

文章编号:1002-2082(2018)02-0174-06

弹载共孔径激光微多普勒目标识别系统研究

陈文建¹,高 瑋¹,孙卫平²,段园园¹,李 刚¹,马世伟¹,刘晓英¹,雷俊杰¹

(1. 西安应用光学研究所,陕西 西安 710065;2. 西安现代控制技术研究所,陕西 西安 710065)

摘要:为实现对距离4 km目标100 Hz振动特征的提取,提出利用激光微多普勒手段增强导弹目标辨识能力的方法。设计了一种基于偏振分光的激光发射/接收/电视共孔径系统,这种能够二级稳定的系统适应于弹载环境,利用光纤选通完成光程自动补偿,实现相干光匹配,采用本振/回波信号相干法,用线宽300 Hz的本振光调制后形成探测脉冲光,可提高探测距离,并避免回波与本振光因大气衰减而导致的错峰,由FPGA/DSP构建的傅里叶变换电路可获取时频曲线信号,频移为36 kHz时可实现目标的辨识。

关键词:弹载系统;激光微多普勒;相干探测;光程差补偿;激光线宽;傅里叶时频转换

中图分类号:TN206

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0201003

Research on missile-borne common aperture laser micro-Doppler target recognition system

Chen Wenjian¹, Gao Wei¹, Sun Weiping², Duan Yuanyuan¹, Li Gang¹, Ma Shiwei¹, Liu Xiaoying¹, Lei Junjie¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Institute of Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to realize the extraction of vibration features at 100 Hz from a distance of 4 km, a method of using laser micro-Doppler to enhance the capacity of missile target identification was proposed, and a laser transmitting/receiving/video common aperture system based on polarization splitting was designed. This compact two-stage stable system is adapted to the missile-borne environment, and the optical path is compensated automatically by optical fiber selection, the coherent light matching can be realized. Using the coherence method of local oscillator/echo signal, the detection pulse light is formed by the modulation of local oscillator light with a line width of 300 Hz, so the detection range can be improved, also the false peak caused by the attenuation of atmosphere can be avoided. The Fourier transform circuit constructed by FPGA/DSP can obtain the time-frequency curve signal, the identification of the target can be achieved when the frequency is 36 kHz.

Key words: missile-borne system; laser micro-doppler; coherent detection; optical path difference compensation; laser line width; Fourier time-frequency transform

引言

抗干扰和反隐身是导弹突防角逐的制高点,导弹在末制导阶段面临着伪装目标的诱骗,伪装目标包含对来袭导弹释放的伴飞载体、飞机抛出

的诱饵目标和地面诱骗假目标等。弹载雷达或图像类探测手段难以辨识真假目标,激光微多普勒探测方法可获取目标的微动(振动、转动和摆动等)信息,是提高制导系统对真假目标辨识能力的

有效手段。

1842 年多普勒发现由于波源或反射体的运动,会使反射波的频率发生变化,即产生多普勒频移 $\Delta f_s = v/\lambda$ 。多普勒频移与目标速度成正比、与探测波长成反比,该原理被广泛地应用于运动速度的探测。探测波长主要有毫米波和雷达波^[1],由于激光波长比毫米波小 3 个数量级,比一般雷达波长小 5~6 个数量级,故用激光探测目标运动比毫米波、雷达波灵敏度高 1 000~10 000 倍,因此激光微多普勒技术更适合于目标微小运动的探测和测量^[2]。

美国将该技术与雷达结合^[3]完成了对长度 6.4 m 巡航导弹 360° 方向的测试。在 0.55 s 的时间段内以 67 μs 的周期发射 8 192 个脉冲,获得导弹不同方向多普勒频移,验证运动目标的属性^[4]。激光微多普勒测量在内研究已有 10 余年^[5],主要集中在喇叭、桥梁及车辆等物体的振动检测^[6],在高精度液体流速测量方面也得到应用^[7]。目前在导弹目标辨识领域应用较少,技术瓶颈在于远距离相干探测和多普勒频移信号的提取。

激光微多普勒测量的基础在于相干光探测和目标复合微动特性探测,探测光既要和本振光相干,又要有足够的能量和窄线宽^[8]。为了获得较大的信噪比,必须采用大孔径发射天线和接收系统,并要保证激光微多普勒测量系统与目标的跟踪瞄准系统视轴稳定。本文将围绕上述问题,介绍一种弹载共孔径激光微多普勒目标识别系统。

1 激光微多普勒目标识别系统工作原理和组成

1.1 目标识别原理

激光微多普勒目标识别系统组装在导弹的导引头中。目标进入导引头视场后,利用该系统对所捕获的目标进行真假辨识和确认,由图像模式锁定跟踪目标。这类导弹发现目标后靠导弹自身的导引头跟踪目标。若导引头视场中出现若干个真假混杂的目标,将通过微多普勒系统进行辨识。激光在不同目标照射,使光斑依次在 A-B-C 3 个目标上快速跳转,并通过各个目标的微动特征迅速辨识目标真伪,识别过程如图 1 所示。

1.2 主要技术参数

作用距离:1 km~5 km; 目标激光散射截面积:LCS=2.5 m^2 ; 导引头直径: $\Phi=220 \text{ mm}$; 激光

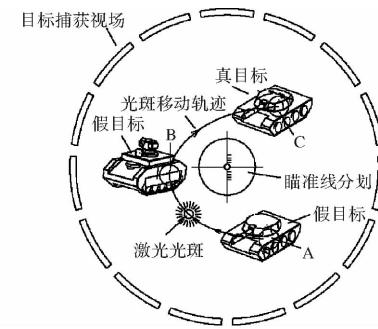


图 1 激光微多普勒系统对目标的识别过程

Fig. 1 Identification process of target by micro-Doppler system

波长:1.06 μm ; 激光线宽:优于 300 kHz; 激光重复频率: $\geq 500 \text{ Hz}$; 激光单脉冲能量:30 mJ; 激光脉冲宽度:30 μs ; 微动测量分辨率:0.04 m/s。

1.3 系统组成和工作流程

激光微多普勒目标识别系统组成如图 2 所示。系统由相干光源组件、本振光路组件、共孔径光路组件、探测接收组件、信号处理组件和操控显控组件等单元组成。

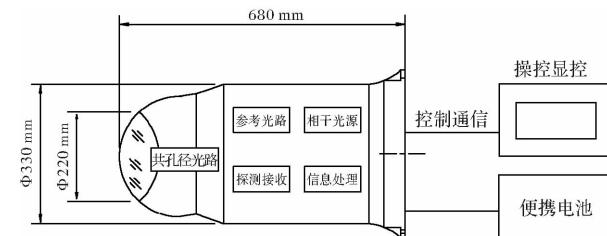


图 2 激光微多普勒目标识别系统组成

Fig. 2 Composition of laser micro-Doppler target recognition system

该系统以可见光成像系统搜索并捕获目标,通过振镜使光束在视场内目标上跳转扫描,获得各目标微动引起的微多普勒频移,判断目标真伪,通过控制系统获得目标偏差角信息,进而实现对真目标锁定跟踪,其流程如图 3 所示。

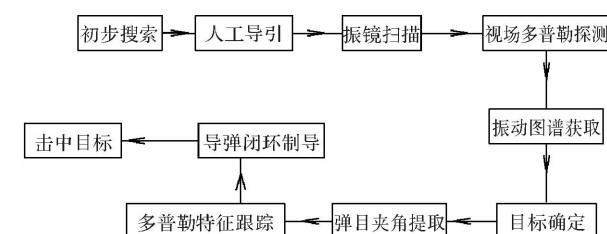


图 3 目标识别跟踪流程图

Fig. 3 Flow chart of target recognition tracking

系统有本振光路通道、探测光路通道和成像扫描通道 3 个光学通道,如图 4 所示。

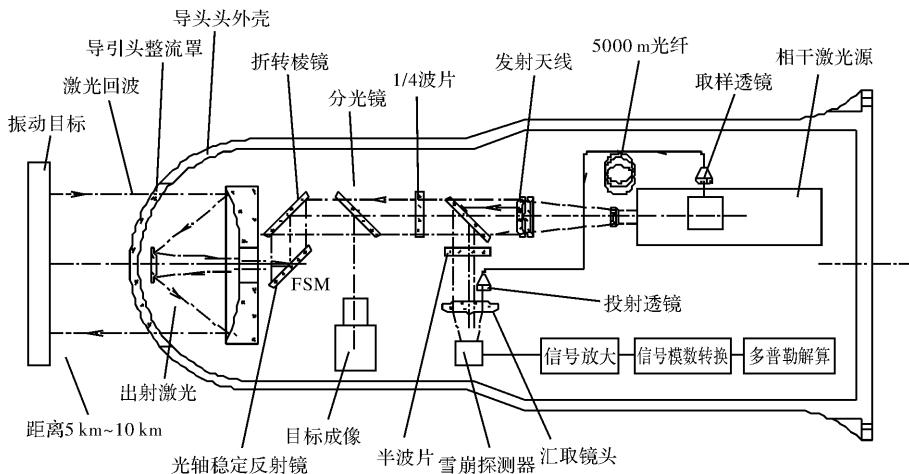


图 4 系统的光学通道

Fig. 4 Optical channel of system

1) 本振光路通道。光束由窄线宽激光源发出,是一束连续线偏振光,该光束通过取样透镜进入长度为 8 km 的保偏光纤,然后被传输到投射透镜,最后进入探测单元的汇聚光路。

2) 探测光路通道。光束由窄线宽激光源另一个出射端发出,是一束脉冲激光,脉冲激光为线偏振光,经过发射天线、偏振分光棱镜、1/4 波片变为圆偏振光,穿过分光镜、振镜和卡塞格林望远镜,然后出射,经大气传输投射到目标后,回波光发生退偏,变为椭圆偏振光,经过大气传输,进入接收物镜,汇聚后透过分光镜,经过 1/4 波片到达偏振分光棱镜后反射,再经过 1/2 波片,使回波光偏振方向与本振光一致,形成同偏振态干涉。

3) 成像扫描通道。系统在振镜作用下进行扫描,在系统整机一级稳定的同时使用振镜承担二级稳定功能,摄像机在分光镜处获取图像。

1.4 技术实现途径

该系统依据微多普勒效应,借助激光短波长、高频率的优势,获取目标复合微动导致的频率变化,区别物体的平动和微动特征^[9]。技术实现途径如下:

1) 以窄线宽连续激光做种子源,将其分束为本振光路和探测光路;探测光路经脉冲调制和两级放大后投射到目标上,回波光信号与本振光信号经光学系统合束后到达探测器光敏面,由于 2 路光信号载频一致、偏振方向相同,因而形成相干光。

2) 形成相干光后,探测器既能接收到本振光和信号光,也能接收到新产生的干涉光,该干涉光不但波动的幅度明显高于前 2 项,而且还包含着本振光和信号光频率之差等重要信息,经光电转化后形成电压信号,只留下干涉光形成的电压信号。每一瞬间的电压信号,均隐含着此刻目标移动所造成的多

普勒频移量信息,对该电压信号进行时频转换处理,即可获得该目标的频域特征。不同的频域特征,对应着不同的运动特征,由此可辨识目标的真伪^[10]。

3) 通过自适应调节本振光强度,实现本振光和大动态范围信号光的强度匹配,进而获得更好的信号相干度。

4) 为提高回波信号光功率,实现远距离探测,将探测光调制为脉冲形式,提高回波可靠性,同时采用连续光作为本振信号光,使本振光处于持续工作状态,确保回波信号光与本振光相干。

5) 光电探测器对相干光进行光电转换,输出电信号,并经 A/D 转换实现数字化,通过时频变换得到回波频率的变化量,以此获得目标的微动信息。

6) 对空间进行优化布局,将窄线宽、大相干长度的激光源及放大器与本振臂增程光纤组集成到导引头壳体,借助共光路模式获得最小发散角和大接收孔径,依托稳定平台隔离导弹扰动,通过高速振镜实现视场内目标的快速跳转,对真假目标进行辨识并将制导信息输出。

2 基于相干探测的频移获取

2.1 相干光的产生和信号提取

同方向且偏振方向相同的本振光和信号光的电场分别为

$$e_s(t) = E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (1)$$

$$e_i(t) = E_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

到达探测器后形成相干光,根据光电探测器的平方律特性,其输出的光电流为

$$i = a [e_s(t) + e_i(t)]^2 \quad (3)$$

由于光电探测器的响应时间有限,因此光电转换过程是一个时间平均过程。

将(1)式和(2)式带入(3)式,将平方公式展开,并通过积化和差变换,得到:

$$\begin{aligned} i = & a \left(\overline{E_s^2 \cos^2(\omega_s t + \varphi_s)} + \overline{E_l^2 + \cos^2(\omega_l t + \varphi_l)} \right. \\ & + \overline{E_s E_l \cos[(\omega_s - \omega_l)t + (\omega_s - \varphi_l)]} \\ & \left. + \overline{E_s E_l \cos[(\omega_s + \omega_l)t + (\omega_s + \varphi_l)]} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中4个分项分别代表着4个频率成份。前2项是功率项,因为 ω_s 和 ω_l 都是极高的光频,它们将带来2个直流分量(相对于探测器的物理探测能力),后2项是光功率的时变项,可导致探测器发生频率响应(也包括光谱响应)。

由于 $(\omega_s + \omega_l)$ 频率太高,故光电探测器对第4项并不敏感。相反,差频项 $\omega_{IF} = (\omega_s - \omega_l)$ 相对于 $(\omega_s + \omega_l)$ 来说是个慢变化的功率成份,只要 $\omega_{IF} = 2\pi f_{IF}$ 小于光电探测器的截止频率 f_c ,那么光电探测器就有相应的光电流输出^[11]。

根据数学运算和光电探测原理,公式(4)可简化为

$$i = \left\{ \frac{E_s^2}{2} + \frac{E_l^2}{2} + E_s E_l \cos[\omega_{IF} t + (\omega_s - \omega_l)] \right\} \quad (5)$$

此光电流经过有限带宽的中频(ω_{IF})放大器,直流项被滤除,最后只剩下中频交流分量,其电流大小可以表示成:

$$i_{IF} = a E_s E_l \cos[\omega_{IF} t + (\omega_s - \omega_l)] \quad (6)$$

由此可见,满足相干条件的2束光,在光敏面上注定发生干涉,此时探测器响应差频分量 $\omega_{IF} = (\omega_s - \omega_l)$ (亦即 $f_{IF} = f_s - f_l$),并输出差额分量的光电流,经过放大和信号处理,可测出 $f_{IF} = f_s - f_l$ 的值。由于 f_l 已知,获得 f_{IF} 就可确定出 f_s 的值, f_s 包含着目标的运动信息,即从公式 $\Delta f_s = v/\lambda$ 就可得出某一瞬间目标的运动速度^[12]。

对于一个平动/振动复合运动的目标,在一个振动周期内,探测多个微时间段的差频,就可得到一个振动周期内不同时间段的多普勒频移,从而确定目标的运动特征。

2.2 信号提取流程

信号提取可按如下流程来实现:

获得时域-时域/频域(傅里叶变换)-双线性时频变换-时频曲线-时频变化规律-判断振动特征。基于相干探测的频移获取系统就是根据这一流程构建的^[13]。

3 相干探测的实现方法

相干探测的实现方法如图5所示。

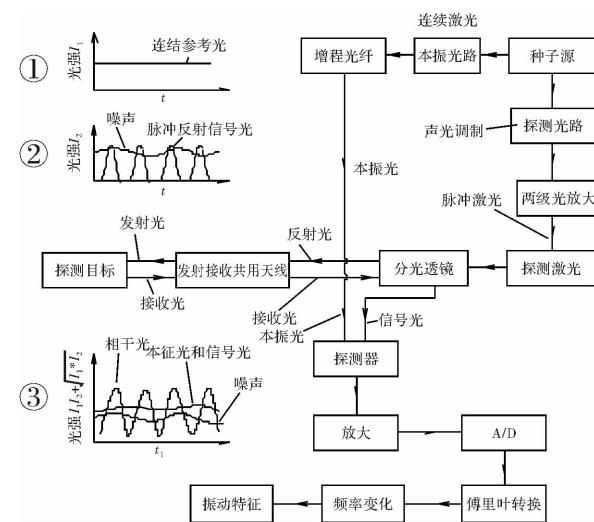


图5 共光源相干探测原理图

Fig. 5 Schematic diagram of coherent detection of common light source

为了适应弹载环境,提高回波信号光功率,实现远距离探测,将探测光调制为脉冲形式,以高功率激光传输,减少大气衰减的影响。采用连续光作为本振信号光,使其处于等待状态,确保回波信号光与本振光不会错峰。

本振光与入射光到达探测器表面时,平行性和偏振态需保持一致。光电探测器对相干光进行光电转换,输出电信号,并经A/D转换实现数字化,通过时频变换得到回波频率的变化量,以此获得目标的微动信息。

回波信号非常微弱,为了使本振光与信号光在强度上匹配,本系统将根据估算的回波信号的强度动态地控制参考光的强度,采用增程光纤进行选通控制,其过程如图6所示。

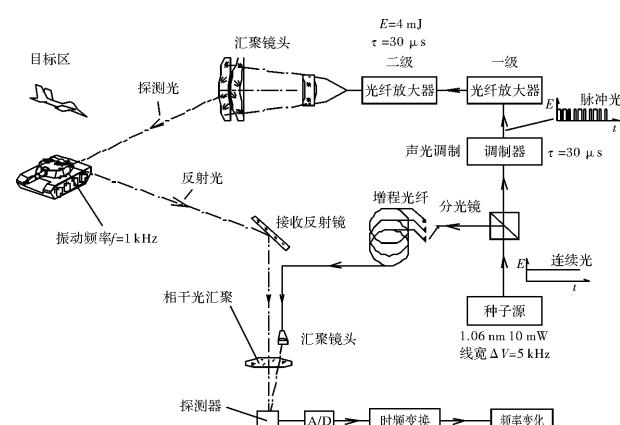


图6 基于光纤选通的本振/信号光强匹配原理

Fig. 6 Principle of local oscillation/signal light intensity matching based on optical fiber selection

4 采样和分辨率获取过程

4.1 振动周期内多普勒探测的选择时机

将目标振动频率和探测取样值设定为:地面坦克发动机振动频率 50 Hz~200 Hz,正常待机转速为 1 000 r/min,典型振动频率 100 Hz,对应振动周期为 10 ms。从信息获取的角度认为激光重频越高越好,此时一个振动周期内有效取样点较密集,但是由于激光功率与激光重频的互相制约关系,激光功率大幅度提高难以实现。从可行性出发,本系统在每个振动周期内取 10 段速度变化区间,均匀采样,再推算出一个完整的振动周期内的采样时机,如图 7 所示。

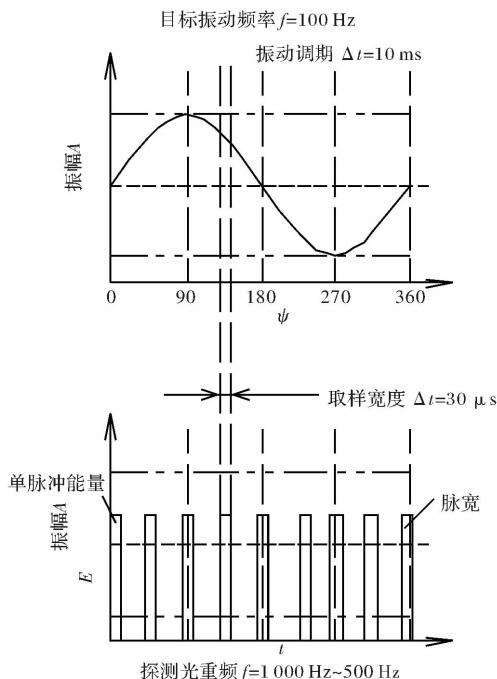


图 7 一个振动周期内多普勒探测的选择时机

Fig. 7 Selection timing of Doppler detection during one vibration cycle

4.2 采样点(激光脉宽)和单脉冲能量的选取

激光脉冲的脉宽为 t ,在此脉冲宽度内的采样点数为 n ,则采样间隔为 t/n ,对应的采样频率为 n/t ,由奈奎斯特采样定理可知,最高可测量频率为 $n/(2t)$ GHz,可分辨的频率间隔为 $(n/t)/n=1/t$ 。

最小速度分辨率为 0.02 m/s 时可分辨频率间隔为 37.6 kHz,故 $1/t = 37.6$ kHz,得到 $t = 26.6 \mu\text{s}$,即激光器的脉冲宽度应不小于 26.6 μs 。因此,激光脉宽按 30 μs 设计,见图 7 所示,1 kHz 重频激光器可实现的单脉冲能量为 36 mJ。

4.3 光源线宽选取

相干探测方式对光源线宽有严格要求,激光相干长度 l_c 与光源线宽 Δv 的关系如下:

$$l_c = c \Delta v \quad (7)$$

式中 c 为光速。基于激光器现有技术水平和工程实现的考虑,设计光源线宽小于 300 kHz,相干长度大于 1 km。因此在干涉系统中需采用光纤进行补偿。

4.4 微动测量分辨率 0.02 m/s 的技术要求

根据(2)式计算方法,当脉冲宽度大于 26.6 μs 时,可以得到 37.6 kHz 的频移分辨率,对应的移动速度为 0.02 m/s,系统中脉宽设计为 30 μs ,则可以达到检测分辨率^[14]的要求。

4.5 数据率 10 Hz 的技术要求

系统中高速光电探测器的响应带宽可达 1 GHz 以上,A/D 转换模块的频率可为 1 GHz 以上,若每次取 1 024 个数字信号进行时频变换运算,则时频变换模块的数据输出频率可达 1 kHz,可满足 10 Hz 的数据采集要求,时频转换过程如图 8 所示。

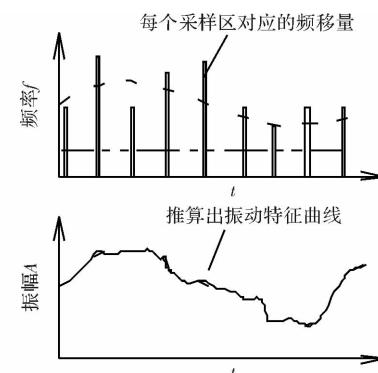


图 8 时频转换过程

Fig. 8 Time domain and frequency domain conversion process

上述途径能够获得置信度较高的目标运动特征,但却带来高重复率激光器体积大的问题。为了达到适装性和工程应用,可采用低重复率激光探测和低采样点回波的方式,把重点放在后端处理上进行弥补,即采用多个采样点的频移信号,推测出目标的运动特征。

5 结论

本文采用高功率脉冲激光作为探测光源,解

决了远距离探测面临的大气衰减和信噪比低的问题,借助偏振机理所设计的电视/激光发射/信号接收共孔径系统,解决了远距离相干探测及跟踪瞄准单元的高精度视轴稳定难题。具有一定线宽和体积约束的种子源,以及具有一定解算速度的傅里叶转换电路,已具备工程应用基础,加之紧凑的布局设计为弹载应用消除了障碍,为探测4 km外目标振动特征创造了条件。

参考文献:

- [1] PROKOPENKO I, PROKOPENKO K, MARTYN-CHUK I. Moving objects recognition by micro-Doppler spectrum [C]. New York: IEEE, 2005: 186-90.
- [2] WILLIS N J. Bistatic rader[M]. 2nd ed. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2005.
- [3] TANAKA T, MANDIC D P. Complex empirical mode decomposition [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(2):101-104.
- [4] WU Shunjun, DU Lan, LIU Hongwei. The Doppler effect of radar [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
吴顺君,杜兰,刘宏伟.雷达中的微多普勒效应[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [5] ZHOU Jian. Preliminary study on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
周健.用于车载自主导航激光多普勒测速仪的初步研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011.
- [6] YUAN Shuai, WANG Xueqin, SHENG Meiju, et al. Experimental research on laser micro-doppler for detecting complex vibration of moving target[J]. Infrared and Laser, 2007, 37(10):1036-1038.
原帅,王学勤,盛美菊,等.激光微多普勒探测运动目标复合振动的实验研究[J].激光与红外,2007,37(10):1036-1038.
- [7] LU Zhenzhong, WANG Peinan, LIU Jifang. Method of differential laser Doppler ship wake detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (12): 3525-3529.
鲁振中,王培南,刘继芳.差动激光多普勒尾流探测方法[J].红外与激光工程,2015,44(12):3525-3529.
- [8] ZHANG Dehua, ZHANG Haiyang, ZHENG Zheng. The influence of laser spot size on the micro-Doppler spectrum[J]. SPIE, 2015, 9623:962305.
- [9] YUAN Shuai. Experimental research on laser micro-doppler for detecting complex vibration[D]. Yantai: Yantai University, 2008.
原帅.复合振动激光微多普勒效应的实验研究[D].烟台:烟台大学,2008.
- [10] PAN Wuxia. Research on key technology of laser Doppler diameter measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
潘无瑕.激光多普勒测径关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [11] AN Yuying, LIU Jifang, LI Qinghui. Optoelectronic Technology [M], Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
安毓英,刘继芳,李庆辉.光电子技术[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [12] ZHANG Dehua. The study of laser micro-Doppler characters: detection, extraction, and identification [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
张德华.目标激光微多普勒特征探测、提取和识别技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [13] PRASAD N, DIMARCANTONIO A. Development of coherent laser radar for space situational awareness applications[C]. Hawaii :The Maui Economic Development Board, 2013.
- [14] OLHEDE S, WALDEN A T. The hilbert spectrum via wavelet projections[J]. Proc. R. Soc. London, Ser A, 2004, 460: 955-975.