Xiaobin, et al. Study on the development and experiment of acoustic optical heterodyne vibration measurement system [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(8): 883-888. (in Chinese)

[7] Hao Huawei, Zhang Zhiwei. Optical heterodyne interferes with the demodulation of ultrasonic vibration signal [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014 (10): 224-226. (in Chinese)

- [8] Lv Tao, Zhang Heyong, Guo Jin, et al. Acquisition and enhancement of remote voice based on laser coherent method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 569–575. (in Chinese)
- [9] Bauer M, Ritter F, Siegmund G. High-precision laser vibrometers based on digital Doppler-signal processing [C]//SPIE, 2002, 4827: 50–62.
- [10] Rzasa J R, Cho K, Davis C C. Long-range vibration detection system using heterodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6230–6236.
- [11] Matt Guibord. Texas instruments interfacing Altera FPGAs to ADS4249 and DAC3482 [R]. American: TI Incorporated, 2012.
- [12] Triveni C, Sudhakara R P, Ieee M. Implementation of phase shifter using CORDIC on FPGA for RADAR application [J]. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, 2016, 45(6): 1655–1659.
- [13] Rives M. Intermediate frequency (IF) sampling receiver concepts[R]. American: TI Incorporated, 2011.