

# 相干激光微多普勒雷达的干扰抑制研究

李跃新<sup>1,2</sup>, 孙建锋<sup>1\*</sup>, 周煜<sup>1\*\*</sup>, 卢智勇<sup>1</sup>, 蔡新雨<sup>1,2</sup>, 丛海胜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 目标微多普勒特征可作为目标识别的依据,其探测往往受到激光雷达自身在激光束方向上振动的影响,并且测量结果受到本地振动的影响。提出了一种利用目标自身参考点来抑制本地干扰的方法,分析了目标待测位置和参考位置的回波与本地振动信号的拍频信号,并进行补偿处理,从而达到抑制本地振动、目标相对运动干扰的目的。实验结果表明,所提方法对本地振动和目标相对运动干扰的抑制具有显著的效果,相对补偿精度小于 5%,补偿后得到的微多普勒特征能较好地反映目标真实的微振动形式。

**关键词** 遥感; 干扰抑制; 微多普勒效应; 振动目标; 补偿

中图分类号 TN958.95

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1010001

## Interference Suppression of Coherent Laser Micro Doppler Radar

Li Yuexin<sup>1,2</sup>, Sun Jianfeng<sup>1\*</sup>, Zhou Yu<sup>1\*\*</sup>, Lu Zhiyong<sup>1</sup>, Cai Xinyu<sup>1,2</sup>, Cong Haisheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The micro Doppler features of a target can be used as the basis of target recognition. The detection of micro Doppler features is often affected by the vibration of lidar itself in the direction of laser beam, and it is difficult to eliminate the influence of local vibration on the measurement results. In this paper, a method of using the reference point of the target itself to suppress local interference is proposed. The local vibration and relative motion interference can be suppressed by analyzing the beat frequency signal between echo signals from the target position and reference position and the local vibration signal and by the compensation process. Experimental results show that the proposed method has a significant effect on the suppression of local vibration and target relative motion interference, and the relative compensation accuracy is less than 5%. The micro Doppler characteristics obtained after compensation can better reflect the real micro vibration of the target.

**Key words** remote sensing; interference suppression; micro Doppler effect; vibration target; compensation

**OCIS codes** 280.3640; 280.7250; 280.3340

## 1 引 言

微多普勒特征探测广泛应用在目标识别、振动监测等领域。微多普勒特征主要由目标微动引入<sup>[1]</sup>,目标除了质心的平动以外,往往还存在部分位置的微动,这种微动会使回波的频谱发生展宽。Farquharson 等<sup>[2-3]</sup>利用微波雷达探测目标的运动情况,该方法具有非接触、抗雨雾粉尘等优势,然而

微波雷达的探测分辨率不如激光雷达。激光雷达相对于微波雷达有更短的波长,其速度分辨率和距离分辨率更高,在微多普勒特征的探测中被广泛使用<sup>[4]</sup>。Chen 和 Lipps<sup>[5-6]</sup>利用单频激光信号探测振动和转动目标的微多普勒特征,发现激光发射信号的频率与目标微动速度共同决定了目标微多普勒的形式。然而,目标微多普勒特征的探测受到光束方向上雷达本地振动和目标相对运动的影响<sup>[7]</sup>,这些

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605226)

\* E-mail: sunjianfengs@163.com; \*\* E-mail: sunny@mail.siom.ac.cn

影响因素引入的信号与待测信号的分离较难实现。

国外研究者 Jiang 等<sup>[8-9]</sup>采用在雷达本地安装加速度传感器的方法抑制干扰,从而实现对本地图号的采集,消除雷达自身平台运动对测量的影响。加速度传感器的灵敏度比激光器低,无法检测到极小的振动,因此不能完全消除雷达本地运动的影响;此外,加速度传感器也无法检测到目标的相对运动,从而使目标的相对运动对微多普勒特征的检测造成干扰。Yu 等<sup>[10-11]</sup>采用三阶循环累积检测方法在目标随机运动干扰的情况下,从接收的雷达信号中提取到了高精度的生命体征,但该方法无法消除雷达自身运动的干扰。Revel 等<sup>[12-13]</sup>利用激光雷达探测一个固定参考物,以此得到处于振动平台上的激光雷达的本地振动状态,但该方法中用于探测参考物和目标物的光束不共路,激光出射方向存在的夹角使得利用参考光束只检测到本地振动在光束方向上的速度信息,无法完全消除本地振动干扰。

本文所述的本地振动干扰抑制系统利用目标自身参考点的数据进行补偿,从而得到待测目标点的运动特征。目标自身参考点可定义为相对于待测目标点存在的微动部分,且同一目标上总存在相对静

止的部分;参考点不存在多普勒频谱展宽现象,即其多普勒特征在频谱上不出现新的边频或旁瓣。在自发自收共光路系统中对目标的回波信号和本振信号进行探测。通过将三角线性调频连续波激光雷达按每个调制重复频率周期进行时间分层,对每一个时间层里的上升沿和下降沿的拍频信号进行处理,可获得同一目标上不同位置的距离和速度信息,进而通过补偿达到抑制本地振动干扰的目的。

## 2 干扰抑制基本原理

由目标和雷达在径向距离上的相对运动引起的多普勒效应,其本质是距离变化对信号的相位进行调制<sup>[14]</sup>。干扰抑制系统组成如图 1 所示,激光器输出的激光经光纤分束器后,一路经端口 1 进入光纤环形器,端口 2 输出的信号光经准直镜和自由空间路径发射到待测目标表面,反射回的信号光经同一准直镜后耦合到光纤中,信号光进入端口 2 并从端口 3 出射,与光纤分束器的另一路本振光在光纤耦合器中耦合,发生混频后的信号被平衡探测器探测接收,通过对接收信号进行数据采集和数据处理可得到待测目标的微多普勒信息。

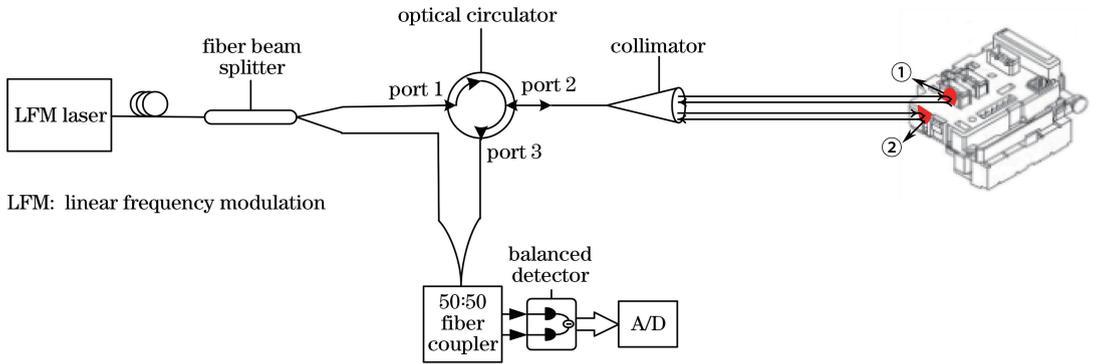


图 1 干扰抑制系统结构

Fig. 1 Structure of interference suppression system

微多普勒距离分辨主要基于激光雷达线性调频相干测距原理实现。通过对线性调频信号的频率进

行三角波调制,可同时实现测距和测速。连续三角波调制的频率-时间表达式为

$$f(t) = f_0 + \sum_{n=0,1,2,\dots} \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{1}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2}} \right] \left( \frac{2B}{T_L} t - 2nB \right) + \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{3}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2}} \right] \left( 2B - \frac{2B}{T_L} t + 2nB \right), \quad (1)$$

式中: $t$  为时间; $f_0$  为初始频率; $B$  为线性调频带宽; $T_L$  为线性调频的调制周期(在一个周期内对信号进行一次完整的上变频和下变频); $\text{rect}$  为矩形函

数; $n$  为该连续波持续的周期数。

根据图 2,调频激光雷达出射激光的复振幅可表示为

$$u_0(t) = E_0 \exp \left[ -j2\pi \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot dt \right) \right] = E_0 \exp \left\{ -j2\pi \left\{ f_0 t + \sum_{n=0,1,2,\dots} \text{rect} \left[ \frac{t - \left( n + \frac{1}{4} \right) T_L}{\frac{T_L}{2}} \right] \times \left( \frac{B}{T_L} t^2 - 2nBt + \frac{3}{2} nBT_L \right) + \text{rect} \left[ \frac{t - \left( n + \frac{3}{4} \right) T_L}{\frac{T_L}{2}} \right] \left[ 2Bt - \frac{B}{T_L} t^2 + 2nBt - \frac{(5n+1)BT_L}{2} \right] \right\} \right\}, \quad (2)$$

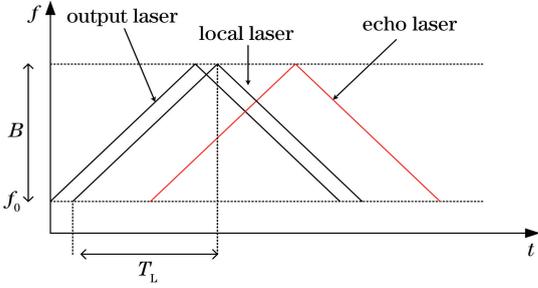


图 2 线性调频激光雷达瞬时频率和时间的关系

Fig. 2 Relationship between instantaneous frequency of linear modulation lidar and time

式中： $E_0$  为未经频率调制的出射光的初始复振幅。

本振激光由出射激光分路得到，若不考虑其相对出射激光的时延，则本振激光信号可表示为

$$E_{LO}(t) = \mu_{LO} u_0(t), \quad (3)$$

式中： $\mu_{LO}$  为本振光振幅相对于出射激光振幅的比例系数。回波信号经目标反射后，可表示为

$$E_S(t) = \int_{z_i}^{z_j} \rho(z) \mu_S u_0 [t - \tau(z)] dz, \quad (4)$$

式中： $\mu_S$  为回波信号光振幅相对于出射激光振幅的比例系数； $\rho(z)$  为不同纵向距离引起的光衰减系数； $\tau(z)$  为时延； $z$  为相干激光雷达与目标之间的距离； $i, j$  分别为目标上与雷达距离最近和最远的位置点； $z_i$  为一系列目标位置中离雷达最近的距离； $z_j$  为一系列目标位置中离雷达最远的距离。如图 1 所示，区域①、②表示光斑落在目标上的不同位置，由此引入了不同的时延。

两光束干涉的物理过程可表示为电场的叠加<sup>[15]</sup>，干涉后的光电场为

$$E(t) = E_S(t) + E_{LO}(t). \quad (5)$$

光电探测器的光电流可表示为

$$i(t) = \Re E(t) \cdot E(t)^*, \quad (6)$$

式中： $E(t)^*$  为  $E(t)$  的复共轭； $\Re$  为探测器响应率。不考虑初始相位和相位噪声，根据(6)式可得本系统中回波信号与本振信号相干后的光电流为

$$i_{IF}(t) = \int_{z_i}^{z_j} E_{IF} \exp \left\{ -j2\pi \left\{ -f_0 \tau(z) + \frac{B}{T_L} \sum_{n=0,1,2,\dots} \text{rect} \left[ \frac{t - \tau(z) - \left( n + \frac{1}{4} \right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z)} \right] [-2t \cdot \tau(z) + \tau(z)^2 + 2nT_L \cdot \tau(z)] + \text{rect} \left[ \frac{t - \tau(z) - \left( n + \frac{3}{4} \right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z)} \right] [-2T_L(n+1) \cdot \tau(z) + 2t \cdot \tau(z) - \tau(z)^2] - \text{rect} \left[ \frac{t - \frac{1}{2} \tau(z) - nT_L}{\tau(z)} \right] \left\{ 2t^2 - [2\tau(z) + 2T_L] t + \tau(z)^2 + \frac{1}{2} T_L^2 \right\} + \text{rect} \left[ \frac{t - \frac{1}{2} \tau(z) - \left( n + \frac{1}{2} \right) T_L}{\tau(z)} \right] \left\{ 2t^2 - [2\tau(z) + 2T_L] t + \tau(z)^2 + \frac{1}{2} T_L^2 \right\} \right\} \right\} dz, \quad (7)$$

式中:  $E_{IF}$  为相干光电流复振幅。

(7)式中的第2项和第3项分别为上升沿和下降沿对应的固定频差,第4项和第5项分别为拍频信号的上升沿和下降沿在时延范围  $\tau(z)$  内的不固定频差。当目标与激光雷达出射口(准直镜)之间存在一

定的距离和相对运动时,同一目标上不同位置的回波信号经历不同的时延。若目标上第  $k$  个位置的回波信号与本振信号在同一调制重复频率周期内,  $z_k \in [z_i, z_j]$ , 且  $\tau(z_k) \ll \frac{T_L}{2}$ , 则(7)式可近似表示为

$$i_{IF,k}(t) = E_{IF} \exp \left\{ -j2\pi \left[ -f_0 \tau(z_k) + \frac{B}{T_L} \sum_{n=0,1,2,\dots} \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{1}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z_k)} \right] [-2\tau(z_k) \cdot t + 2nT_L \tau(z_k)] + \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{3}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z_k)} \right] [-2(n+1)T_L \cdot \tau(z_k) + 2\tau(z_k) \cdot t] \right] \right\} = E_{IF} \exp \left\{ -j2\pi \left[ -f_0 \tau(z_k) + \frac{B}{T_L} \sum_{n=0,1,2,\dots} \left\{ \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{1}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z_k)} \right] f_{k,up} \cdot t + \text{rect} \left[ \frac{t - \left(n + \frac{3}{4}\right) T_L}{\frac{T_L}{2} - \tau(z_k)} \right] f_{k,down} \cdot t \right\} \right] \right\} \quad (8)$$

式中:  $i_{IF,k}(t)$  为目标上第  $k$  个位置的相干光电流;  $f_{k,up}$ 、 $f_{k,down}$  分别表示目标上第  $k$  个位置的回波信号与本振信号在上变频和下变频处的相干拍频频率。

当目标与激光雷达存在相对运动时,目标上第  $k$  个位置的回波信号在第  $m$  个调制重复频率周期内的时间延迟为  $\tau(z_{k,m}) = \frac{2(R_{k,m-1} + v_{k,m} \cdot t)}{c}$ , 其中,  $z_{k,m}$  为在第  $m$  个调制重复频率周期处,目标上第  $k$  个位置与激光雷达之间的距离,  $m = n + 1$ ,  $R_{k,m-1}$  为第  $k$  个目标位置与雷达在第  $m-1$  个调制重复频率周期结束后的距离,  $v_{k,m}$  为第  $k$  个目标位置在第  $m$  个调制重复频率周期里的速度,  $c$  为光速。

线性周期调频脉冲信号经发射后,目标回波信号与本振信号之间存在与距离相关的时延,通过相干混频后,将时延转换为频差,通过检测上变频和下变频区域的频差,即频谱中峰值对应的频率位置,可以得到时延信息,进而得到目标距离和速度信息,  $f_{k,up}$  和  $f_{k,down}$  可通过对一段时间内的每个调制重复频率周期上升沿和下降沿中重叠的有效数据点数分别进行傅里叶变换得到,即取频谱中峰值对应的频率位置<sup>[16-17]</sup>。

$f_{k,up}$  和  $f_{k,down}$  包含了目标的距离和速度信息,则一个调制重复频率周期内的  $f_{k,up}$  和  $f_{k,down}$  可表示为

$$f_{k,up} = -\frac{2 \cdot 2R_{k,m-1}}{c} \frac{B}{T_L} - f_0 \frac{2v_{k,m}}{c} + \frac{2B \cdot 2(m-1) \cdot v_{k,m}}{c}, \quad (9)$$

$$f_{k,down} = \frac{2 \cdot 2R_{k,m-1}}{c} \frac{B}{T_L} - f_0 \frac{2v_{k,m}}{c} - \frac{2B \cdot 2m \cdot v_{k,m}}{c}. \quad (10)$$

一个上升沿或下降沿内的有效数据点数为  $\frac{T_L/2 - \tau(z_{k,m})}{f_s}$ , 其中  $f_s$  为采样率。则一个调制重复频率周期内目标的距离和速度可分别表示为

$$R_{k,m-1} = \frac{f_{k,down} - f_{k,up}}{2} \frac{B}{c} \frac{T_L}{2} - \frac{(2m-1)v_{k,m}}{2} T_L, \quad (11)$$

$$v_{k,m} = -\frac{f_{k,down} + f_{k,up}}{4(f_0 + B)} \cdot c. \quad (12)$$

同一目标上的不同位置点在同步平动的同时,不同位置处也出现其独有的内部振动。为了得到某些目标位置点细节处的微动状态,需要消除距离和平动带来的频差影响,通过计算不同目标位置的上升沿和下降沿频差,用补偿的方法得到某一目标细

节处的微动状态,达到抑制干扰的目的。激光雷达的出射激光经过准直镜后形成较大光斑,光斑会落在同一目标上的不同目标位置。现考虑 2 个目标位置,其中目标位置点 1 的内部结构在与出射口相距  $R_{1,0}$  的位置上发生一定频率和一定振幅的正弦微振动,可表示为:  $v_{\text{microdopp}} = a \sin(2\pi f_d t)$ , 其中  $a$  为振幅,  $f_d$  为频率, 目标位置点 2 固定在与出射口相距  $R_{2,0}$  的位置上, 内部结构无微振动, 作为参考点。图 3 所示为目标的前后两个位置在某一个上升沿中的频谱表现, 两者相对距离固定。

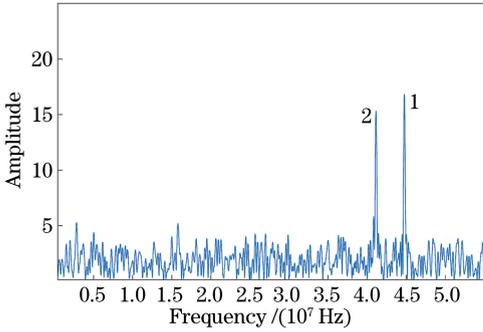


图 3 同一上升沿中两目标位置点在频谱范围内的表现  
Fig. 3 Performance of two positions of target at same rising edge in spectrum range

三角线性调频测距系统分辨目标不同距离上两个或者多个位置的能力是由对回波信号进行频域处理后的频率分辨率决定的。频率分辨率通常指的是算法将从两个距离很近的目标位置的回波信号从其谱峰分开的能力。不同距离处的目标位置具有不同的回波中频频率, 若系统的频率分辨率不足以将其分开, 那么两个目标位置会被探测系统认为是一个目标位置, 从而降低了探测系统的性能。由(9)式可知, 在某一上升沿中, 纵向距离和混频后的中频信号瞬时频率之间的关系为

$$R = \frac{c \cdot T_L}{4B} f_{\text{IF},k,\text{up}}, \quad (13)$$

式中:  $R$  为纵向距离;  $f_{\text{IF},k,\text{up}}$  为目标上第  $k$  个位置在上变频部分的相干拍频频率。

线性调频激光雷达系统的测距精度  $\delta R$  的表达式为

$$\delta R = \frac{c \cdot T_L}{4B} \delta f_{\text{IF},k,\text{up}}, \quad (14)$$

式中:  $\delta f_{\text{IF},k,\text{up}}$  表示拍频信号的中心频率的变化量, 与拍频的频谱宽度(激光线宽)和激光本身的频率稳定度等因素有关。激光的单频输出线宽越窄(导致的拍频频谱宽度越窄), 则调频带宽越大, 调频连续波激光测距的测距精度越高。因此, 为了增加探测

距离和提高距离分辨率, 激光雷达的发射端要采用大功率、大宽带的激光载波调频技术。系统能够分辨的最小频率间隔最小应为  $2/T_L$ , 即  $\delta f_{\text{IF},k,\text{up}} = 2/T_L$ , 由此可得, 距离分辨率为

$$\delta R = \frac{c}{2B}. \quad (15)$$

用  $v_1, v_2$  分别表示目标位置点 1 和目标位置点 2 在测量方向的运动速度分量,  $v_{\text{local}}$  表示雷达本地运动在测量方向的速度分量,  $v_0$  表示目标相对于雷达本地的运动速度。则目标位置点 1 处信号在一段时间的时延可表示为

$$\tau(z_1) = \sum_{m=1,2,\dots} \tau(z_{1,m}) = \frac{2\left(R_{1,0} + \int v_1 dt + \int v_{\text{local}} dt\right)}{c}. \quad (16)$$

根据(12)式, 目标位置点 1 处的速度可表示为

$$v_1 = -\left(f_{1,\text{down}} + f_{1,\text{up}}\right) \left/ \frac{4(f_0 + B)}{c} \right. - v_{\text{local}} = v_{\text{microdopp}} + v_0. \quad (17)$$

同理, 目标位置点 2 处信号的时延和速度可分别表示为

$$\tau(z_2) = \sum_{m=1,2,\dots} \tau(z_{2,m}) = \frac{2\left(R_{2,0} + \int v_2 dt + \int v_{\text{local}} dt\right)}{c}, \quad (18)$$

$$v_2 = -\left(f_{2,\text{down}} + f_{2,\text{up}}\right) \left/ \frac{4(f_0 + B)}{c} \right. - v_{\text{local}} = v_0. \quad (19)$$

因此, 目标位置点 2 处的速度包含了除目标位置点 1 处的微多普勒运动之外的所有速度信息, 通过对目标位置点 2 处的信号进行补偿, 得到目标位置点 1 处的微多普勒速度为

$$v_{\text{microdopp}} = v_1 - v_2 = -\left[\left(f_{1,\text{down}} + f_{1,\text{up}}\right) - \left(f_{2,\text{down}} + f_{2,\text{up}}\right)\right] \left/ \frac{4(f_0 + B)}{c} \right. \quad (20)$$

微多普勒频率特征可表示为

$$f_{\text{microdopp}} = \frac{2(v_1 - v_2)}{\lambda}, \quad (21)$$

式中:  $\lambda$  为波长。

此方法说明了在不需要用本地振动传感器来探测本地振动的前提下, 用同一光束可得到目标待测位置点和目标自身参考点的运动信息, 通过对参考点处信号的补偿不仅可实现对本地振动干扰的抑制, 还能分离目标的平动速度, 得到纯粹的待测目标

位置的微多普勒频率特征。

### 3 微多普勒距离分辨实验结果分析

系统中的线性调频激光器的初始波长为 1550 nm, 出射光功率约为 4 mW, 调频带宽为 2.4 GHz, 调制重复频率周期为 100 kHz, 雷达与目标的相对距离在 12 m 左右, 各个情形下的实验条件相同, 采样率为  $100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据图 1 搭建的实验系统如图 4 和图 5 所示, 图 4 为目标实物图, 音响与金属目标板固定在一个长金属底座上, 二者相距一定距离, 该金属底座可在平移台上运动。根据(15)式, 该系统中两个目标点至少需要相距 6.25 cm, 距离过小将导致系统无法分辨两个位置点, 本实验中, 音响与金属目标板的距离设定为 1 m。



图 5 干扰抑制雷达系统与激光出射准直镜  
Fig. 5 Radar system of interference suppression and laser output collimator

音响表面有一个固定频率的正弦振动, 将其作为目标位置 1, 金属目标板作为目标位置 2。图 5 为干扰抑制雷达系统与激光出射准直镜, 准直镜将出射激光的光斑进行扩大, 并且同时收发激光, 在本实验中, 出射准直镜安装在一个导轨上, 在施加本地振动的过程中可保证光斑位置不发生改变。

利用该系统对目标上两个目标位置进行微多普勒距离分辨的实验结果如图 6~8 所示, 两个位置在探测过程中经历了相同的平移运动, 其中目标位置 1 存在一定频率的正弦振动, 目标位置 2 作为参考点。

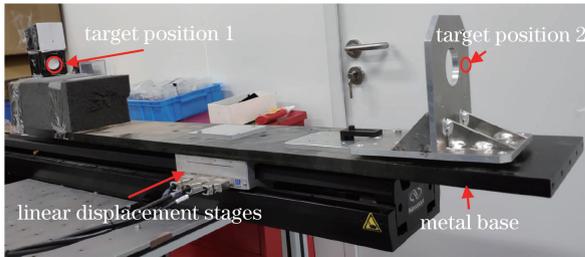


图 4 目标实物图  
Fig. 4 Picture of object

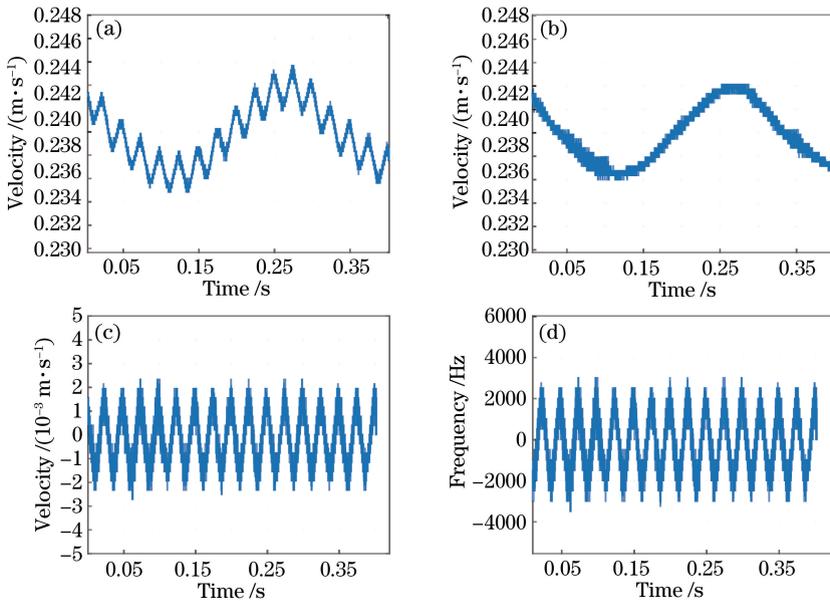


图 6 情形 1 的实验结果。(a) 目标位置 1 的速度; (b) 目标位置 2 的速度; (c) 补偿后目标 1 的微振动速度; (d) 目标 1 的微多普勒频率特征

Fig. 6 Experimental results of case 1. (a) Speed of target position 1; (b) speed of target position 2; (c) micro vibration velocity of target 1 after compensation; (d) micro Doppler frequency characteristic of target position 1

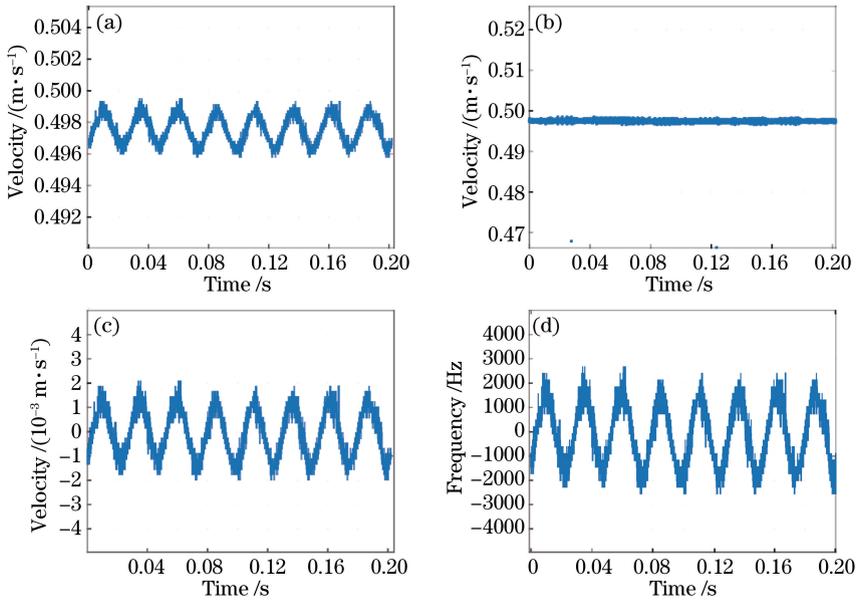


图 7 情形 2 的实验结果。(a)目标位置 1 的速度;(b)目标位置 2 的速度;  
(c)补偿后目标 1 的微振动速度;(d)目标 1 的微多普勒频率特征

Fig. 7 Experimental results of case 2. (a) Speed of target position 1; (b) speed of target position 2; (c) micro vibration velocity of target 1 after compensation; (d) micro Doppler frequency characteristic of target position 1

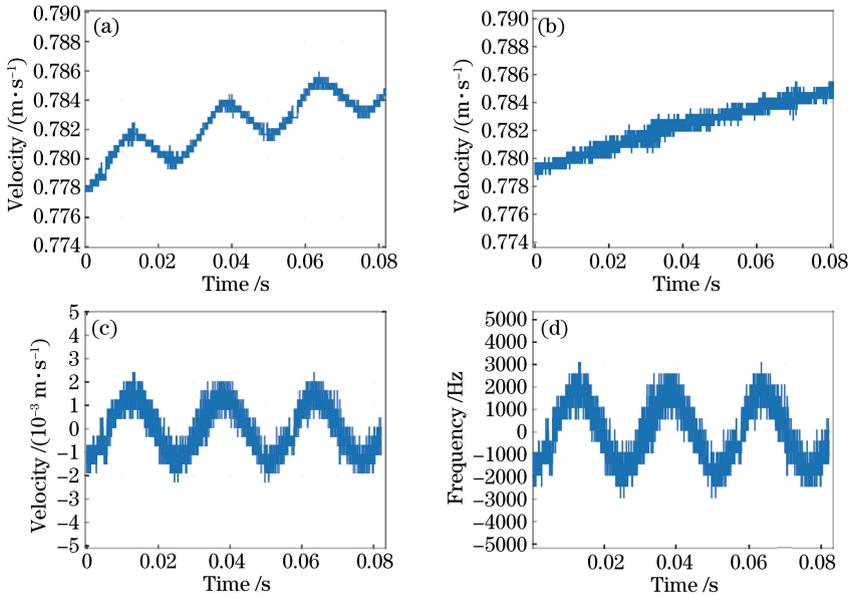


图 8 情形 3 的实验结果。(a)目标位置 1 的速度;(b)目标位置 2 的速度;  
(c)补偿后目标 1 的微振动速度;(d)目标 1 的微多普勒频率特征

Fig. 8 Experimental results of case 3. (a) Speed of target position 1; (b) speed of target position 2; (c) micro vibration velocity of target 1 after compensation; (d) micro Doppler frequency characteristic of target position 1

图 6 为情形 1 的实验结果,在情形 1 中,目标整体不在平移台上运动,目标位置 1 处发生一定频率的正弦振动,目标位置 2 固定不动,采用激光雷达施加本地振动干扰。采样时间为 0.42 s。图 6(a)为从目标位置 1 检测到的包含了自身正弦运动和本地振动的速度;图 6(b)为从目标位置 2 检测到的雷达

本地振动;通过补偿可抑制雷达本地振动的干扰,如图 6(c)所示,从而可以得到待测目标位置 1 的多普勒频率特征,如图 6(d)所示。

图 7 为情形 2 的实验结果,在情形 2 中,目标整体在平移台上以  $500\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度运动,同时目标位置 1 以一定频率作正弦振动,激光雷达不施加本地

振动干扰。采样时间为 0.21 s。图 7(a)表示在目标位置 1 处检测到的包含了自身的正弦运动和平移匀速运动的速度信息;图 7(b)表示在目标位置 2 处检测到的目标匀速运动的速度;通过补偿可抑制目标匀速运动的干扰,如图 7(c)所示,从而可以得到如图 7(d)所示的待测目标位置 1 的多普勒频率特征。

图 8 为情形 3 的实验结果,在情形 3 中,目标整体在平移台上以  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度运动,同时目标位置 1 在作一定频率的正弦振动,激光雷达施加本地振动干扰。采样时间为 0.08 s。图 8(a)为在

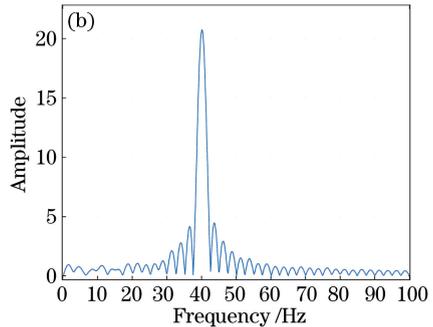
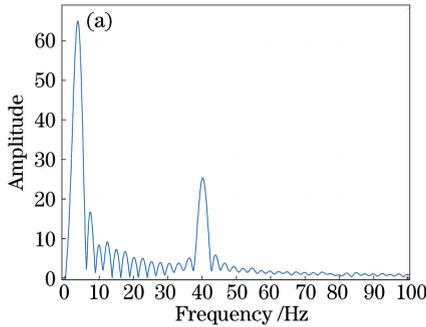


图 9 情形 1 中补偿前、后频谱分析结果。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 9 Spectrum analysis results before and after compensation in case 1. (a) Before compensation; (b) after compensation

本文的干扰抑制系统存在随机误差,如表 1 所示,随机误差主要来自噪声和傅里叶变换算法。当采样时间一定时,采样点数越多,补零倍数越大,快速傅里叶变换算法的精度越高,由此可通过增加探测器的采样率以及补零来减小误差;此外,可通过提高系统信噪比来减小噪声引起的误差。由表 1 可得,干扰抑制系统的相对补偿精度在三种实验情形下都小于 5%,说明该系统中的随机误差较小,对本地振动的干扰抑制效果较好,能够较真实地反映目标实际振动形式。

表 1 各实验情形下干扰抑制结果的误差

Table 1 Error of interference suppression result in each experimental case

Experimental case	Peak to peak frequency $F_{pp}/\text{Hz}$	Random error $\sigma/\text{Hz}$	Relative precision /%
1	5934	178.1	3.00
2	5952	163.4	2.75
3	5978	240.7	4.03

## 4 结 论

提出了一种基于激光雷达探测目标微多普勒特征的干扰抑制的方法。通过理论推导了三角线性调频的上升沿和下降沿的频差,频差包含了目标的距

目标位置 1 处检测到的包含了自身的正弦运动、平移匀速运动和本地振动的速度信息;图 8(b)表示在目标位置 2 处检测到的目标匀速运动速度和本地振动速度的叠加;通过补偿可抑制目标匀速运动和本地振动的干扰,如图 8(c)所示,从而可以得到如图 8(d)所示的待测目标位置 1 的多普勒频率特征。

对情形 1 中补偿前后的频谱进行分析可得,补偿前,目标位置 1 包含了自身的 40 Hz 正弦运动和 3.5 Hz 的本地振动,经过补偿后,本地振动被消除,得到待测目标位置 1 的多普勒频率特征(图 9)。

离、速度信息,利用目标自身的参考点作为补偿依据,将目标的微多普勒特征与本地的振动干扰分离,从而得到目标在细微处的微多普勒频谱特征。实验结果表明,在不同实验条件下,该方法得到的干扰抑制结果都能真实地反映实际情形,达到微多普勒特征识别的要求。接下来将从相位的角度进一步研究分辨率更高的微多普勒频谱特征。

## 参 考 文 献

- [1] Acharekar M A, Gatt P, Mizerka L J. Laser vibration sensor [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2472: 2-11.
- [2] Farquharson G, Inngs M R. A 50-800 MHz stepped frequency continuous wave ground penetrating radar [C] // Proceedings of the 1998 South African Symposium on Communications and Signal Processing-COMSIG'98 (Cat. No. 98EX214), September 8, 1998, Rondebosch, South Africa. New York: IEEE Press, 1998: 455-460.
- [3] Haddadi K, Wang M M, Glay D, et al. A 60 GHz six-port distance measurement system with sub-millimeter accuracy [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(10): 644-646.
- [4] Liu Y P, Wang C, Xia H Y. Application progress of time-frequency analysis for lidar [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120005.
- 刘燕平, 王冲, 夏海云. 时频分析在激光雷达中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120005.
- [5] Chen V C, Lipps R D. Time frequency signatures of micro-Doppler phenomenon for feature extraction[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4056: 220-226.
- [6] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler with time-frequency transform [C] // Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing (Cat. No.00TH8496), August 16, 2000, Pocono Manor, PA, USA. New York: IEEE Press, 2000: 463-466.
- [7] Zhang P Z, Wu J, Huang G H. Active compensation method of nonlinear error in homodyne laser interferometer for vibration measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081204.  
张埔榛, 吴军, 黄庚华. 单频激光干涉测振仪的非线性误差主动补偿法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081204.
- [8] Jiang L A, Albota M A, Haupt R W, et al. Laser vibrometry from a moving ground vehicle [J]. Applied Optics, 2011, 50(15): 2263-2273.
- [9] Halkon B J, Rothberg S J. Reprint of: taking laser Doppler vibrometry off the tripod: correction of measurements affected by instrument vibration[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99: 3-10.
- [10] Yu Z B, Zhao D, Zhang Z Q. Doppler radar vital signs detection method based on higher order cyclostationary[J]. Sensors, 2017, 18(1): 47.
- [11] Gouveia C, Vieira J, Pinho P. A review on methods for random motion detection and compensation in bio-radar systems[J]. Sensors, 2019, 19(3): 604.
- [12] Revel M G. Laser vibrometry vibration measurements on vehicle cabins in running conditions: helicopter mock-up application [J]. Optical Engineering, 2011, 50(10): 101502.
- [13] Liotto G, Wang C P. Vibration measurement by a laser Doppler displacement meter[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2868: 337-343.
- [14] Zhang H Y, Zhao C M, Jiang Q J, et al. Laser detection on micro-Doppler effect in coherent lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1981-1985.  
张海洋, 赵长明, 蒋奇君, 等. 基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1981-1985.
- [15] Wu J. Research on key technologies of high repetition frequency coherent laser ranging and velocity measurement in large dynamic range[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
吴军. 大动态范围高重频相干激光测距测速关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2015.
- [16] Lu X Y, Yun T, Xue L F, et al. Effective feature extraction and identification method based on tree laser point cloud [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0510002.  
卢晓艺, 云挺, 薛联凤, 等. 基于树木激光点云的有效特征抽取与识别方法[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0510002.
- [17] Sun J F, Zhou Y, Lu Z Y, et al. Scanning lidar technology based on FMCW [C] // 2017 Optical Technology Symposium and Interdisciplinary Forum, Shanghai: Shanghai Infrared and Remote Sensing Society, 2017.  
孙建锋, 周煜, 卢智勇, 等. 基于调频连续波的扫描激光雷达技术[C]. 2017年光学技术研讨会暨交叉学科论坛文集, 上海: 上海市红外与遥感学会, 2017.