

文章编号:1001-5078(2007)10-1036-03

激光微多普勒探测运动目标复合振动的实验研究

原 帅,王学勤,盛美菊,王建华,张 骏
(烟台大学光电信息学院,山东 烟台 264005)

摘 要:建立了激光微多普勒效应探测系统,开展了激光微多普勒效应探测运动目标复合振动的实验研究。实验结果的频谱分析和时-频域的联合分析表明:利用激光微多普勒效应,可以有效地探测目标的复合振动,为目标的探测、分类和识别奠定了基础。

关键词:激光微多普勒效应;时-频分析;振动特征;平滑伪魏格纳分布

中图分类号:TN958.98;O438 **文献标识码:**A

Experimental Research on Laser Micro-Doppler for Detecting Complex Vibration of Moving Target

YUAN Shuai, WANG Xue-qin, SHENG Mei-ju, WANG Jian-hua, ZHANG Jun
(Institute of Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The experiment research on laser micro-Doppler effect for detecting complex vibration of moving target is developed. Frequency domain analysis and time-frequency joint analysis of experimental results show that the complex vibration of target can be effectively detected by laser micro-Doppler effect, and it lays the foundation of target detection, classification and recognition.

Key words: laser micro-Doppler effect; time-frequency analysis; vibration signature; smoothed pseudo Wigner-Ville distribution

1 引 言

当雷达与被测目标间存在相对运动时会产生多普勒频移,如果目标本身还存在振动或转动,则会对回波信号产生附加的频率调制,导致产生以目标整体多普勒频率为中心的边带,这种调制称为微多普勒现象^[1]。例如:行驶中的汽车或坦克表面由发动机引起的机械振动^[2],直升飞机螺旋桨的转动,轮船上雷达天线的旋转,甚至人走路时双腿和双臂的摆动^[3],都可以看作是一种微多普勒信号。微多普勒现象能帮助我们确定目标的许多特性,它在目标的探测、分类、识别领域具有很大的应用潜力^[4-5]。本文利用 Michelson 动态干涉仪技术建立了一套能够有效地探测复合振动目标的微多普勒效应的实验系统,利用时-频分析方法对所得信号进行了分析,实验结果表明:该系统能较好地获取复合振动目标的微多普勒特征。

2 实验原理与系统

实验基本原理如图 1 所示,激光束首先经过由

短焦距透镜和小孔组成的空间滤波器,以去除高次杂散光的干扰。滤波后的激光经中心分束器后,一部分转向与传动平台运动方向垂直的参考臂方向,经固定的参考反射器反射;经中心分束器透射的光束经目标反射器反射。被参考反射器反射的光束和由目标反射器反射的光束经中心分束器后,在探测器视轴方向的一定范围内形成干涉场。探测器前是一个由透镜和小孔组成的角度分辨系统。当传动平台前后运动时,两束光的相位差随时间变化,就会使干涉场按一定的频率明暗变化^[6-7]。如果振动反射器在随传动平台运动的同时,自身还存在微小的振动,振动方向与平动方向相同或在平动方向上存在不为零的振动分量,则会对变化的干涉场产生附加的调制。受反射器平动和振动两方面共同调制的变

基金项目:国防预先研究基金资助项目。

作者简介:原 帅(1981-),男,硕士研究生,主要从事光电信息获取与处理技术的研究。

收稿日期:2007-04-07

化的干涉场通过探测器(光电倍增管),转化为与干涉场同频率变化的光电信号,该系统中干涉场的变化是由测量臂的位移量引起的。

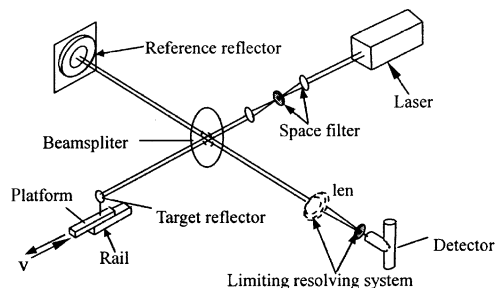


图1 微多普勒效应探测系统实验原理图

Fig.1 schematic diagram of micro-Doppler effect detection system

3 实验结果与分析

3.1 微多普勒信号结果与分析

变化的干涉场通过探测器转化为光电信号,并被送到数字存储示波器(Tektronix TDS3052),通过 GPIB(General Purpose Instrument Bus)接口与计算机相连,实现信号的采集。本实验中采用伺服电机带动传动平台及反射器作低速匀速运动,并采用频率及振幅可控的振动体带动反射器作简谐振动。伺服电机转动与传动平台运动产生的多普勒频率一一对应,实验中取的多普勒频率均为 2kHz。为了更好地研究微多普勒效应探测目标的复合振动,实验中还与单频微多普勒数据进行了对比分析,两组数据的采集时间均为 40ms,每组采集 10000 个点。

3.1.1 复合振源

复合振源是通过两个信号叠加产生的,如图 2(a)所示是将 100Hz 信号与 200Hz 信号叠加而成的。从图中可以看出复合信号的周期为 10ms,即频率为 100Hz。叠加信号图 2(a)的频谱分析如图 2(b)所示,图中 100Hz 和 200Hz 为主要成分。

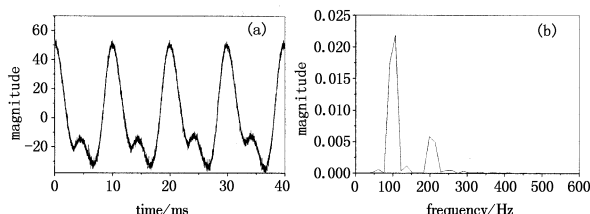


图2 100Hz 信号与 200Hz 信号的叠加信号(a)

及其频谱分析图(b)

Fig.2 the mixed signal of 100Hz and 200Hz (a) and its frequency domain analysis(b)

3.1.2 微多普勒信号实验结果与分析

图 3(a)给出了探测复合振动目标所得微多普勒信号图。可以看出,信号反映出了与目标复合振动频率相一致的疏密变化,但是在每一个疏密变化周期内,还有一个小的疏密变化。由于从信号的频

域中可以观察到多普勒频移和微多普勒频移,因此我们首先对信号进行 Fourier 变换(FFT)。图 3(b)给出了信号的频域特征图,表明振动目标的信号频谱含有丰富的频率成分。由于目标的微小振动,在信号频域产生了以目标整体多普勒频率为中心的频率展宽。图中可以看出在 2kHz 左右频率成分最丰富,这与我们之前设定的 2kHz 的多普勒频率相一致。从图中还可以看出复合振动目标引起的微多普勒信号频带宽度大约为 3kHz。为了更好地说明信号频率随时间的变化情况,我们引入了时间-频率域联合描述的方法^[9]——时-频分析方法来分析含有时变微多普勒信息的信号。时-频变换包括线性时-频变换和双线性时-频变换^[10]。短时傅里叶变换(STFT)是一种典型的线性变换,它的时间分辨率和频率分辨率满足不确定原理,因此不能同时获得高的时间分辨率和频率分辨率,即时-频分辨率差,信号特征在时-频图上被展宽,不集中。Wigner-Ville 分布(WVD)是一种最基本、也是应用最多的一种双线性时-频分布,它被认为能够提供最佳的时间和频率分辨率,并且满足实值性、时移和频移不变性等许多期望的数学性质,但是它受到严重的信号交叉项的干扰,使得信号可读性差,甚至无法从中分辨出信号的特征。因此,如何减小交叉项就成了 WVD 性能改进的主要目标。这里我们采用一种能够较好抑制交叉项的 WVD 的变形分布——平滑伪 Wigner-Ville 分布(SPWVD)^[11]。WVD 定义为:

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

SPWVD 采用加窗函数的方法抑制交叉项,采用窗函数 $g(u)h(\tau)$, 即对 u 和 τ 分别加 $g(u)$ 和 $h(\tau)$ 。这样改造得到的 Wigner-Ville 分布称作平滑伪 Wigner-Ville 分布:

$$\text{SPWVD}_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u) h(\tau) z\left(t - u + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - u - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \quad (2)$$

式中, $g(u)$ 和 $h(\tau)$ 是两个实的偶窗函数,且 $h(0) = G(0) = 1$ 。通过对大量微多普勒效应仿真和实验数据的分析表明,SPWVD 虽然由于窗函数的作用使其分辨率较 WVD 有所降低,但它仍然具有很高的时-频分辨率和时-频聚集性,并且通过合理地调整窗函数的大小,可以使信号的时-频表示基本上不受交叉项的影响,信号可读性增强,能够从中有效地提取出信号的微多普勒特征,因此本文采用了 SPWVD 对信号进行时-频分析。

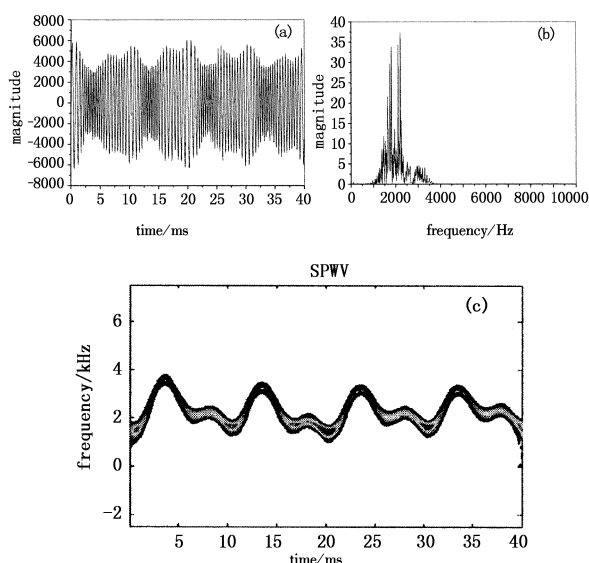


图3 复合振动目标的微多普勒信号实验结果分析图

(a)微多普勒信号图;(b)频域特征图;

(c)时-频分布图

Fig. 3 the micro-Doppler signal's result analysis of complex vibrating target

(a)micro-Doppler signal;(b)frequency domain characteristic;

(c)time-frequency distribute

从图3(c)中我们可以清晰地看到信号频率随时间的变化情况,其频率随时间变化的趋势与图3(a)中信号的疏密变化趋势一一对应,即频率高信号变化就快,信号线就密;反之亦然。而且其形状与复合振源的波形相似。从图可以看出信号频率变化的周期约为10ms,这与我们在实验中选择的复合振源的周期是一致的。也就是说,从时-频图中不仅可以得到振动目标的振动周期,还可以得到振动目标的波形,并且得出信号的频带宽度约为3kHz,这与频域图中得出的结果也是一致的。

3.2 和单频振动目标实验结果的比较

为了验证复合振动目标微多普勒效应的有效性,我们选取了单频振动目标的微多普勒效应进行比较,如图4所示。

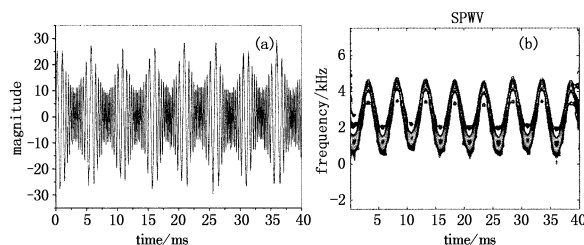


图4 单频振动目标的微多普勒信号实验结果分析图

(a)微多普勒信号图;(b)时-频分布图

Fig. 4 the micro-Doppler signal's result analysis of single-frequency vibrating target

(a)micro-Doppler signal;(b)time-frequency distribute

图4(a)给出了探测单频振动目标所得微多普勒时域信号图,其中振动目标以200Hz频率振动。从图中可以看出,信号反映出了与目标振动频率相

一致的疏密变化。图4(b)中我们可以清晰地看到信号频率随时间的变化情况,频率与时间近似呈余弦关系,且信号频率变化的周期约为5ms,由于频率变化的周期对应于目标振动的周期,可知目标振动周期约为5ms,这与我们在实验中实际设定的200Hz的振动频率是一致的。从时-频图中还可以得出信号的频带宽度约为4kHz。

通过单、双频振动目标的微多普勒实验结果的对比,说明通过对微多普勒效应的分析,同样可以探测复合振动目标的频率特征。

4 结论

本文建立了基于 Michelson 动态干涉仪技术的光波段运动目标复合振动的微多普勒效应探测系统,对所得信号进行了频谱和时-频域的联合分析,证明了时-频分析方法适合于分析微多普勒信号。实验结果表明利用激光微多普勒效应可探测运动目标的复合振动特征,有利于目标的分类与识别。

参考文献:

- [1] Victor C Chen. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics; a review [C]//Proc. SPIE, 2003, 5102: 240 - 249.
- [2] Eugene F Greneker, Jonathan L Geisheimer, David Asbell. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies [C]//Proc. SPIE, 2001, 4374: 1 - 9.
- [3] Li J, Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. IEEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 284 - 291.
- [4] Lei Jiajin, Lu Chao. Target classification based on micro-Doppler signatures [J]. IEEE International Radar Conference, 2005, 5: 179 - 183.
- [5] Victor C Chen. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features [J]. IEEE International Radar Conference, 2005, 5: 348 - 353.
- [6] Liu Zeng-dong, Feng Wei-wei, Liu Mei-juan, et al. New type of Doppler modulating technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 556 - 559. (in Chinese)
- [7] Qi Hong-xing, Liu Zeng-dong, Jiang Rong-xi. A Doppler modulator based upon Michelson-Morley dynamic interferometer [J]. Journal of Yantai University, 2003, 16(4): 248 - 251. (in Chinese)
- [8] Victor C Chen, Ronald D Lipps. Time frequency signatures of micro-Doppler phenomenon for feature extraction [C]//Proc. SPIE, 2000, 4056: 220 - 226.
- [9] Eugene F Greneker, Vincent B Sylvester. Use of the envelope detection method to detect micro-Doppler [C]//Proc. SPIE, 2003, 5077: 167 - 174.
- [10] Chen V C, Li F, Ho S - S. Analysis of micro-Doppler signatures [C]//Proc. SPIE, 2003, 150(4): 220 - 226.
- [11] Zhang Xian-da, Bao Zheng. Non-stationary signal processing and conduction [M]. Beijing: National Defence Industry Press. (in Chinese)