

文章编号: 0258-7025(2010)05-1222-05

# 1550 nm 激光相干雷达探测运动目标的 微多普勒效应

孙 洋<sup>1</sup> 张 骏<sup>1</sup> 范亚夫<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 烟台大学光电信息学院, 山东 烟台 264005  
<sup>2</sup> 兵器工业第五二研究所烟台分所, 山东 烟台 264000)

**摘要** 在建立 1550 nm 激光相干雷达探测系统的基础上,对运动目标微多普勒效应的探测进行实验研究。利用小波多尺度分析将实验所得到的时域信号分解为不同尺度下的信号成分,对包含微多普勒特征的信号成分进行重构(逆小波变换),从而获取了目标的微多普勒特征。为了更好地分析目标运动特征和估计运动参数,使用短时-频分析方法对获取的信号做了进一步的处理。实验结果分析表明,该系统可有效地探测运动目标的微多普勒信息,且多尺度分析方法和短时-频分析方法的联合应用可有效地提取运动目标的微振动信息。

**关键词** 信号处理;微多普勒效应;激光相干雷达;多尺度分析;短时-频分析

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1222

## Detecting Micro-Doppler Effect of Micro-Motion Dynamics by Laser Coherent Radar of 1550 nm

Sun Yang<sup>1</sup> Zhang Jun<sup>1</sup> Fan Yafu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China  
<sup>2</sup> Research Institute 52 in Military Industry, Yantai Substation, Yantai, Shandong 264000, China)

**Abstract** A system of detecting micro-Doppler effect based on laser coherent radar worked in the 1550 nm wavelength is presented, and experimental research on micro-Doppler effect of detecting the dynamic target is developed. The time domain signal of the returns is decomposed into a set of components that are represented by different wavelet scales. The micro-Doppler features are extracted by sorting the components that are associated with the vibrational/rotational motions of a target and reconstructed by inverse wavelet transform. After the extraction of micro-Doppler features, time-frequency analysis is employed to analyze the oscillation and to estimate the motion parameters. The analysis of experiment results show that micro-Doppler information of the dynamic target can be detected effectively by this system, and tiny vibration can be acquired effectively by analysis of multi-resolution analysis and time-frequency analysis of short-time.

**Key words** signal processing; micro-Doppler effect; laser coherent radar; multi-resolution analysis; time-frequency analysis of short-time

### 1 引 言

目标或目标结构的机械振动或转动对雷达回波信号产生频率调制,这种振动或转动所引起的调制被称为微多普勒现象<sup>[1~3]</sup>。例如由于内部发动机引起汽车或坦克表面的机械振动<sup>[4]</sup>,直升机表面的机械振动和螺旋桨的转动,以及人走路时双臂的摆

动<sup>[5]</sup>,都具有微多普勒特征。微多普勒效应提供了特殊的目标特征,在目标特征分析上提供了一种新的途径,并且对它的研究和开发在激光雷达<sup>[6~8]</sup>目标的探测、分类和识别领域具有很大的应用潜力<sup>[9,10]</sup>。激光相干雷达探测由于测量精度高、抗干扰能力强等优点具有很好的应用前景。本文建立波

收稿日期:2009-06-30;收到修改稿日期:2009-09-07

作者简介:孙 洋(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光微多普勒信号获取与处理技术方面的研究。

E-mail: sunyang6896@sina.com

导师简介:张 骏(1965—),男,博士后,教授,主要从事光电信息获取与处理技术方面的研究。E-mail: jzhang@ytu.edu.cn

长为1550 nm的激光相干雷达系统,并利用该系统对探测运动目标的微多普勒特征进行实验研究。分析实验结果时,采用了小波变换中的多尺度分析方法<sup>[11]</sup>,从回波信号中提取出运动目标的微多普勒特征,再利用短时-频分析的方法,进一步揭示运动目标的微多普勒特征,为目标的分类和识别提供了重要的信息。

## 2 实验原理与系统

### 2.1 激光微多普勒效应的测量原理

在相干雷达中,目标回波信号的相位对距离的改变相当敏感。在雷达径向距离上半个波长的变化就会引起回波信号 $360^\circ$ 的相位改变。由于多普勒频移可以反映相位随时间的变化情况,可以通过回波信号的多普勒频移来探测和识别目标表面的振动特征。

当被测目标通过步进电机前后运动时,两束光的相位差随时间变化,会产生一个特定频率的多普勒频移<sup>[12]</sup>。在目标运动的同时加入微小的振动,会在多普勒频移的基础上产生一个附加的频率调制。由平动和振动共同调制的干涉场,通过探测器转化为干涉场同频率变化的光电信号。

实验中设定平动和振动均与光束照射的方向一致,从而后续的原理采用标量推导<sup>[13]</sup>。设初始时刻目标与探测器间距为 $r_0$ ,目标的整体平动速度为 $v$ ,在目标整体平动的同时加上一个微小的简谐振动,其振动状态可表示为

$$D_t = d\sin(2\pi ft), \quad (1)$$

式中 $D_t$ 表示振动目标偏离平衡位置的位移, $d$ 为振幅, $f$ 为振动频率。则任意时刻探测器与振动目标的距离为

$$R(t) = r_0 + vt + D_t = r_0 + vt + d\sin(2\pi ft). \quad (2)$$

所以,探测器接收到的信号为

$$S(t) = \rho \exp\{j[2\pi f_c t + 4\pi R(t)/\lambda_c]\} = \rho \exp\{j[2\pi f_c t + \varphi(t)]\}, \quad (3)$$

式中 $\rho$ 为振动目标的反射率函数,与角度有关; $\varphi(t) = 4\pi R(t)/\lambda_c$ ,为相位函数。

因为相位对时间的微分是角频率,所以对相位函数作时间微分即可得到由平动引起的多普勒频移和由振动引起的微多普勒频移

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2v}{\lambda_c} + (4\pi/\lambda_c) df \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

式中第一项 $2v/\lambda_c$ 为由于目标作平动引起的多普勒频移;第二项 $(4\pi/\lambda_c) df \cos(2\pi ft)$ 为由振动引起的微多普勒频移。这为研究目标的运动速度和振动状态等目标特征提供了依据。

### 2.2 实验系统

实验原理如图1所示。实验中使用的1550 nm波长光源是上海拜安信息科技有限公司的DS3200系列台式光源,谱宽最大值为0.04 nm,输出功率最大值为10 mW。光源发出的光束首先经过一个10/90耦合器C1,其中90%的光通过隔离器进入到光发射端,其余10%的光连接到另外一个10/90耦合器C2的10%端,作为干涉的参考光。从光发射端发出光束,照射到被测目标(物体沾有锡箔纸,相对具有较好的光散射性)。目标的散射光通过光收集系统进行收集,并耦合进光纤。光接收端与耦合器C2的90%端连接,散射光和参考光产生干涉,通过光纤耦合探测器(型号:DET01CFC,响应带宽为2 GHz)将光干涉信号转化为电信号,输出的电信号被送到数字存储示波器(Tektronix TDS 3052),示波器和计算机间通过 GPIB 接口相连,由计算机进行数据的采集和处理工作。实验采用步进电机带动传动平台及被测目标做低速匀速运动,并采用频率及振幅可控的振动体带动目标做简谐振动。为了更好地研究微多普勒特征,在同样的实验条件下采样了被测目标平动(仅存在平动条件)与振动(同时存在平动和振动)两种情况下的数据,进行对比分析。

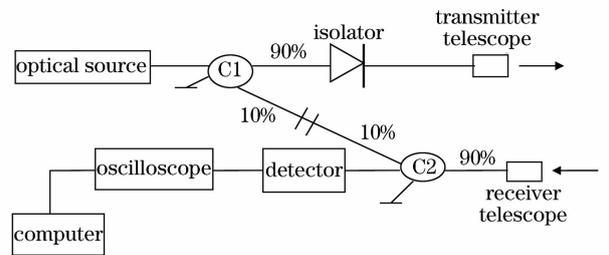


图1 实验原理图

Fig. 1 Experimental setup

## 3 实验结果和分析

目标平动和振动的实验数据分别如图2(a),(b)所示,其中两组数据的采样时间均为40 ms,每组采集10000个点,实验中的振动频率为100 Hz。

### 3.1 多尺度分析

为了能将获取信号中的微多普勒特征分离出来,采用小波分析中的多尺度分析方法,对信号进行分解和重构。多尺度分析(Multi-resolution

analysis)<sup>[14,15]</sup>是 Mallat 于 1989 年提出的, Mallat 算法信号分解及重构的过程可直观地用图 3 表示,

其中  $c_0, c_1, c_2, c_3$  等为各尺度下的平滑信息,  $d_1, d_2, d_3$  等代表不同尺度下的细节信息。

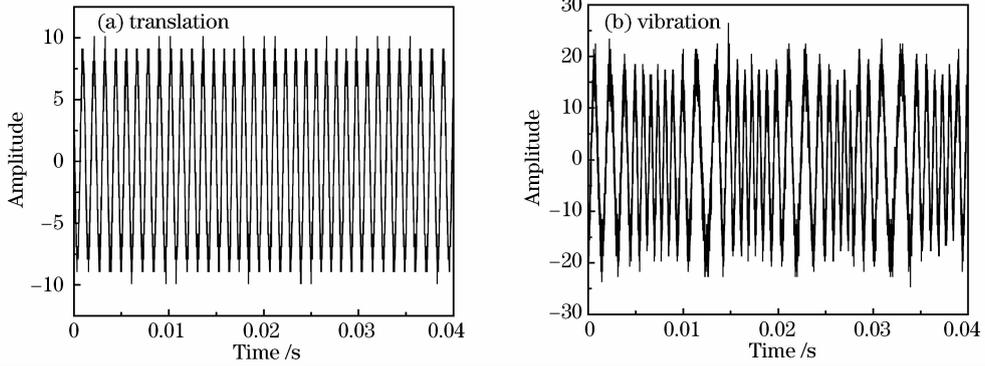


图 2 实验数据

Fig. 2 Experimental data

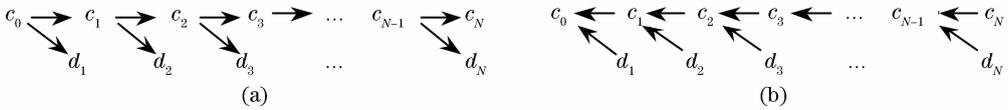


图 3 Mallat 小波分解(a)与重构(b)示意图

Fig. 3 Mallat wavelet decomposition (a) and reconstruction (b)

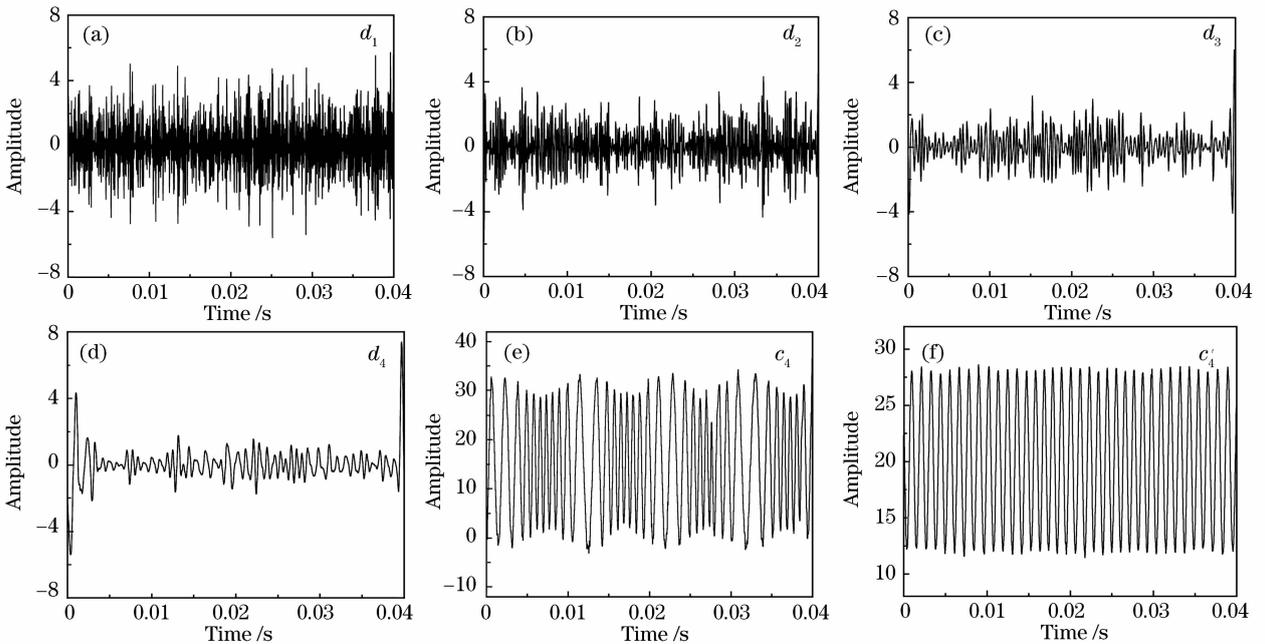


图 4 对信号进行 4 个尺度下小波分解与重构

Fig. 4 Different signal components from four-level wavelet decomposition and reconstruction

对获取的目标振动的回波信号进行 4 个尺度下的分解与重构,得到 4 个尺度下的细节信息  $d_1, d_2, d_3, d_4$  和第 4 尺度下的平滑信息  $c_4$ ,如图 4 所示。被测目标在受到平动调制的基础上,同时还受到振动的调制,因而回波信号应该反映出与目标振动频率相一致的疏密变化,结果在图 4(e)中得到验证。对获取的目标平动的回波信号同样采用多尺度分析

方法进行分析,结果如图 4(f)所示。被测目标仅受到具有恒定速度的平动的调制,因而从图 4(f)中可以看出目标回波信号具有基本恒定的振幅和变化频率。

### 3.2 时-频分析

为了更好地提取目标信号中所包含的微多普勒特征,采用时-频分析<sup>[16]</sup>的方法对获取的回波信号

进行处理分析。时频分析的方法很多,并且效果也各不相同,所以经过大量的微多普勒实验数据分析和对比研究,采用一种能够较好抑制交叉项的 Wigner-Ville 分布 (WVD) 的变形分布——平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD)<sup>[17]</sup>。SPWVD 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,并且能够从中有效地提取出目标信号的微多普勒特征。

分别对目标的平动  $c'_4$  信号与振动  $c_4$  信号做 SPWVD 的时-频分析,结果如图 5(a),(b) 所示。从图 5(a) 可见平动目标的时频图中仅含有一个频率成分,表明仅受平动影响的目标信号频率成分单一,恒定的平动速度使干涉以恒定的频率变化。频率的

位置反映了由平动引起的多普勒频移,所以可通过确定频带的中心位置来计算目标的平动速度。另外频带中心约在 900 Hz,由(4)式第一项的多普勒频移公式推断出目标的平动速度约为 0.70 mm/s。

从图 5(b) 可以清晰地看到信号频率随时间的变化情况,并且由于目标的振动,在信号频域产生了以目标整体多普勒频率(约 900 Hz)为中心的频率展宽。图中信号频率变化的周期约为 10 ms,频率变化的周期对应于目标振动的周期,可知目标振动的周期约为 10 ms,这与实验中设定的 100 Hz 的振动频率是一致的。从图中还可以看出信号的频带宽度约为 1000 Hz,利用(4)式第二项微多普勒频移公式推断出目标振动的振幅约为 0.62 mm。

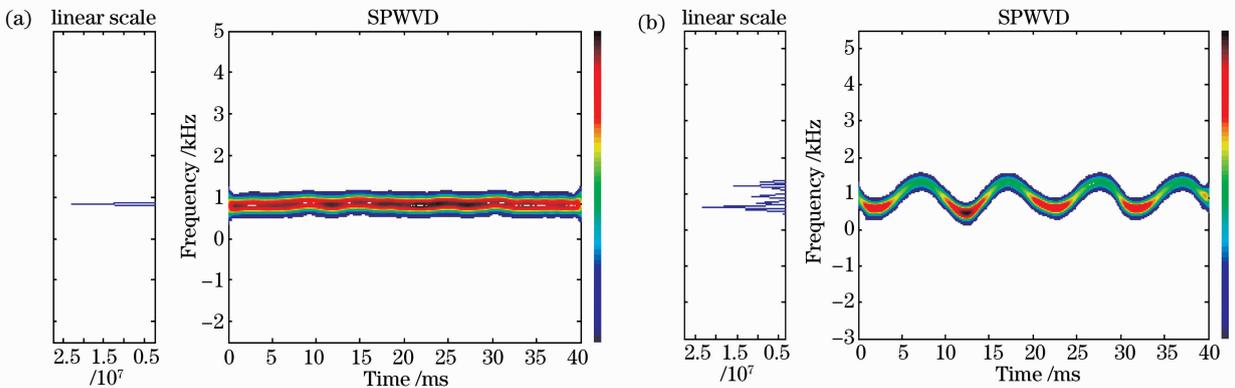


图 5 信号时-频特征。(a) 平动目标;(b) 振动目标

Fig. 5 Time-frequency characteristics of the signal from translational target

(a) translational target; (b) vibrational target

## 4 结 论

在建立了工作波长为 1550 nm 的激光相干雷达系统的基础上,对探测运动目标微多普勒效应进行了实验研究。采用小波多尺度分析方法,获取了目标运动的微多普勒信息,利用基于 SPWVD 的时-频分析方法对获取信号进行进一步处理,成功提取了由目标振动引起的微多普勒特征,同时推断出目标的运动参数。实验证明了该系统用于探测运动目标微多普勒效应的可行性,也证明了时频分析方法用于分析微多普勒信号的有效性。该研究为实际目标的探测、分类和识别方面的应用提供了一种新的途径。

## 参 考 文 献

- Victor C. Chen. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics; a review [C]. *SPIE*, 2003, **5102**:240 ~ 249
- V. C. Chen. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform [C]. *Proc. 10<sup>th</sup> IEEE Workshop on*

*Statistical Signal and Array Processing*, 2000, 463~466

- V. C. Chen, H. Ling. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. Boston: Artech House, 2002. Chap. 8
- Lei Jiajin, Lu Chao. Target classification based on micro-Doppler signatures [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005, **5**:179 ~ 183
- Victor C. Chen. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005, **5**:348 ~ 353
- Zhang Haiyang, Zhao Changming, Jiang Qijun *et al.*. Laser detection on micro-Doppler effect in coherent radar [J]. *Chinese J. 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
- Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang *et al.*. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):889~892  
马宗峰,张春熹,张朝阳等.光学外差探测信噪比研究[J].*光学学报*, 2007, **27**(5):889~892
- Liu Kexiang, Xu Rongguo, Wu Zhensen *et al.*. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):206~212  
刘科祥,许荣国,吴振森等.外场目标激光散射特性测量及分析[J].*中国激光*, 2006, **33**(2):206~212

- 9 Eugene F. Greneker, Jonathan L. Geisheimer, David Asbell. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies [C]. *SPIE*, 2001, **4374**:1~9
- 10 J. Li, H. Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [C]. *IEEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, **150** (4):284 ~ 291
- 11 T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough. Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition [ R ]. Technical Memorandum DRDC Ottawa, 2004, TM2004-170
- 12 Jiang Feihong, Wang Xueqin, Yuan Shuai. A detection system for laser micro-Doppler effect [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3):199~202  
江飞虹,王学勤,原 帅. 激光微多普勒效应探测系统[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3):199~202
- 13 Victor C. Chen, Ronald D. Lipps. Time frequency signatures of micro-Doppler phenomenon for feature extraction [ C ]. *SPIE*, 2000, **4056**:220~226
- 14 S. G. Mallat. A theory for multi-resolution signal decomposition; the wavelet representation [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal.*, 1998, **11**(7):674~693
- 15 I. Daubechies. The wavelets transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1990, **36**(5):961~1005
- 16 V. C. Chen, F. Li, S. S. Ho. Analysis of micro-Doppler signatures [C]. *SPIE*, 2003, **150**:220~226
- 17 Zhang Xianda, Bao Zheng. Non-Stationary Signal Processing and Conduction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001  
张贤达,保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2001