

文章编号 1004-924X(2015)06-1508-08

激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像

刘立生*, 张合勇, 王挺峰, 郭 劲, 陈长青

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了采用激光外差技术探测振动目标,获取目标多普勒频谱图像,实现目标轮廓识别的方法。基于相位变化给出了目标振动形成外差信号的光电流模型;用扫描振镜控制激光光束方向实现对目标点扫描;通过振镜驱动电压触发数据采集卡,实现扫描与采集同步。利用频谱展宽占有比例的信号处理方式处理振动目标形成的多普勒频谱,简化了数据处理方式,有效消除了单个峰值噪声对信号的影响。实验中以 5 MHz 采样率测得两个目标在不同位置的特征频谱,得到了它的频谱展宽占有比例曲线;选取不同频谱展宽占有比例形成多普勒频谱图像,指出频谱展宽占有比例在 0.7 到 0.9 时能够形成良好的振动图像。文中结果证实了利用频谱展宽占有比例的数据处理方式探测振动目标是有效的,利用外差技术获取振动频谱图像是可行的。

关键词:激光外差探测;振动目标探测;多普勒频谱成像;目标识别

中图分类号:O436.1;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1508

Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection

LIU Li-sheng*, ZHANG He-yong, WANG Ting-feng, GUO Jin, CHEN Chang-qing

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liuls@ciomp.ac.cn

Abstract: To recognize the profile of a vibrating target, the Doppler spectral image of the target was captured by using the laser heterodyne detection method. A photo-current model of laser heterodyne signal from the vibrating target was derived based on the instant changing of phase, the target was scanned point by point in the laser direction controlled by a scanning galvanometer, and the data collection was synchro-controlled by the drive voltage of the galvanometer to synchronize data scanning and data capturing. A method called the Ratio in Broaden Spectrum (RIBS) to vibration signal processing was proposed to process the Doppler spectrum come from the vibration signal, by which the data processing was simplified and the effect of peak noise on the signal was eliminated. The characteristic spectra of two targets in different positions were detected at a 5 MHz sampling rate in the experiment to derive the RIBS curve, and Doppler spectrum imaging was captured with different RIBS, which show that when the optimal ratio is set from 0.7 to 0.9, the high quality vibration image

收稿日期:2014-07-07;修订日期:2014-08-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205143)

can be obtained. The result demonstrates the validity of the RIBS in vibrating target detection and the feasibility of the laser heterodyne detection to capture spectrum images.

Key words: laser heterodyne detection; vibrating target detection; Doppler spectrum imaging; target recognition

1 引言

激光外差探测基于光学拍频原理实现目标运动多普勒效应的探测,具有速度分辨率高、灵敏度高等优势^[1-2]。目前,国内外激光外差探测主要应用在目标速度测量,转动目标频谱识别及振动目标探测成像等领域^[3-6]的真假导弹弹头及探测伪装目标的识别^[7-8]。不同振动特性目标形成的激光多普勒频谱不同,采用外差方式可测量激光多普勒特征频谱,以点扫描方式对目标潜在区域成振动频谱图像,可探测伪装机车和埋藏地雷^[9-12],实现普通成像方式难以完成的任务。为加快探测速度,Aranchuk等提出了多光束探测方式^[13-14]。目前,国内的相关报道多集中在振动目标单点的探测^[15-16],根据振动目标的实时相位变化得到外差信号,从而实时输出光电流满足的关系式。该探测方式需要良好的激光监测与控制系统^[17],而针对整个面目标表面的振动多普勒频谱识别在国内鲜见报道。变速运动目标的外差信号处理方式主要为短时间傅里叶变换获取频谱,将该时间段内的多普勒频移作为定值进行处理,得到频谱峰值位置,从而获取目标长时间的运动特性^[18]。

本文采用扫描振镜对振动目标做点扫描,形成了目标振动多普勒频谱图像,实现了目标的外差探测成像。文中提出了基于频谱展宽占有比例处理实时变化多普勒频率的数据处理方式,大大简化了数据的采集和处理,并且有效地消除了单个峰值噪声对信号的干扰。

2 振动目标外差信号

激光外差探测原理是将频率差值稳定的两束光信号做相干叠加,形成拍频信号,通过探测以拍频周期做规律性变化的输出光电流强度,从而实现对外差频率的探测。输出光电流强度满足关系式:

$$I(t) = I_s + I_l + 2(I_s I_l)^{1/2} \cos(2\pi f_{IF} t + \varphi), \quad (1)$$

式中: I_s 和 I_l 分别为信号光和本振光的光电流强度; f_{IF} 为两光的差频频率; φ 为初始相位,对频率探测无影响,可假定为 0。

以外差方式探测振动目标时,返回信号光由于受到目标的运动调制,其频率实时变化。假定目标运动位移量为 $x(t)$,信号光产生的相位变化量为:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi \cos \theta}{\lambda} x(t), \quad (2)$$

式中: λ 为探测激光波长, θ 为目标位移方向与照射激光方向的夹角。应用上述相位变化量可以写出外差探测获得的光电流信号强度为:

$$I(t) = I_s + I_l + 2(I_s I_l)^{1/2} \cos\left[2\pi f_{IF} t + \frac{4\pi \cos \theta}{\lambda} x(t)\right]. \quad (3)$$

一般振动表面的运动规律基本满足简谐运动,其运动位移满足:

$$x(t) = A_v \sin(2\pi f_v t + \theta_0), \quad (4)$$

其中: A_v 为表面振动幅度, f_v 为振动频率, θ_0 为振动初相位,可令其为 0。由此可得物体振动的瞬时速度为:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 2\pi f_v A_v \cos(2\pi f_v t). \quad (5)$$

于是得到振动物体引起探测光的瞬时多普勒频移为:

$$f_D(t) = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} = \frac{4\pi f_v A_v \cos \theta}{\lambda} \cos(2\pi f_v t). \quad (6)$$

将振动表面位移式(4)带入式(6)中,可得振动目标外差信号光电流为:

$$I(t) = I_s + I_l + 2(I_s I_l)^{1/2} \cdot \cos\left[2\pi f_{IF} t + \frac{4\pi A_v \cos \theta}{\lambda} \sin(2\pi f_v t)\right]. \quad (7)$$

式(7)通过相位得到的外差信号光电流强度与通过速度积分^[19]获得的结果完全一致。由式(7)可见,振动目标引起外差电流信号频率实时变化表现为以差频频率 f_{IF} 为载频的相位调制信号。要获取实时振动特性,需要从光电流强度频谱出发,从频谱特性上获得振动规律。

3 振动目标探测

本文设计的外差探测光路系统如图 1 所示,发射激光由分束器分为两束,一束经声光晶体调制,作为本振光;另一束经扩束发射,由扫描振镜照射到目标表面;回波信号由同一光学系统接收,经光学偏振隔离装置后与本振光相干叠加,由探测器接收。由于采用收发共口径光学系统,设计该系统时采用内置 1/4 波片结合偏振分光棱镜组成光隔离器,使发射激光和回波信号光分离。

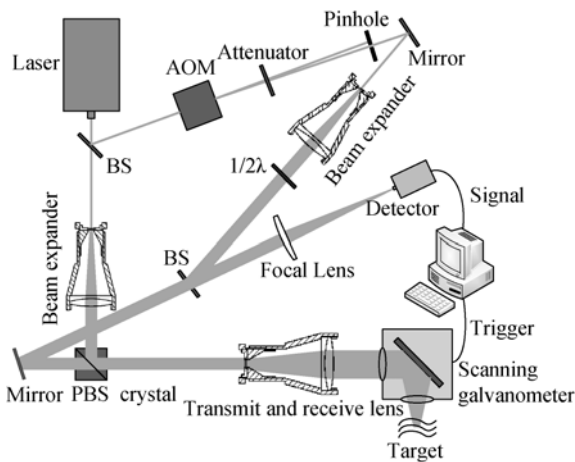


图 1 振动目标测量外差光路系统

Fig. 1 Laser heterodyne detection system for vibrating target

为了获取对面目标的频谱图像,采用扫描振镜控制激光对目标位置进行点扫描,获取目标在不同位置反射信号包含的振动特性。实验中测量了两个目标,由于其振动振幅和最大速度较小,由前期实验结果可得,对本振激光做 200 kHz 的频率调制是足够作为载频频率的。第 1 个探测目标为汽车模型,放置在振动平台上,以模拟真实汽车探测过程;第 2 个目标为工作状态斩波器,由于内置电机转动,目标出现振动,相对于第 1 个目标,其振动强度较弱。

控制扫描振镜对目标区域做矩形点扫描,汽车模型扫描区域点阵为 43×19 ,斩波器扫描区域点阵为 25×29 。每扫描一列结束,朝着相同方向进行第二列扫描,直至扫描结束。根据扫描振镜原理可知,不同偏摆角度对应不同的驱动电压,由于振镜在 X 和 Y 方向分别由两个独立偏摆电机驱动,Y 方向完成一次列扫,X 方向进行一次行

扫,因此主要考虑 Y 方向的驱动信号变化即可。图 2 为扫描振镜及其列扫描控制信号。

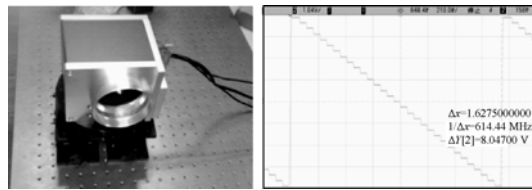


图 2 光电扫描振镜及其驱动电压信号

Fig. 2 Scanning galvanometer and its output signal

光束每指向一个固定位置,数据采集系统需要迅速记录对应位置的回波信号频谱信息。在此过程中需要实现扫描控制卡与数据采集卡触发同步,这里利用振镜扫描控制卡输出信号作为采集卡触发信号,实现同步工作,如图 3 所示。

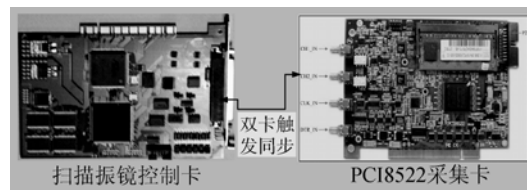


图 3 双卡同步示意图

Fig. 3 Schematic map for synchronization of two PCI boards

如图 2 所示,扫描振镜在列方向进行扫描时输出电压呈现阶梯变化,将阶梯电压下降沿作为 PCI8522 采集卡的外触发信号。扫描振镜在上述参数设置下,两点间电压跨距为 268 mV,每个扫描点激光的驻留时间设置为 200 ms。在驻留时间内,以 5 MHz 采样率完成 250 000 点数据的记录存储。

4 数据处理

4.1 频谱展宽占有比例

一般采用傅里叶变换对外差信号进行处理,以获取其频谱特性。而获取频率实时变化信号的频谱特性的一般处理方式是将某短时间内的频率作为定值,通过傅里叶变换获得频谱峰值。该处理方式有 3 点要求:(1)测量时间至少覆盖几个振动周期,以获得较为完整的振动特性;(2)获得短时间内频谱特性,要求采样频率足够高,并且载频足够高,

使调制频率在短时间内能够体现出来;(3)由于采用峰值寻找法,要求消除系统干扰噪声中的尖峰脉冲信号,以及随机尖峰噪声的影响。

该处理方法以足够高的采样率做长时间的信号记录,不仅产生庞大的数据量,并且难以消除随机噪声。为了克服这些困难,本文提出了频谱展宽占有比例的信号处理方式。在该处理方式中直接获取一段测量信号频谱,该频谱中含有不同的频率成分,以载频位置为中心向两侧延伸不同的频谱宽度,计算不同频谱宽度功率在整个频谱上占有的比例,其计算公式如下:

$$\beta(\Delta f) = \frac{\int_{-\Delta f}^{\Delta f} I(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty} I(f)df}, \quad (8)$$

式中: $I(f)$ 为测量强度信号的频谱密度分布, Δf 为偏离载频的频率值。图 4 为车模测量过程中的 4 组数据,经过上述处理方式,图 5 给出了这 4 组信号相对应的频谱展宽占有比例曲线。

由图 5 可见,频谱处理选取在 100~300 kHz 进行,选取该范围对目标振动引起的展宽有一定

的预判,使信号频谱处理宽度能够覆盖振动的频谱范围。

数据 1 为系统噪声信号,从其频谱密度分布中可见,信号中没有明显的展宽频谱信息,只存在几个峰值较高的噪声。其中 200 kHz 位置峰值为声光调整噪声,该频谱密度分布的频谱宽度占有比例曲线如图 5 中对应曲线所示,基本呈一条直线,在峰值噪声出现位置会出现一个阶梯型上升。数据 2,3,4 明显存在频谱上的展宽信号,这 3 组数据两侧的频谱宽度分别约为 50,60 和 30 kHz,并且频谱呈现不同的形状,如数据 2 的中间频谱强度弱,而数据 3 的中间频谱强度强。从这 3 组数据频谱展宽占有比例曲线可见,三者曲线明显分离,频谱宽度越窄,展宽曲线上升越快;曲线上升拐点位置基本为频谱展宽宽度。

该数据处理方式减小了对数据采样率和采样时间长度的要求,能够克服传统方式寻找频谱峰值的困难。由于采用积分运算方式,单个尖峰噪声对占有比例曲线的影响仅为微小跳变,有着良好的噪声抑制能力。

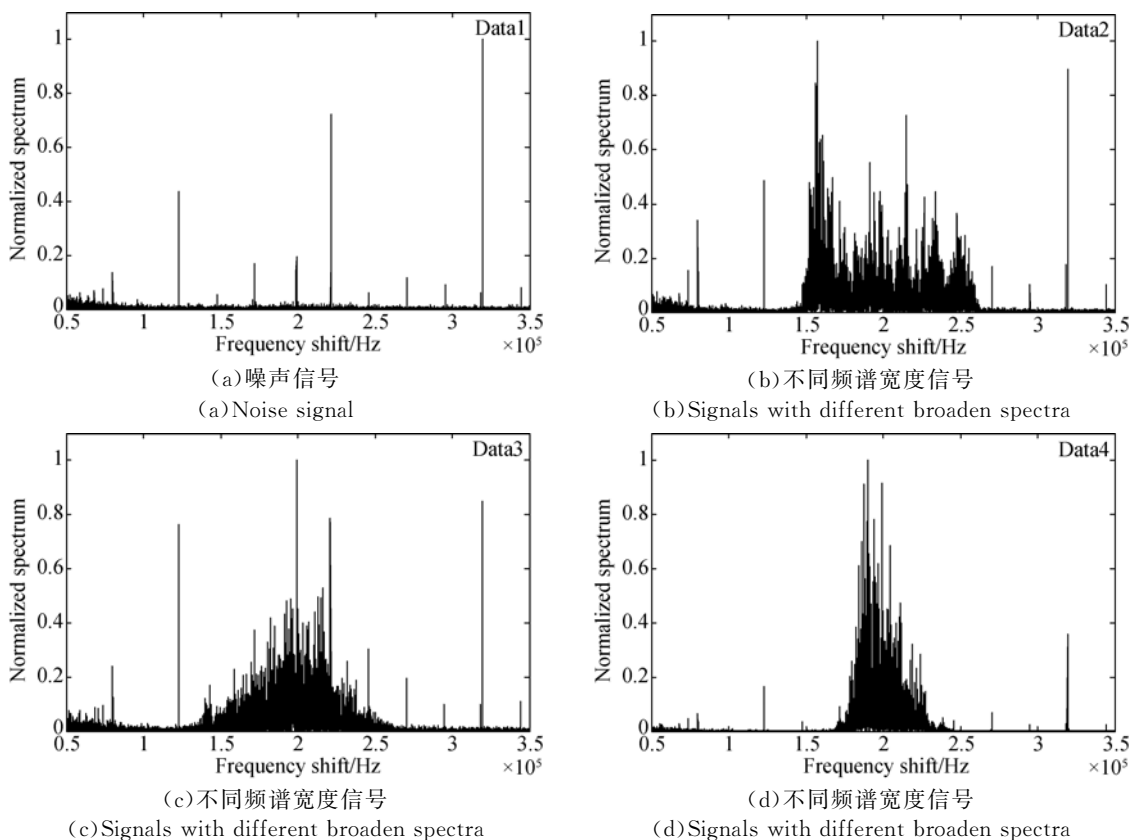


图 4 振动目标不同位置外差信号展宽频谱

Fig. 4 Broaden spectra of laser heterodyne signal for different points on vibrating target

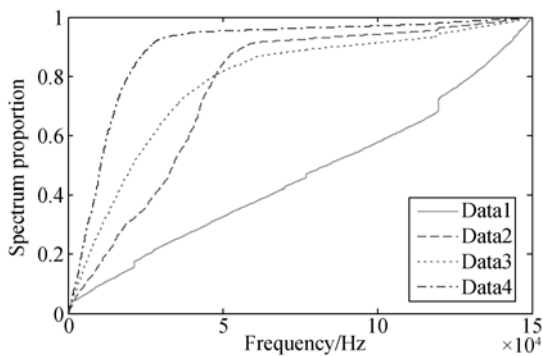


图 5 对应图 4 中数据的频谱展宽占有比例曲线
Fig. 5 RIBS curves of corresponding data in Fig. 4

振动成像测量需要获取目标的轮廓信息,而不关心目标本身的振动特性,为了使数据处理更加简单,信号提取时只需要选取一定的频谱展宽比例,计算得到该比例下的频谱宽度,从而获得目标运动特性频谱上的一个相对量。振动特性不同,该相对量就不同,由此可探测目标不同位置的振动。

另外,在提取一定比例频谱宽度时需要去除噪声信号。从图 5 中可见,噪声如果作为信号的话,频谱展宽是非常大的,真实的信号曲线肯定在噪声信号曲线的左侧,因此这里在一个比例下选

取一个阈值,该阈值由噪声决定,信号处理中大于该阈值的则认为是噪声,将其频谱展宽归零。当处理频谱宽度选取为 300 kHz 时,图 5 所示的曲线中选取频谱占有比例 (Ratio in Broaden Spectrum, RBIS) 为 0.7,对应的噪声信号横坐标频谱宽度为 115 kHz,取阈值为 115 kHz 或者稍微高一些,以便更好地滤除噪声。表 1 给出了选取不同频谱展宽占有比例时选取的阈值。

表 1 不同频谱展宽占有比例下选取的阈值

Tab. 1 Thresholds selected in different RIBS

(kHz)

频谱宽度	比例				
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
300	50	73	90	115	122

4.2 目标振动频谱成像

汽车模型为仿真模型,车轮带有弹簧减震,并且车上有透明玻璃,这为区分不同位置特性提供了方便。选取 RIBS 为 0.4~0.8 计算频谱宽度,并按表 1 中给出的阈值消除噪声干扰,得车模的目标频谱图像如图 6 所示。

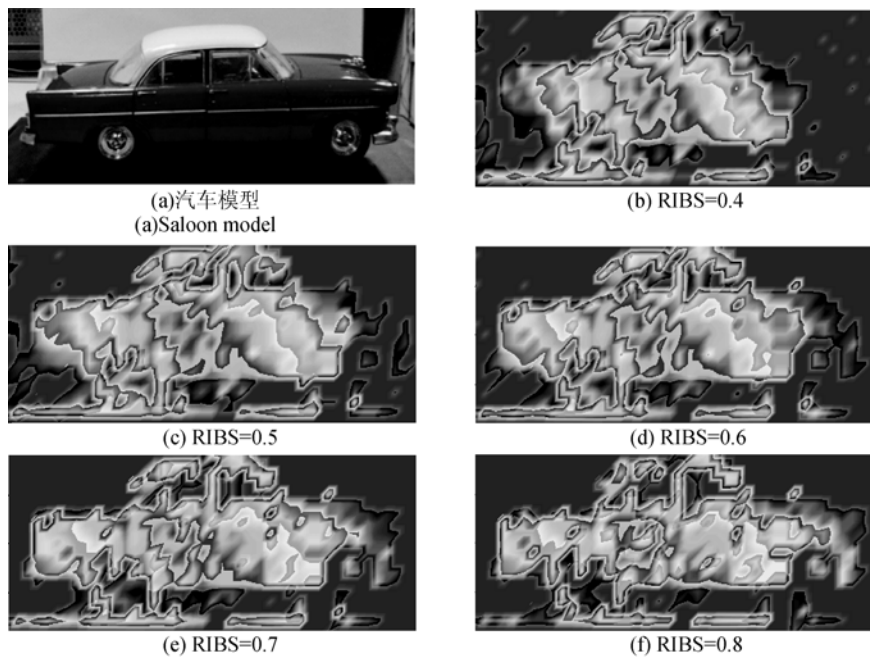


图 6 不同频谱展宽占有比例下的振动二维图像

Fig. 6 Doppler spectrum images of saloon models with different RIBS

对比汽车模型与振动频谱图能够得到汽车的轮廓信息。当频谱占有比例为 0.4 时,阈值的选取将汽车头部位置信号当做噪声滤除掉了,但是尾部后面仍有一些噪声没有滤除,因此在 $RIBS=0.4$ 时信号处理效果不佳。当频谱占有比例增大时,信号提取和噪声滤除的效率逐渐变好;当 $RIBS=0.8$ 时,汽车的不同位置显示出不同的振动特性,对目标振动细节区分更加明显。

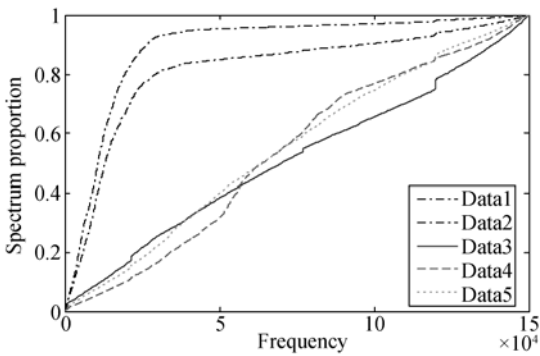


图 7 目标五组不同位置信号的频谱展宽占有比例曲线
Fig. 7 RIBS curves of target at five different positions

由图 6 可知,汽车头部和尾部的振动频谱展宽较大,振动速度和幅度较大,而汽车中部位置的振动频谱展宽较小。振动图中,能够区分车轮和

玻璃,由于车轮的振动特性与车身不同,形成的振动信号与噪声类似,被当作噪声滤除;激光照射到汽车玻璃上直接透射,镜面反射的一部分信号由于角度原因一般不会被接收到,因此汽车玻璃位置也被当作噪声滤除。

不同 RIBS 下所得的振动频谱图像不同。如图 7 所示,针对汽车模型的不同位置,选取不同振动信号获得 RIBS 曲线。图中数据 1 和 2 均为存在明显展宽频谱的信号,其频谱展宽占有比例很快上升到 80% 以上,该部分包含了主要的频谱信息;数据 3 为系统噪声曲线;数据 4 和 5 为两组频谱信息较弱的信号曲线。从图中可见,这两组曲线上缓慢,在较低时甚至在噪声信号的下方,这是由于中间频谱较弱,两侧频谱较强,但是当占有比较高时,能够与噪声区分开。由此可知,当 RIBS 较低时,某些信号的频谱宽度极有可能被当作噪声滤除掉了,造成信号的丢失。为此进行成像数据处理时,应该选取较大的 RIBS;但不是越大越好,当 $RIBS=1$ 时,频谱宽度一致,无法获取目标轮廓,RIBS 一般取 $0.7 \sim 0.9$ 是合适的。在该范围内,信号频谱展宽与噪声间隔最大,但该比例选取与实测信号有关,依赖于测量信号的信噪比,不具有普适性。

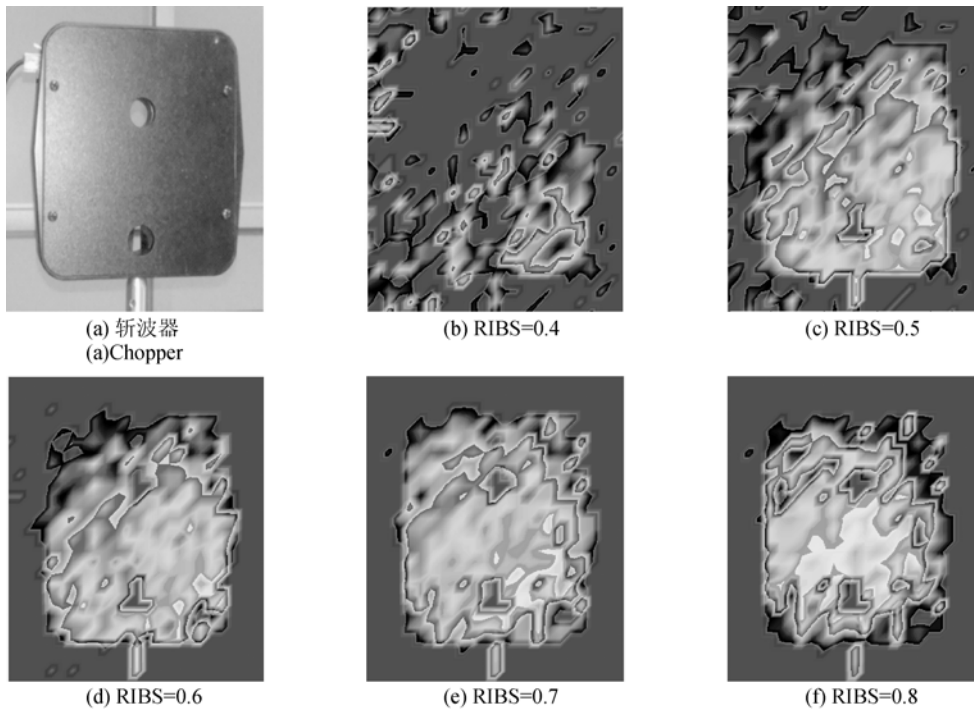


图 8 不同频谱展宽占有比例下斩波器的振动二维图像
Fig. 8 Doppler spectrum images of chopper at different RIBS

结合对汽车模型的讨论, 斩波器振动探测频谱成像的结果如图 8 所示。与汽车模型的分析相一致, RIBS 越高, 目标轮廓及细节越清晰。斩波器的振动较弱, 且整个目标振动规律较为统一, 测量得到目标某一点的振动周期约为 80 Hz, 最大振动速度约为 5 mm/s, 目标表面的振动幅度在 10 μm 左右。由于该目标引起的最大频谱宽度较小, 在数据处理过程中频谱宽度取 100 kHz。图中明显可见目标表面存在的小孔信息及支持目标的金属杆。这两个目标的成像验证了外差探测对振动目标探测成像的可行性及有效性。

5 结 论

本文采用激光外差探测方式对振动目标进行

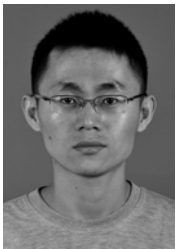
探测, 获取目标表面的振动特征频谱。指出振动目标形成的激光外差信号光电流为以差频频率为载频的相位调制信号, 可形成多普勒频移实时变化; 提出了频谱展宽占有比例的信号处理方式对特征频谱进行处理, 大大简化了数据采集处理过程, 并能有效消除单个峰值噪声的影响。通过实验测量了振动汽车模型和工作状态斩波器, 实验时以扫描振镜控制电压下降沿对 PCI8522 数据采集卡进行触发, 实现激光扫描和数据采集的同步。以 5 MHz 采样率获取 50 ms 数据段, 分析得到目标的振动特性频谱, 形成了目标的多普勒频谱图像。实验结果表明, 在 RIBS 为 0.7~0.9 时获取的图像更为清晰。振动多普勒频谱成像能够得到目标轮廓及位置信息, 在探测伪装目标领域具有良好的应用价值。

参考文献:

- [1] OH M S, KONG H J, KIM T H, *et al.*. Development and analysis of a photon-counting three-dimensional imaging laser detection and ranging (LADAR) system [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(5): 759-765.
- [2] 张海洋, 赵长明, 蒋奇君, 等. 1.06 μm 相干激光雷达目标多普勒信号探测[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 507-511.
ZHANG H Y, ZHAO CH M, JIANG Q J, *et al.*. Detection of Doppler signal of moving target using 1.06 μm coherent detection lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 507-511. (in Chinese)
- [3] KACHELMYER A L, KENNETH I S. Laser vibration sensing [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1995, 8(1): 3-28.
- [4] 李醒飞, 王驰, 向红标, 等. 光学外差干涉法检测微弱超声振动[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1158-1162.
LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1158-1162. (in Chinese)
- [5] BANKMAN I. Model of laser radar signatures of ballistic missile warheads [J]. *SPIE*, 1999, 3699: 133-137.
- [6] 武颖丽, 吴振森. 基于希尔伯特变化的微小振动激光多普勒信号处理[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 415-420.
WU Y L, WU ZH S. Micro-vibration laser Doppler signal processing based on Hilbert transform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 415-420. (in Chinese)
- [7] SCHULTZ K I, KCOHER D G, DALEY J A, *et al.*. Satellite vibration measurements with an auto-dyne CO₂ laser radar [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(12): 2349-2355.
- [8] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 383-396.
- [9] BURGETT R, SABATIER J M, ARANCHUK V. Carrier tracking and tunable passband filters for TDM-LDV mine detection [J]. *SPIE*, 2010, 7664: 1-10.
- [10] SHANG J H, HE Y, LIU D, *et al.*. Laser Doppler vibrometer for real-time speech-signal acquirement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 732-733.
- [11] TOTEMS J, JOLIVET V, OBARLEZ J P, *et al.*. Advanced signal processing methods for pulsed laser vibrometry [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(20): 3967-3979.
- [12] YANG F, HE Y, SHANG J, *et al.*. Development of an all-fiber heterodyne lidar for range and velocity measurements [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 713-716.
- [13] ARANCHUK V, LAL A, HESS C, *et al.*. Multi-beam laser Doppler vibrometer for landmine detection [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(10): 104302: 1-10.
- [14] LAL A K, ZHANG H, ARANCHUK V, *et al.*. Multiple-beam LDV system for buried landmine detection [J]. *SPIE*, 2003, 5089: 579-590.

- [15] 霍雷,曾晓东,安毓英,等.利用激光多普勒外差原理对振动物体测量及分析[J].激光技术,2011,35(5):600-603.
HUO L, ZENG X D, AN Y Y, *et al.*. Vibration measurement and analysis by means of laser Doppler heterodyne principle [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 600-603. (in Chinese)
- [16] 霍雷,曾晓东,刘兵.激光外差干涉技术在固体发动机振动中的应用[J].固体火箭技术,2012,35(1):139-142.
HUO L, ZENG X D, LIU B. Application of laser heterodyne interferometer in solid rocket motor vibration [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(1): 139-142. (in Chinese)
- [17] 姜振华,王挺峰,郭劲.“LPP-EUV”光源中的高功率CO₂激光监测与控制系统[J].中国光学,2013,6(4):544-550.
JIANG ZH H, WANG T F, GUO J. Monitoring and controlling system for high power CO₂ laser in “LPP-EUV” light source [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 544-550. (in Chinese)
- [18] 刘立生,张合勇,郭劲,等.用激光外差技术高精度测量目标速度[J].光学精密工程,2011,19(10):2366-2372.
LIU L SH, ZHANG H Y, GUO J, *et al.*. High precise measurement of target velocity using laser heterodyne technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2366-2372. (in Chinese)
- [19] RUCK B, LEWIS H, ROGOYSKI A. Demodulation schemes for vibrometers and associated effects on target classification [J]. *SPIE*, 1998, 3308: 151-162.

作者简介:



刘立生(1987—),男,山东聊城人,助理研究员,2009年于山东大学获得学士学位,2014年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事激光相干探测与光子计数方面的工作。E-mail: liuls@ciomp.ac.cn

导师简介:



郭劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1986年于长春工业大学获得学士学位,1989年、2007年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事光电总体、激光与物质相互作用、激光探测方面的研究。E-mail: guojin@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)