

运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取

董晶 陈蕊 李小龙 张骏

(烟台大学光电信息学院, 山东烟台 264005)

摘要 在建立口径为 200 mm, 波长为 1550 nm 的全光纤型激光相干雷达探测系统的基础上, 展开对运动目标微多普勒效应的实验研究。对实验获取信号进行频谱分析和时域-频域联合分析的结果表明, 时间-频域联合分析方法可有效地提取运动目标的微多普勒效应特征, 从而得到目标在 20~2000 Hz 的振动特征。利用这些特征可区分和识别不同运动目标, 为目标的探测、分类和识别提供了一条有效的途径。

关键词 探测器; 微多普勒效应; 振动目标; 激光相干探测; 时频分析; 特征提取

中图分类号 TN958.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1014001

Laser Coherent Detection of Moving Target Based on Micro-Doppler Effect

Dong Jing Chen Rui Li Xiaolong Zhang Jun

(Institute of Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract A laser coherent detection system, operating at 1550 nm and all fiber designed, is set up and a large aperture lens of 200 mm is used to collect scattered light. Using this system, the micro-Doppler effect of moving target is detected. The results of the signal analysis in spectrum analysis and time-frequency analysis show that time-frequency analysis is effectively to the feature extraction of micro-Doppler signal of moving target, which is time-varying. The different targets of 20~2000 Hz can be identified and classified by these characteristics. It provides an effective method of the feature extraction, classification and recognition of the target.

Key words detectors; micro-Doppler effect; vibration target; laser coherent detection; time-frequency analysis; feature extraction

OCIS codes 040.6808; 040.3060; 290.5820

1 引言

当被测目标与探测器之间存在相对运动时会产生多普勒频移, 加上目标体本身的微动(如振动或者转动)将会对回波信号产生附加的频率调制, 其结果将出现以目标自身振动的多普勒频率为中心的频带展宽, 这种调制称为微多普勒效应^[1]。由于激光微多普勒测量技术具有非接触测量、时间和空间分辨率高、测量范围广、测量精度高、动态响应快等优点, 使其受到各方面的关注并做了大量的理论分析和实

验研究, 取得了显著的成果。比如国外的一些研究机构对行驶中的汽车或坦克表面由于发动机运转引起的机械振动^[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]等产生的微多普勒效应做了研究分析。微多普勒现象能确定目标的诸如电磁特性、几何特性和运动特征在内的许多特征, 它在目标的探测、分类和识别领域具有很大的应用潜力^[4~8]。

本文在建立 $\Phi 200$ mm 口径, 波长为 1550 nm

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-06-26

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2011FM007)资助课题。

作者简介: 董晶(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光相干雷达技术方面的研究。E-mail: jding-007@163.com

导师简介: 张骏(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光相干雷达技术方面的研究。

E-mail: jzhang@ytu.edu.cn(通信联系人)

激光微多普勒相干雷达系统的基础上,开展运动目标的探测和特征提取分析。

2 实验原理及光学系统设计

本文用参考光束和被目标振动调制的信号光束混频以获取差频信号的方法实现对目标的振动引起的微多普勒特征的提取与分析。

2.1 实验原理

实验系统如图 1 所示,由光纤激光器发出的光经过 2×2 的定向光纤耦合器(10%/90%)C1,其中 90% 的输出光束作为信号光。信号光束经过铽钇共掺高功率光纤放大器(EYDFA)将光功率放大后通过发射端照射到待测目标上。目标的机械振动将会对信号光束产生相位调制,其结果是信号光将会产生一个恒定的微多普勒频移,信号光和参考光之间形成一差频。目标所散射的光束理所当然地携带了与目标振动相关的信息,能反映目标的振动特征。利用 $\Phi 200$ mm 的大口径反射式望远镜系统收集目标表面的散射光。然后通过耦合透镜将散射光耦合进光纤,光纤传输到光纤耦合器 C2 的 90% 端。而从光纤耦合器 C1 的 10% 端输出的参考光经光纤传输后通过耦合器 C2 的 10% 端。经过耦合器 C2 后,参考光和信号光在探测器的光频面上产生干涉,干涉光信号经过光电转换后输出并通过示波器显示。通过信号采集卡和编程后将示波器所显示的信号读入计算机进行处理。

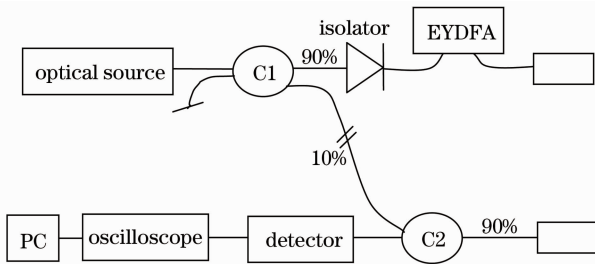


图 1 激光相干探测系统的光学设计简图
Fig. 1 Dchematic of the optical part of the laser coherent detection system

2.2 散射光收集装置

实验中采用大口径反射式望远镜作为收集装置,其主镜口径为 200 mm,焦距 1000 mm,焦比 $F/5$,副镜与主光轴的夹角为 45° ,采用椭圆形设计,其尺寸大小由主镜 L1 在调焦筒处 45° 角方向上的投影尺寸决定。这样在目镜筒看到副镜 M 的投影是一正圆。为了追求最好的遮光比,副镜有严格的尺寸大小要

求。激光光斑经散射后,散射光经过主镜 L1 反射聚焦,反射光经副镜 M 二次反射聚焦后进入调焦筒。在光线会聚的位置放置耦合透镜 L2,将光线再次聚焦后耦合入光纤,经过传输后可跟参考光发生干涉。系统光路部分采用全光纤设计,使系统更加紧凑,而且采用 1550 nm 的红外光源,减少周围环境光线的干扰。

3 实验结果与分析

目标振动所引起的多普勒效应的作用是对信号进行相位的调制。物体由于做正弦振动产生的多普勒和微多普勒频移为^[9]

$$f = \frac{2}{\lambda_c} [v + 2\pi D f_m \cos(2\pi f_m t) \cos \beta \cos \alpha_p] = \frac{2v}{\lambda_c} + \frac{4\pi}{\lambda_c} D f_m \cos(2\pi f_m t) \cos \beta \cos \alpha_p, \quad (1)$$

式中 D 为正弦振动振幅, f_m 为振动频率, λ_c 为激光波长, v 为目标运动速度, α_p 和 β 为振动点到探测器的仰角和方位角。式中第一项为物体平动产生的多普勒频移,第二项是物体自身的振动产生的微多普勒频移。

实验中以不同振动频率的正弦振动作为振动源。图 2(a)所示的是目标振动频率为 400 Hz 时探测系统测量得到的信号变化。经过多尺度小波分解和重构,滤除了高频成分,信号变得较为平滑,可以清楚地反映振动物体有规律的振动特征,如图 2(b)所示。

图 3 是对滤波后的信号做频谱分析。从图中可以看出,信号在 400 Hz 附近出现明显的峰值,与所加载的频率很好地吻合。

上边的频谱分析可得到信号的频率成分,可是却无法得知信号的频率随时间的变化情况。时变微多普勒信号分析需要获取信号频率随时间的变化信息。这就需要通过时域-频域联合分析的方法分析振动产生的微多普勒时变信号。时频分析的方法主要有线性和双线性两种。短时傅里叶变换(STFT)是常用的线性变换,可是受到不确定原理的限制,不能同时获得较高的时间分辨率和频率分辨率,信号的特征在时频图上被展宽。本文应用双线性时频变换 Wigner-Ville(WV)变换,它可提供最佳的时频分辨率,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,但是受到严重的交叉项的干扰,信号的可读性差。图 4 为经过 WV 变换后的时频图。

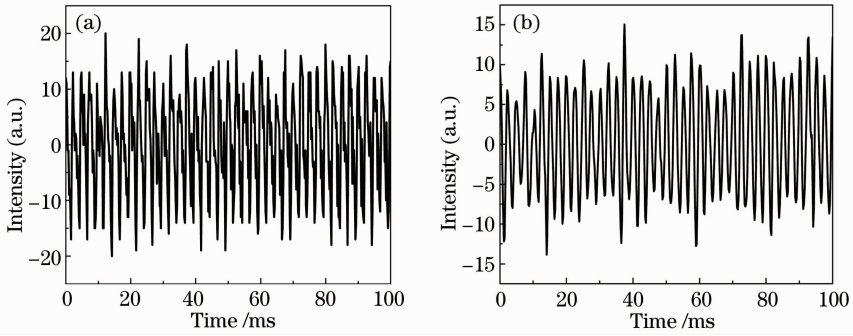


图 2 振动目标的信号。(a)振动目标的回波信号;(b)滤波处理后的振动目标散射信号

Fig. 2 Signal of vibratory target. (a) Return signal of vibratory target; (b) denoised scattering signal of vibratory target

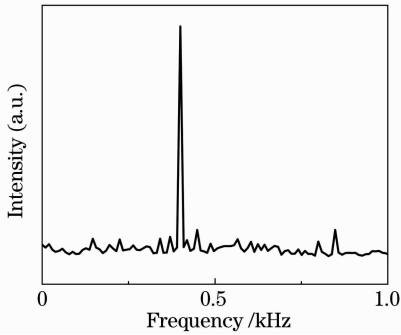


图 3 信号的傅里叶频谱

Fig. 3 Fourier spectrum of signal

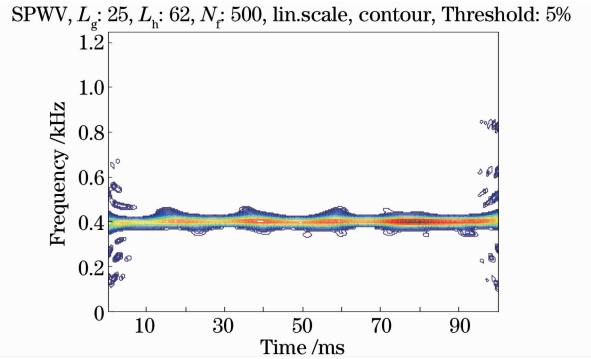


图 5 振动信号的 SPWV 变换

Fig. 5 SPWV transform of vibratory signal

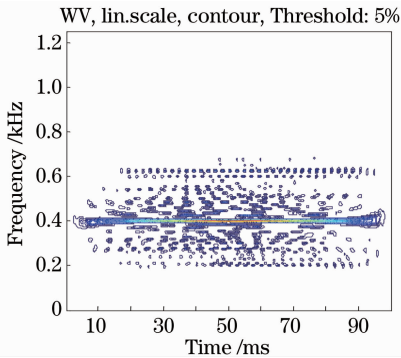


图 4 振动信号的 WV 变换

Fig. 4 WV transform of vibratory signal

WV 变换受到严重的交叉项的干扰。由于交叉项是振荡的,可将其采用加窗函数平滑的方法进行抑制,这种方法称为伪 Wigner-Ville(SPWV)变换。不过这种方法带来的不足是 SPWV 分布不能满足 WV 分布中的许多性质,比如边缘性质。窗函数的使用使得 SPWV 分布和 WV 分布相比分辨率有所降低,但仍然具有很高的时频聚焦性和时频分辨率。通过调整窗函数,可使信号基本不受交叉项的干扰,信号可读性增强。图 5 为经过 SPWV 变换后的时频图。

应用双线性时频分布解决实际问题的过程中存

在一个关键性的问题即信号的可读性,这意味着双线性时频分布应该有很好的时频聚焦性,可其存在固有的交叉项干扰的缺点,并且只能抑制,没法消除。为此人们研究了许多方法来抑制交叉项的干扰,重排则是其中之一。重排方法是对信号在时频平面内的能量分布情况做重新调整,改善信号分量聚集的尖峰。

图 6 是重排伪 Wigner-Ville(RSPWV)变换后的时频图,重排后的时频图不再是双线性的,可依旧满足时移和频移不变性,并且具有非常好的时频聚焦性。

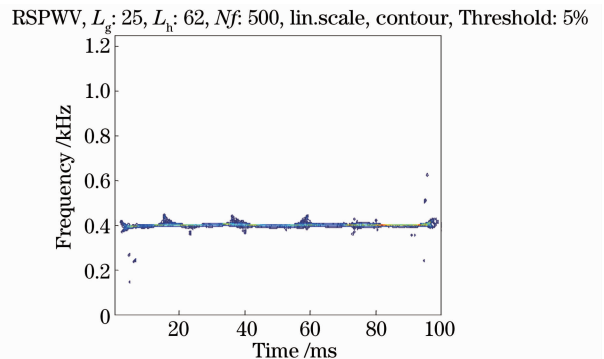


图 6 振动信号的 RSPWV 变换

Fig. 6 RSPWV transform of vibratory signal

4 结 论

在建立 200 mm 口径 1550 nm 波长的全光纤运动目标激光微多普勒效应相干雷达探测系统的基础上,开展了对运动目标微多普勒效应的实验研究。对振动调制的回波信号做时域和频域内的分析处理,成功地提取了振动产生的微多普勒特征。实验结果表明,运动目标振动产生的微多普勒特征可用于目标探测、分类和识别。

参 考 文 献

- 1 V. C. Chen. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review[C]. *SPIE*, 2003, **5102**: 240~249
- 2 E. F. Greneker, J. L. Geisheimer, D. Asbell. Extraction of micro-Doppler data from vehicle targets at x-band frequencies [C]. *SPIE*, 2001, **4374**: 1~9
- 3 J. Li, H. Ling. 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 J. Lei, C. Lu. Target classification based on micro-Doppler signatures [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005, 179~183
- 5 V. C. Chen. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features [C]. *IEEE International Radar Conference*, 2005. 348~353
- 6 Chen Xingyong, Liu Yongxiang, Li Xiang *et al.*. The micro-Doppler feature extraction of radar target[J]. *Signal Processing*, 2007, **23**(2): 222~226
陈行勇, 刘永祥, 黎 湘 等. 雷达目标微多普勒特征提取[J]. *信号处理*, 2007, **23**(2): 222~226
- 7 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
- 8 Sun Yang, Zhang Jun, Fan Yafu. Detecting micro-Doppler effect of micro-motion dynamics by laser coherent radar of 1550 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1222~1226
孙 洋, 张 骏, 范亚夫. 1550 nm 激光相干雷达探测运动目标的微多普勒效应[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1222~1226
- 9 Sun Yang. The Study of Micro-Doppler Effect Using the 1550 nm Laser Coherent Radar Detection[D]. Yantai: Yantai University, 2010
孙 洋. 1550 nm 激光相干雷达探测微多普勒效应的实验研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2010

栏目编辑:何卓铭