

合成孔径激光雷达振动相位误差的模拟探测

徐显文 洪光烈* 凌元 胡以华 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电系统技术实验室, 上海 200083)

摘要 为了探测合成孔径激光雷达的平台振动引起的相位误差,采用一种新的振动测量方法,利用激光外差平衡探测和正交信号处理技术,直接提取探测信号相位,并对正交信号之间的不平衡度引起的误差进行了校正,得到系统探测相位灵敏度为 1.45 rad。实验表明,该方法不但能够精确测量低频率微小振动位移引起的相位变化,而且对回波信号的幅度波动不敏感,有别于激光多普勒振动计。

关键词 合成孔径激光雷达;振动相位误差;平衡探测;相位提取

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0512001

Simulative Detection of Vibration-Phase Error of Synthetic Aperture Lidar

Xu Xianwen Hong Guanglie Ling Yuan Hu Yihua Shu Rong

(Space Active Electro-Optical Systems Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract In order to detect the phase error caused by platform vibration of synthetic aperture lidar, a new method of vibration measurement was proposed, which extracted the detection signal phase directly with heterodyne balanced detection and quadrature signal processing technology. Then the errors caused by the unbalance between the two quadrature signals were corrected and the obtained phase sensitivity was 1.45 rad. The experiment showed that this method not only can accurately measure phase variation caused by small vibration with low frequency, but also was insensitive to the amplitude of echo signals' fluctuation, which was different from the laser Doppler vibrometer.

Key words synthetic aperture lidar; vibration-phase error; balanced detection; phase extraction

OCIS codes 120.5050; 280.3640; 060.2840

1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是利用孔径(望远镜)与目标作相对运动并采用信号处理方法来模拟孔径阵列获得高分辨率的相干成像雷达。相对于红外被动探测系统,它具有三维成像的潜力;相对于微波合成孔径雷达,它的成像更适合于人眼的视觉习惯,是唯一可能实现厘米分辨率的遥感仪器^[1,2]。

合成孔径雷达的孔径阵列的阵元并不是实际存在的,而是将望远镜安装在飞行平台上,通过望远镜

相对于目标的移动来获得。平台飞行到不同位置时将携带相位信息的回波信号记录下来,等记录到足够数目阵元的相位信号后,即飞行一个合成孔径长度,再进行相位补偿和自聚焦处理^[3]。

平台振动引起的相位误差,往往使孔径合成变得难以实现。对于微波合成孔径雷达,波长是厘米级,振动带来的影响不大;而对于激光合成孔径雷达,波长是微米级,振动会带来很大的相位误差,必须加以测量和校正^[1,4]。

收稿日期: 2010-10-28; 收到修改稿日期: 2011-01-05

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)资助课题。

作者简介: 徐显文(1986—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光雷达及信号处理等方面的研究。

E-mail: xuxianwen3@163.com

导师简介: 胡以华(1962—),男,研究员,博士生导师,主要研究空间信息处理方面的研究。E-mail: yh_Hu@263.net

* 通信联系人。E-mail: guanglieh@yahoo.com.cn

目前,大部分文献报道的振动测量系统实际上是激光多普勒振动计^[5~7],主要利用对速度变化进行积分得出位移,即直接测量的是频率变化,相位则通过频率对时间的积分间接得到。然而这种方法对于低频率振动的敏感度几乎趋于零,大大限制了在低频情况下获取精确的绝对相移误差的能力。对于空间载荷平台,高频振动可以通过平台自身措施(如在星上直接安装振动隔离系统)加以解决,剩下难以解决的正是低频振动^[8]。为此,本文发展了一种平

衡的、正交相位的激光振动测量系统,并致力于对光学相位的直接测量。

2 振动测量系统原理

2.1 平台振动对孔径合成相位的影响

如图1所示,雷达正侧视工作, v 为理想飞行速度, $\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)$ 分别为平台 x, y, z 方向的运动误差分量。实际雷达天线相位中心到点目标的斜距可表示为

$$R(t) = \sqrt{[vt + \Delta x(t) - x_n]^2 + [\Delta y(t) - y_n]^2 + [\Delta z(t) - z_n]^2} \quad (1)$$

由于激光波束很窄,上式可以简化为

$$R(t) \approx \sqrt{[vt + \Delta x(t) - x_n]^2 + R_0^2 - \Delta y(t) \sin \beta - \Delta z(t) \cos \beta} \quad (2)$$

式中 R_0 为 P 到航线的最短斜距, β 为侧视角。结合图1和(2)式可以看出,第一项反映的是沿航向的运动误差,而后面两项是视线方向的误差,记为

$$r_{\text{los}}(t) = \Delta y(t) \sin \beta + \Delta z(t) \cos \beta \quad (3)$$

由此引起的相位误差

$$\theta(t) = \frac{4\pi}{\lambda} r_{\text{los}}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta y(t) \sin \beta + \Delta z(t) \cos \beta] \quad (4)$$

式中 $\theta(t)$ 为振动引起的相位误差, λ 为激光波长。因此,为了补偿SAL平台的非标准运动,连续和绝对地探测光学相位,采用一种新的相位直接测量方法,能够精确得到低频率小位移振动引起的相位变化,并且对回波信号的幅度波动不敏感。

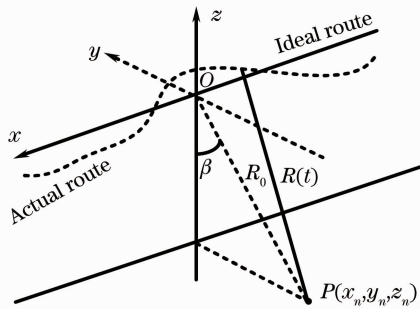


图1 存在运动误差的合成孔径激光雷达平台
Fig.1 Synthetic aperture lidar platform with motion error

2.2 平衡外差探测原理

外差相干探测采用单台激光器作为频率基准,一部分光信号经声光移频器(AOM)移频后作为本振光,另外一部分经望远镜发射作为探测光。探测光经目标反射后作为回波信号与本振光在探测器上

进行相干,测量两者相干所得到的中频信号,从而完成外差相干探测。

本振与回波信号的电场分量分别为

$$E_{\text{loc}} = A_{\text{loc}} \cos \omega_{\text{loc}} t, \quad (5)$$

$$E_{\text{in}} = A_{\text{in}} \cos(\omega_{\text{in}} t + \theta). \quad (6)$$

且 $\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{loc}} = 2\pi f_{\text{IF}}$, θ 为光信号在传播过程中产生的相移。

两信号经探测器后,探测器输出电流为

$$I = R \overline{(E_{\text{in}} + E_{\text{loc}})^2} = R \{ P_{\text{in}} + P_{\text{loc}} + 2 \sqrt{P_{\text{in}} P_{\text{loc}}} \cos \gamma \times \cos[(\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{loc}})t + \theta] \}. \quad (7)$$

式中 $P_{\text{in}}, P_{\text{loc}}$ 分别表示回波信号和本振信号功率, $\cos \gamma$ 由光信号相干度及光束匹配程度决定^[9,10]。

由于外差探测需要功率较大的本振光,因此本征信号产生的散粒噪声和相对强度噪声就成为相干探测的主要噪声源。为了减小这两种噪声对系统的影响,引入了平衡探测^[11]。

平衡探测光路如图2所示,由50/50保偏光纤耦合器和平衡探测器组成。对于50/50耦合器,其输入与输出光信号复振幅的关系为

$$\begin{pmatrix} E_{\text{out1}} \\ E_{\text{out2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\theta) \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{loc}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

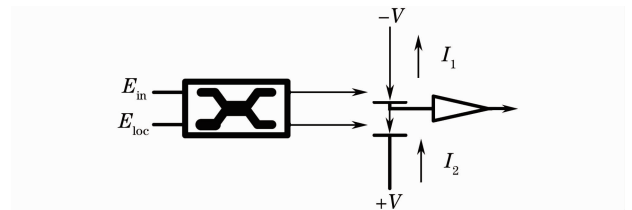


图2 平衡探测示意图

Fig.2 Sketch of balanced detection

式中 $E_{\text{out1}}, E_{\text{out2}}$ 分别输入平衡探测器的一只光电二极管(PIN管)后产生的电流分别为

$$I_1 = \frac{1}{2} \alpha (P_{in} + P_{loc} + 2\sqrt{P_{in}P_{loc}} \times \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \theta]), \quad (9)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \alpha (P_{in} + P_{loc} - 2\sqrt{P_{in}P_{loc}} \times \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \theta]), \quad (10)$$

式中 α 表示光电二极管的响应率, K 为平衡探测器的跨阻增益, 两只 PIN 管的电流之差经跨阻放大器转化为电压信号, 平衡探测器输出的电压为

$$V_{out} = 2K\alpha\sqrt{P_{in}P_{loc}} \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \theta]. \quad (11)$$

平衡外差探测中, 平衡探测器总输出是两只 PIN 管光电流之差, 其相同的噪声互减, 消除了由高入射光信号功率引起的相对强度噪声。同时还可以相同的互减方式消除伴生的直接探测信号, 避免其在频域上与相干探测信号混迭。本征信号与回波信号之间的固定频差, 使得两者混频后得到交流的中频信号, 减小了低频噪声对系统的影响。另外, 本征信号的引入也大大提高了系统的探测灵敏度^[12,13]。

2.3 相位提取

如图 3 所示, 设探测器输出信号为

$$A \cos(\omega_{IF}t + \theta),$$

经正交混频且滤除高频分量后得到两正交信号 $A \cos \theta$ 和 $A \sin \theta$, 令

$$S_1 = A \sin \theta, S_2 = A \cos \theta,$$

幅度可表示为

$$A = \sqrt{S_1^2 + S_2^2},$$

相位可以由公式

$$\exp(i\theta) = \cos \theta + i \sin \theta = \frac{S_2 + iS_1}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \text{ 给出。}$$

对应的物理位移为 $d = \frac{\theta \lambda}{4\pi}$ ^[14]。

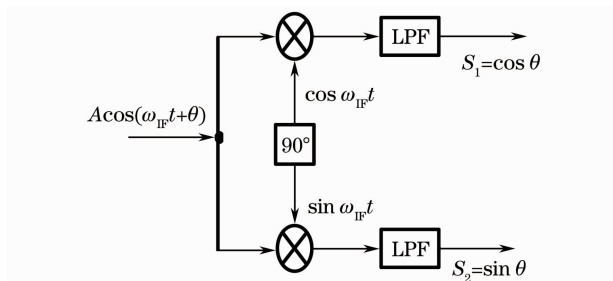


图 3 相位提取框图

Fig. 3 Block diagram of phase extraction

当利用 Matlab 的 angle 函数进行相位计算时, angle 函数的值域为 $[-\pi, +\pi]$, 存在 $\pm\pi$ 的相位模糊, 因此必须对相位进行解混响^[15]。信号相位的解

混响 (unwrapping) 是通过相位主值序列的适当处理来实现的。即先判决相位主值序列的不连续点, 比较不连续点处相邻两个点的相位值, 如果差值小于 $-\pi$, 则后一点的相位应该加上 2π ; 如果差值大于 π , 则后一点的相位应该减 2π 。设信号相位主值为 $\theta_0(m)$, 无混响相位为 $\theta(m)$, 则 $\theta(m) = \theta_0(m) + 2\pi l(m)$ [$l(m)$ 为整数], 相位主值序列的一阶差分为 $\theta'_0(m)$ 。具体的信号相位解混响算法为

1) $0 \leq m \leq N-1$, 循环从 $m=0$ 开始;

2) 若 $\theta'_0(m_k) \geq \sigma, \sigma > 0$ 为相位差分峰值判决门限。则: $l(m) = l(m) - 1, m_k + 1 \leq m \leq N-1$;

3) $\theta'_0(m_k) \leq -\sigma$, 则: $l(m) = l(m) + 1, m_k + 1 \leq m \leq N-1$;

4) 循环直至 $m = N-1$, 得到序列 $l(m)$, 然后根据公式 $\theta(m) = \theta_0(m) + 2\pi l(m)$ 得出无混响相位。

利用上述算法进行仿真, 令

$$S_1 = \sin\{2\pi[1 \times 10^5 + 2\sin(2\pi \times 250t)]\},$$

$$S_2 = \cos\{2\pi[1 \times 10^5 + 2\sin(2\pi \times 250t)]\}.$$

(12)

取 $\sigma = \pi$, 得出 S_1, S_2 的混响和解混响相位信号如图 4 所示。由此看出, 此算法能够较好地解决相位的混响问题。

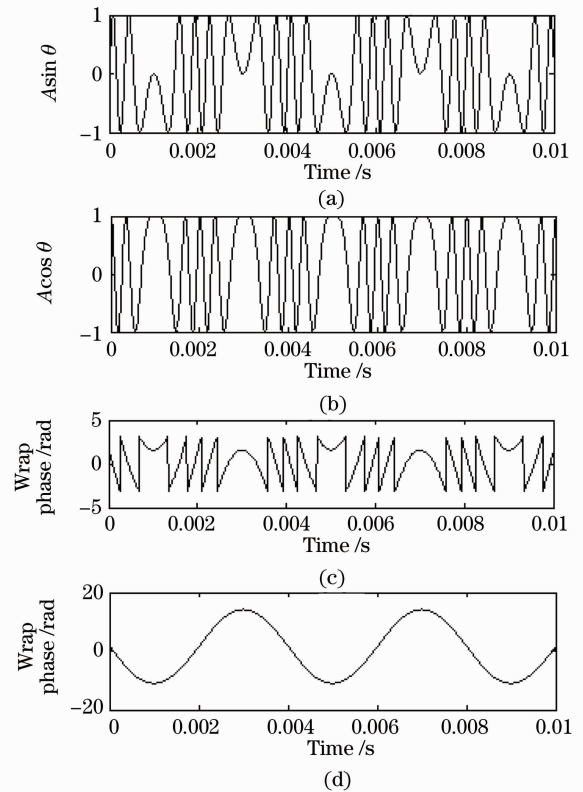


图 4 相位的混响与解混响仿真

Fig. 4 Simulation of wrap and unwrap phase

3 振动测量系统实验

相干输出信号中的 $\cos \gamma$ 项表示相干度, 与两光信号的偏振方向, 线宽以及波前匹配程度有关。线宽越窄, 偏振方向相差越小, $\cos \gamma$ 的值越大, 也就是两光信号的相干度越好。此外, 在自由空间进行本振光与回波光混合时, 要求信号光与本振光空间波前匹配, 即要求空间调准(准直、共轴), 波面吻合垂直入射于光混频表面。光束入射夹角应不大于 $\lambda_0/\pi l$ (λ_0 为本振光波长, l 为光电探测器光敏面尺寸)。实现这些条件需要设计复杂的光学耦合系统, 包括收发光的合路和隔离、回波信号与本振激光信号的光学混频等。如用几何光学系统完成, 将是一个非常困难的任务, 而利用保偏光纤和保偏光纤耦合器实现的光纤光路则较好的解决了这个问题^[14]。

将光束限制在光纤中传输, 容易达到较好的匹配, 实现高的相干效率。如图 5 所示, 激光经耦合器后分为两部分: 一部分作为探测光经偏振分束器 (PBS) 和 $\lambda/4$ 波片照射到目标上 (喇叭); 另一部分经 AOM 移频后作为本征光与目标的反射光在平衡相干光路中混合, 经平衡探测器后得到中频信号。中频信号经射频 (RF) 处理后得到正交的两路信号 S_1 和 S_2 。

实验系统中选用的激光源为丹麦 NKT 公司的 AdjustiK™ 系列分布反馈式光纤激光器 E15, 中心波长为 1572 nm, 线宽小于 1 kHz, AOM 为 BRIMOSE 公司 80 MHz 声光移频器。A/D 的采样精度为 12 bit, 对应的相位精度为 1.53 mrad (0.2 nm)。

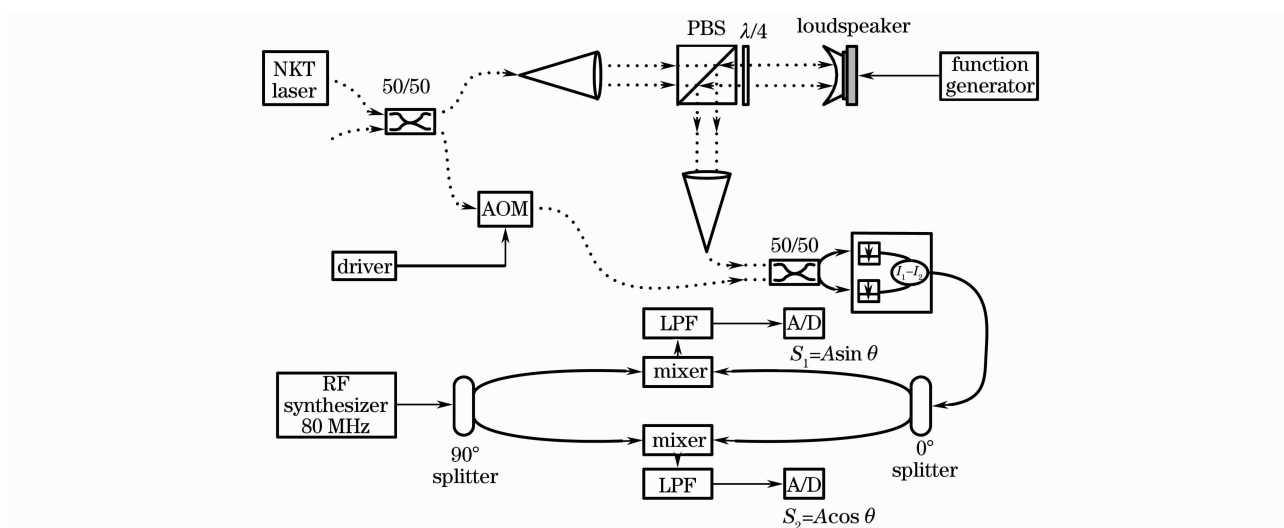


图 5 系统框图

Fig. 5 Structure of system

4 实验结果

实验系统中采用扬声器鼓纸的振动来模拟合成孔径激光雷达距离向的振动。扬声器的额定功率为 2 W, 直流电阻为 8 Ω 。当扬声器中的线圈通电时, 其线圈就会产生磁场并在磁场力的作用下来回振动, 从而带动鼓纸的振动。当扬声器输入 $V_{pp} = 1$ V, $f = 100$ Hz 的正弦信号时, 测得的信号 S_1, S_2 及其幅度如图 6(a) 所示, 其相位主值及解混响信号如图 6(b) 所示。

在相位提取的过程中, 由于两个通道之间的不平衡度, 不可避免地存在一定的误差 (如图 7 所示)。这种误差主要包含直流偏置误差、幅度误差和相位误差, 必须加以校正。令两通道存在误差时的信号为

$$S_1 = A \sin \theta + d_1, \tag{13}$$

$$S_2 = AK \cos(\theta + \Delta\theta) + d_2.$$

运用一种基于统计平均的误差校正方法对其进行校正^[16], 得到 $d_1 = -1.655 \times 10^{-5}$ V, $d_2 = 3.156 \times 10^{-4}$ V, $K = 0.8549$, 引起的相位误差 $\Delta\theta$ 如图 7 所示。主信号和镜像信号之比

$$R(\text{dB}) = 10 \cdot \lg \frac{1 - 2K \cos \Delta\theta + K^2}{1 + 2K \cos \Delta\theta + K^2} \tag{14}$$

R 的范围为 $-51 \sim -40.65$ dB。主信号与零频分量之比

$$D(\text{dB}) = 10 \cdot \lg \frac{d_1^2 + d_2^2}{A^2 [1 + 2K \cos \Delta\theta + K^2]} \approx -72 \text{ dB} \tag{15}$$

去除直流偏置分量、幅度误差和相位误差后, 振动信

号曲线如图 8 所示。

实验中由于 AOM 的驱动源和 RF 信号处理的射频信号合成器非同一个信号源,两者之间存在一微弱频差 $\Delta\omega$,对应的相位误差为 $\Delta\omega \cdot t$,且为一线

性分量。经图 8(b)的解混响相位可以得 $\Delta\omega$ 为 2000 rad/s。移除此线性分量,其相位曲线如图 9 所示。可以看出,测得的相位大约在 60 rad 以内,对应的物理位移小于 $7.5 \mu\text{m}$ 。

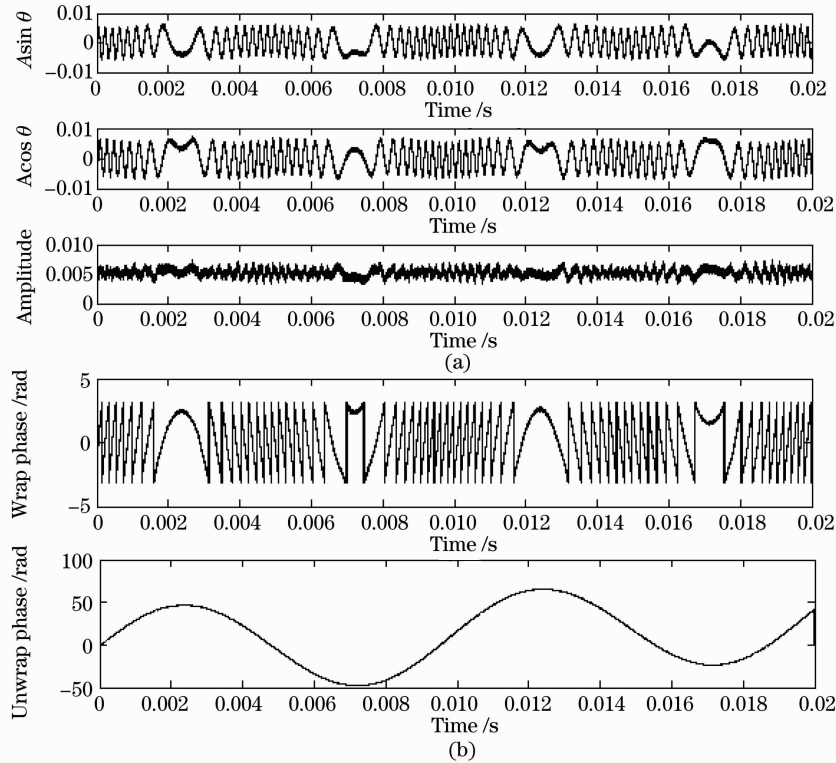


图 6 当 $V_{pp}=1 \text{ V}$, $f=100 \text{ Hz}$ 时校正前的实验结果。(a) S_1, S_2 及其幅度信号, (b) 相位主值及解混响相位

Fig. 6 When $V_{pp}=1 \text{ V}$, $f=100 \text{ Hz}$, the experiment results before correction. (a) two signals S_1, S_2 and their amplitude, (b) wrap and unwrap phase

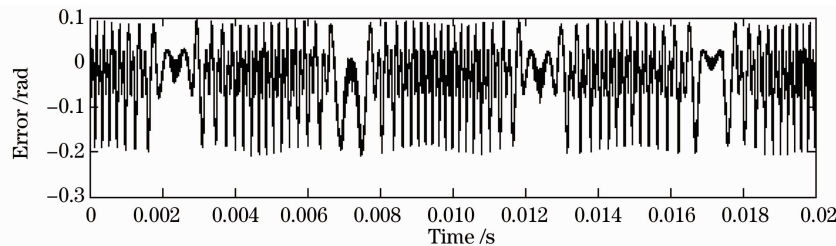


图 7 由两通道的不平衡度引起的误差

Fig. 7 Error cause by the unbalance between two channels

移除喇叭的激励源,得到系统输出信号相位如图 10 所示。等效相位噪声为 1.45 rad(均方根值),即系统的探测灵敏度为 1.45 rad。另外此次实验是在普通的实验室进行的,系统中声学振动的耦合,使得环境噪音对系统的探测灵敏度有较大影响。因此,环境噪音的隔离将会有效地提高系统的探测灵敏度。

5 结 论

发展了一种平衡的、正交相位的、激光振动测量系统,有效地模拟了平台在距离向的低频率微小振动,精确测量出振动引起的相位误差。在接下来的工作中,将联合 SAL 系统和振动测量系统,对振动引起的相位误差进行补偿,从而得到良好的聚焦图像。另外,为了进一步提高探测的动态范围,还可以采用四个通道——两个交流通道和两个直流通道。

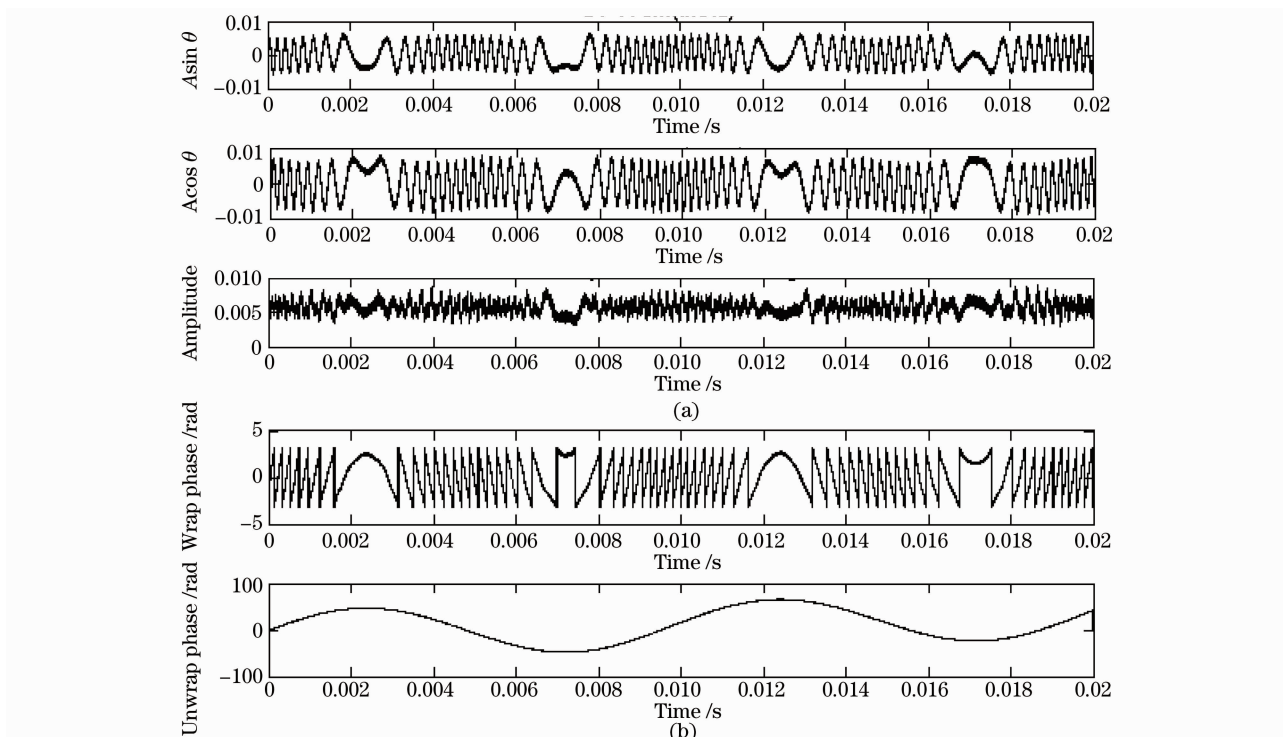


图 8 当 $V_{pp}=1\text{ V}$, $f=100\text{ Hz}$ 时校正后的实验结果。(a)校正后的 S_1, S_2 及其幅度信号, (b)校正后的相位主值及解混响相位

Fig. 8 When $V_{pp}=1\text{ V}$, $f=100\text{ Hz}$, the experiment results after correction. (a) two signals S_1, S_2 and their amplitude, (b) the wrap and unwrap phase

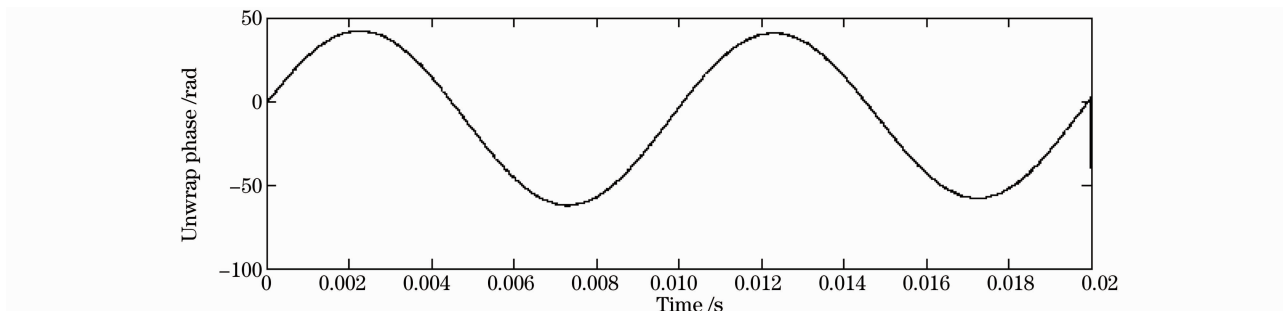


图 9 移除线性误差的相位曲线

Fig. 9 Phase removed the linear error

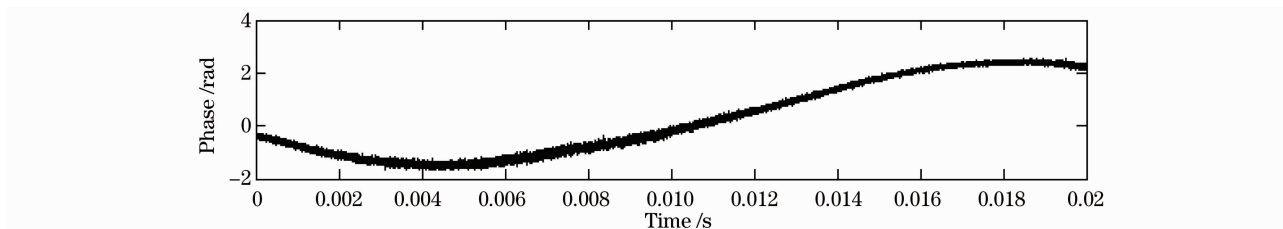


图 10 无振动时的输出信号相位

Fig. 10 Output signal's phase with no vibration

参 考 文 献

1 Robert L. Lucke, Lee J. Rickard. Synthetic aperture ladar (SAL): fundam-ental theory, design equations for a sate-llite system and laboratory demonstration [C]. Naval Research Laboratory Report, 2002, NRL/FR/7218-02-10.051

2 Liu Liren. Synthetic aperture imaging ladar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Opta Sinica*, 2009, 29(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 1~6

- 3 Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua *et al.*. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **3**(6): 229~234
洪光烈, 王建宇, 孟昭华等. Chirp强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **3**(6): 229~234
- 4 Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo *et al.*. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 994~1001
李增局, 吴 谨, 刘国国等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 994~1001
- 5 K. M. Abramski, P. R. Kaczmarek, T. J. Rogowski *et al.*. Heterodyne laser vibrometry[C]. *SPIE*, 2000, **4072**: 37~41
- 6 Macthu Acharekar, Philip Gatt, Lawrence Mizerka. Laser vibration sensor[C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 2~11
- 7 Ingmar Renhorn, Christer Karisson, Dietmar Letalick. Coherent laser radar for vibrometry: robust design and adaptive signal processing[C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 23~30
- 8 Ma Jing, Han Qiqi, Yu Siyuan *et al.*. The effort of vibration on intersatellite optical communication and the resolving[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 228~232
马 晶, 韩琦琦, 于思源等到. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 228~232
- 9 Nan Jingda, Pi Mingjia, Fan Liming. Sensitivity study of the CO₂ laser heterodyne detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(8): 714~720
南京达, 皮名嘉, 樊立明等. CO₂激光外差探测系统灵敏度的研究[J]. *光学学报*, 1990, **10**(8): 714~720
- 10 Wang Chunhui, Wang Qi, Zhao Shuming. Polarization matching on plused CO₂ laser heterodyne signal[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(2): 80~82
王春晖, 王 骐, 赵树民. CO₂激光脉冲外差信号偏振匹配研究[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(2): 80~82
- 11 Christopher Allen, Yanki Cobanoglu, Skeen Kenny Chong *et al.*. Development of a 1310 nm, coherent laser radar with RF pulse compression[C]. Proc. the 2000 Internat Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGAR SS '00), Honolulu, Hawaii: 1784~1786
- 12 Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua *et al.*. Research on chirped amplitude modulation coherent Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2446~2450
孟昭华, 洪光烈, 胡以华等. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2446~2450
- 13 Li Lei, Zhao Changming, Gao Lan. Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 249~252
李 磊, 赵长明, 高 岚等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 249~252
- 14 W. Buell, N. Marechal, J. Buck *et al.*. Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 152~166
- 15 Herbert B. Voelcker. Toward a unified theory of modulation part 1: phase-envelope relationships[C]. Proc. IEEE, 1966, **53**(3): 340~352
- 16 Yuan Junquan, Zhou Yaqiang, Huang Fukan. New method for correction of quadrature demodulation errors based on statistic average[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, **27**(7): 1119~1121
袁俊泉, 周亚强, 皇甫堪. 基于统计平均的正交解调误差校正新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, **27**(7): 1119~1121