

声光移频器对微多普勒效应探测的影响研究

郭力仁 胡以华 李 政 徐世龙

解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室,电子制约技术安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037

摘要 为实现基于微多普勒效应的远距离目标探测和识别,研究了采用声光移频器的激光外差相干探测结构对目标微多普勒特征探测的影响。建立了声光移频器驱动功率与系统信噪比之间的数学模型,并进行了仿真计算,搭建了1550 nm激光外差/零差相干探测实验平台对所建模型进行了验证。研究结果表明:在移频器驱动电压限定范围内,驱动电压越高,对微多普勒效应探测的效果越好,得到的目标特征越明显,与理论分析一致。通过对比实验发现在同样条件下,外差探测得到的反映目标特征的时频分布曲线较零差的清晰,特征提取误差小,可读性更高,说明外差探测结构更有利于复杂的远距离目标探测。

关键词 测量;微多普勒效应;声光移频器;相干探测

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0212006

Research on Influence of Acousto-Optic Frequency Shifter to Micro-Doppler Effect Detection

Guo Liren Hu Yihua Li Zheng Xu Shilong

Key Laboratory of Electronic Restriction Technology of Anhui Province, State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract In order to detect and recognize remote targets based on micro-Doppler effect, the influence of heterodyne lidar system composed by acousto-optic frequency shifters to micro-Doppler feature extraction is researched. Mathematical models between driving power of frequency shifter and signal to noise ratio are established, and simulations and experiments are performed through 1550 nm experimental system to verify their validity. The research shows that within the limiting driving voltage scope, the higher the voltage, the better the detection result is, which is in accordance with the theoretical analysis. Through the contrast experiment, heterodyne detection system is found better than homodyne in time-frequency curve of target feature acquisition. The smaller extracting error and the higher readability indicate that heterodyne system is more conducive than complicated remote target detection.

Key words measurement; micro-Doppler effect; acousto-optic frequency shifters; coherent detection

OCIS codes 120.0280; 120.1880; 230.1040; 040.2840

1 引 言

微多普勒效应是Chen^[1]在21世纪初率先提出的概念,指的是目标在相对与雷达运动的同时,因自身存在振动、转动或进动等微运动而产生的以多普勒频率为中心的边带调制现象。典型的雷达目标如坦克、飞机等都有明显的微多普勒现象,而且不同的目标都有自身独特的微多普勒特征^[2]。因此,研究微多普勒效应对于开辟目标探测识别的新途径有着重大的意义。

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61271353)、安徽省自然科学基金(1308085QF123)

作者简介: 郭力仁(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光探测方面的研究。E-mail: guolirenone@163.com

导师简介: 胡以华(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: skl_hyh@163.com

(通信联系人)

目前,国内外在微多普勒效应的理论和仿真方面都进行了大量的研究工作,建立了以点散射理论为基础的典型微动的数学模型^[3-4],并进行了实验验证^[5-8]。但是,在实际运用方面的研究还比较缺乏,对于探测结构,参数设置等因素对探测结果的影响还未见系统、明确的报道。

微多普勒探测主要运用相干探测的方法,对比外差和零差两种相干探测,前者的信噪比更高,抗干扰能力更强^[9],适合实际应用。然而,国内外在微多普勒效应方面的研究主要还是采用零差探测方式^[10-14],其效果只能满足实验室条件下的探测,对于远距离实际探测效果并不理想。要实现外差探测主要依靠声光移频器(AOFS)使激光频率发生偏移,在后期获得固定的中频信号。本文系统分析了声光移频器特性对微多普勒效应外差探测的影响规律,设计了 1550 nm 激光相干探测实验平台针对 AOFS 对微动特征提取的影响进行了实验研究,提出了适用于远距离探测的移频器参数设置方案。

2 声光移频器对微多普勒效应影响的理论分析与计算

2.1 声光移频器原理

声光移频器的理论基础是声光效应,当驱动信号经过声光移频器中的换能器时会产生超声场,由于声波是弹性波,在介质中传播会使介质发生弹性形变从而导致介质折射率的变化,当光波通过时就会和超声波相互作用形成体光栅,进而发生衍射现象^[15]。衍射光的方向、频率和强度将随超声场变化,而且体光栅和声场同步运动,使激光的频移与驱动信号的频率能保持一致。

声光晶体中的衍射分为拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射,前者与薄相位光栅衍射类似^[16],衍射效率低,衰减严重。所以目前的声光移频器主要利用布拉格衍射实现光信号的频移。

布拉格衍射原理如图 1 所示。

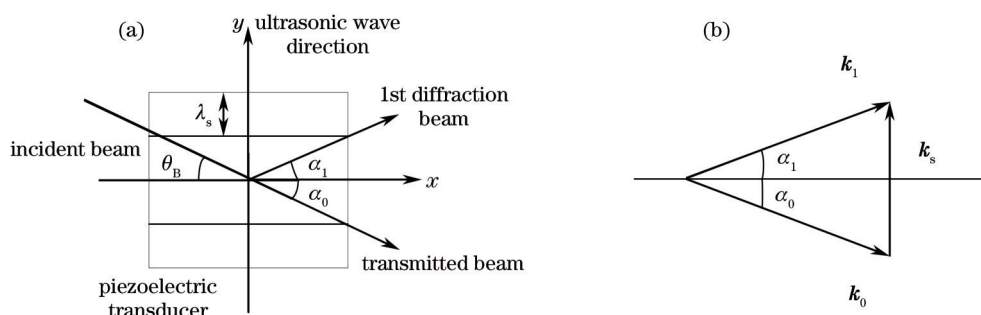


图 1 布拉格衍射原理图。(a) 压电换能器中声光相互作用; (b) 布拉格衍射动量匹配条件

Fig.1 Theory schematic of Bragg diffraction. (a) Acousto-optic interactions in piezoelectric transducer; (b) momentum match condition of Bragg diffraction

以+1级衍射光为例,图 1(a)中,当光以布拉格角 θ_B 入射时,介质内各级衍射光会发生相互干涉,此时高级衍射光会相互抵消,只剩下 0 级和 1 级衍射光, α_0 、 α_1 分别为 0 级和 1 级衍射角,且有 $\alpha_0 = \alpha_1 = \theta_B$,图中 λ_s 为声波在介质中的波长。发生布拉格衍射时,满足动量匹配条件,如图 1(b)所示。结合能量守恒有

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_0 + \mathbf{k}_s \\ \omega_d = \omega_i + \omega_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_0 为衍射光波矢, \mathbf{k}_s 为声波波矢, ω_d 为一级衍射光频率, ω_i 为入射光频率, ω_s 为声波频率。

2.2 声光移频器驱动功率对微多普勒效应探测影响的理论分析

在满足布拉格衍射的条件下,由声光相互作用理论可得 0 级和 1 级衍射光强为

$$\begin{cases} I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{v}{2}\right) \\ I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{v}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_i 为入射光光强, v 表示光波穿过超声场时的附加相位延迟,可以用声致折射率变化 Δn 来表示为

$$v = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n L = 2 \frac{\pi}{\sqrt{2} \lambda_0} \sqrt{\frac{L}{H} M P_A}, \quad (3)$$

其中, $M = \frac{P^2 n^6}{\rho v_s^3}$ 是声光介质的品质因数, P 为声光系数, L 、 H 为换能器的长和宽, ρ 、 n 分别为声光晶体的密度和折射率, λ_0 为光波长, v_s 表示声速, P_A 表示声波功率。从(3)式中可以看出,随着声波功率的增加,一级衍射光功率的大小将作正弦规律变化。

回波信号光场及声光移频器输出的一级衍射光场为

$$E_s(t) = E_s \cos\{[\omega_c + \omega_D(t)]t + \rho_s\}, \quad (4)$$

$$E_A(t) = E_A \cos\{(\omega_c + \omega_A)t + \rho_L\}, \quad (5)$$

式中 E_s 为回波光信号幅度, ω_c 为激光频率, $\omega_D(t)$ 为微动引入的微多普勒频移, ρ_s 为信号光路的随机相位, E_A 为 AOFS 输出一级衍射光振幅, ω_A 为移频器频移, ρ_L 为移频器引入的随机相位。

当信号光和本振光进入探测器后,由平衡探测原理和光电探测器的平方率响应特性^[17]可得平衡探测器输出的中频电流为

$$i_{IF} = i_1 - i_2 = 2\eta\alpha\sqrt{1-\varepsilon}\sqrt{\varepsilon}E_sE_L \cos\{[\omega_A - \omega_D(t)]t + \rho_s - \rho_L\}, \quad (6)$$

式中 i_1 和 i_2 分别为平衡探测器中两探测器的输出电流, ε 为平衡探测器分束比, η 为探测器量子效率, $\alpha = \frac{e}{h\omega}$, E_L 为本振光振幅,即为 E_{A0} 。由于实际中两探测器效率的偏差小于分束比的偏差,此处设平衡探测器中两探测器的量子效率相同,有信号功率为

$$P_{IF} = 8\eta^2\alpha^2(1-\varepsilon)\varepsilon P_s P_L R_L, \quad (7)$$

式中 $P_s = E_s^2/2$, $P_L = E_L^2/2$ 分别为信号光功率和本振光功率, R_L 为光电探测器负载电阻。在利用微多普勒效应进行目标探测中,系统的信噪比直接影响了能否提取到特征以及提取的准确性。所以研究 AOFS 驱动信号功率对微动探测的影响可以转为研究对信噪比的影响。系统中的噪声主要包括本振光过剩强度噪声和光电探测器产生的热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声(f 为光辐射调制频率)、暗电流噪声。其中, $1/f$ 噪声只在频率小于 100 MHz 的低频范围有作用,可以忽略;暗电流噪声可包含于散粒噪声,但本振光的引入使本振散粒噪声远大其他散粒噪声。此外通过对实验实际结果的分析,平衡探测器并不理想平衡,所以并不能完全消除本振强度噪声。所以,本文在建立数学模型中同时考虑了热噪声、本振光引入的过剩强度噪声和散粒噪声。

由本振光引起的过剩强度噪声功率为^[18]

$$P_{\text{excess}} = 2e\gamma(i_{1L} - i_{2L})^2 BR_L = 2e\gamma\alpha^2\eta^2(2\varepsilon - 1)^2 P_L^2 BR_L, \quad (8)$$

因为探测器的散粒噪声是随机的,所以平衡探测器输出的总散粒噪声为两探测器之和,即

$$P_{\text{shot}} = 2e(i_{1L} + i_{2L})BR_L = 2e\alpha\eta[\varepsilon + (1-\varepsilon)]P_L BR_L, \quad (9)$$

式中 e 为电子电荷量, i_{1L} 、 i_{2L} 为探测器 1、2 电流中的本振功率分量, γ 为本振光相对强度噪声系数^[10],取值范围为 $10^2 \sim 10^6 \text{ A}^{-1}$, B 为探测器带宽。

由热噪声公式 $P_{\text{shot}} = 4k_B TBR_L$, 及(7)~(9)式可得系统信噪比为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{P_s}{P_{\text{shot}} + P_{\text{thermal}} + P_{\text{excess}}} = \frac{4\eta^2\alpha^2(1-\varepsilon)(\varepsilon)P_s P_L}{e\alpha\eta P_L B + 2k_B TB + e\gamma\alpha^2\eta^2(2\varepsilon - 1)^2 P_L^2 B}, \quad (10)$$

式中 P_{thermal} 为热噪声功率, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, P_L 为本振光功率,等于(2)式中一级衍射光强 I_1 。实验中通过调节声光驱动电压 V_A 来实现对声波功率 P_A 的控制,且有 $P_A \approx \frac{1}{2}V_A^2$ 。将(2)、(3)式代入(10)式中便可得系统信噪比随声光移频器驱动电压变化的表达式。

2.3 声光移频器驱动功率对微多普勒效应探测影响的数值计算

根据实际情况设定仿真参数:激光波长为 1550 nm,光电探测器带宽为 80 MHz,本振光功率为 8 mW,信号光回波功率 100 nW,取为 10^6 A^{-1} ,探测器量子效率为 0.9,考虑平衡探测器不能实现理想的平均分束^[19],分别取 $\varepsilon = 0.5, 0.51, 0.52$ 以对比分束比的影响, T 为 300 K。换能器长和宽分别为 8 mm 和 3 mm,声光介质品质

因数 $M = 164 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

利用 Matlab 对(2)式和(10)式进行仿真,得到移频器输出衍射光功率 I 随驱动功率 P_A 变化及系统信噪比随本振功率 P_L 变化的关系,如图 2(a)、(b)所示。将(2)式代入(10)式仿真,得到信噪比随驱动功率变化关系,如图 2(c)所示。

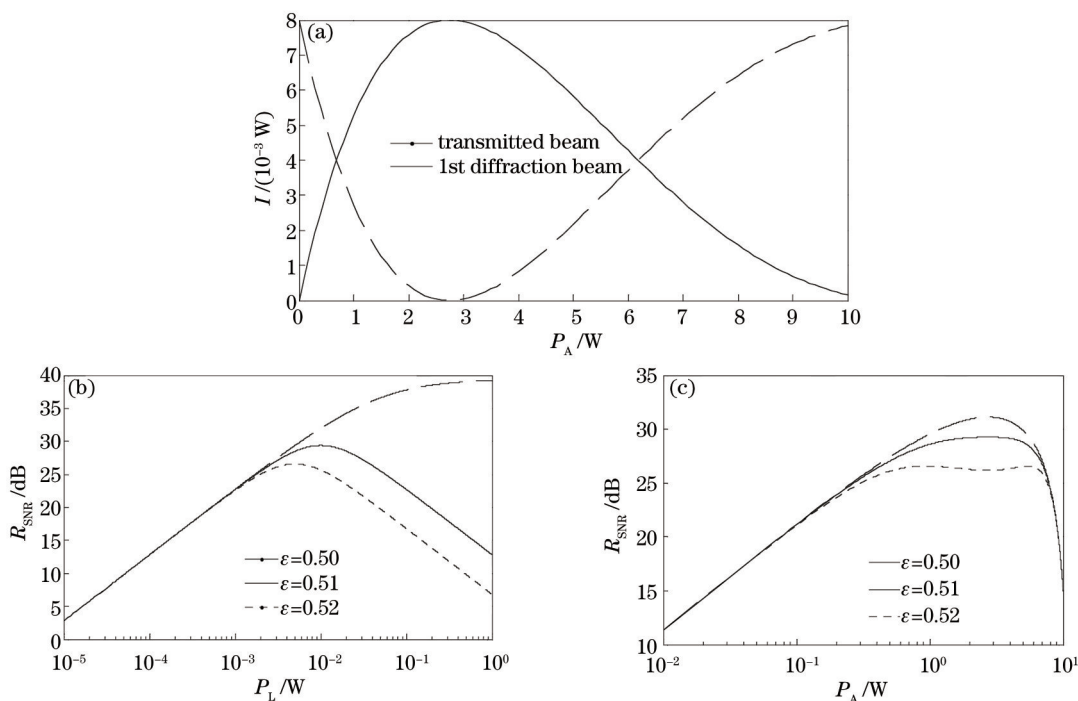


图 2 驱动功率对微多普勒检测的影响仿真

Fig.2 Influence simulation of P_A to micro-doppler detection

从图 2(a)中可以看出,随着驱动功率的增加,衍射光功率呈现类似正弦周期的变化,当驱动功率适当时,1 级衍射光功率达到峰值,此时 0 级衍射光功率为 0,输入光强全部转换为 1 级衍射光。图 2(b)说明理想平衡探测下,随着本振功率的增加,信噪比趋向一稳定值。但在不理想情况下,本振功率过大信噪比将呈现下降趋势。由图 2(c)可看出平衡分束越理想,信噪比越高。

3 声光移频器对微多普勒效应影响实验研究

3.1 实验系统

由声光移频器构成的微多普勒激光相干平衡外差探测实验系统如图 3 所示。

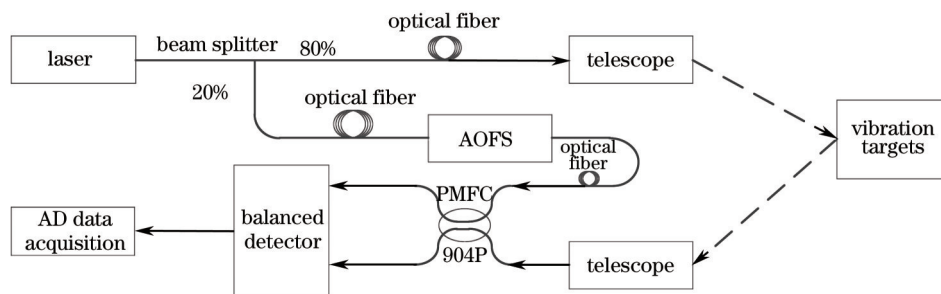


图 3 实验系统框图

Fig.3 Schematic of experimental system

实验中激光器是 1550 nm 的光纤激光器(NKT),输出功率为 40~200 mW,线宽小于 0.1 kHz,输出激光经光纤分束器分为强度为 80%和 20%的两束激光。其中光强 80%的作为信号光,经过光纤准直镜,照射到被测目标上; 20%的光束作为本振光,经过声光移频器(AOFS)移频与望远镜收集的目标散射光一同进入保偏光

纤耦合器(PMFC),光纤耦合器输出连接至平衡探测器(New Focus, Model 1817, 3 dB带宽为 80 MHz, 材料为 InGaAs)。光信号经过相干探测器后转变为电信号,连接至 AD 采集卡进行数据采集(SP Devices, SDR14, 采样率为 800 MHz, 采样位数为 2×14 bit),最后利用 Matlab 等工具对采集的数据进行分析。

实验用声光移频器采用 FFF-55-B1/B2-F1 Brimrose, 工作波长为 $(1550 \pm 50 \text{ nm})$, 插入损耗为 3 dB, 驱动采用与之配套的 AMF-55-1550-2FP-ER60, 频率稳定度为 0.0015%, 调制电压为 0~1 V。目标采用 ioneer 120 mm 双磁长冲程低音喇叭来模拟微振动情况, 阻抗为 8Ω 。功放采用的是劲音美 YD-AC809, 最大功率为 180 W。信号源型号为泰克 3251, 产生频率幅度可调的连续正弦信号。

3.2 声光移频器驱动信号功率对微动探测影响实验研究

实验中目标距离为 1.5 m, 振动频率为 200 Hz, 喇叭驱动电压为 500 mV。改变移频器驱动信号电压得到了不同的一级衍射光输出功率, 由于实验采用的声光驱动器承受电压上限是 1 V, 所以调节驱动电压范围在 100~900 mV, 实验结果如表 1 所示。

表 1 驱动电压及对应输出功率对比

Fig.1 Comparison of V_A and I_1

V_A of AOFS /mV	100	200	400	600	800	900
I_1 of AOFS / μ W	8	38	165	380	660	800

根据表 1 中的实验数据可得到移频器驱动功率和输出功率的关系如图 4 所示。

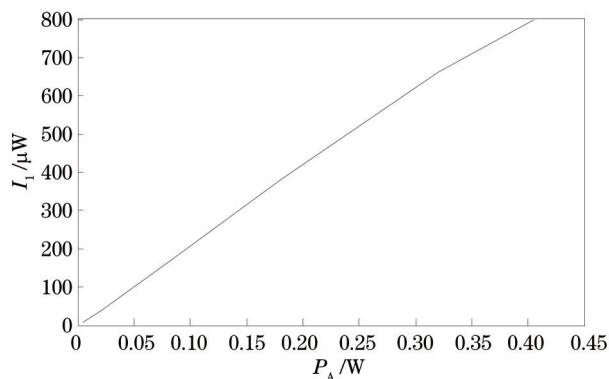


图 4 驱动功率与输出功率的关系

Fig.4 Relationship of P_A and I_1

从图 4 可以看出, 实验所得驱动功率和一级衍射光功率之间的关系与图 2(a) 中数值计算一致, 这也证明了理论推导的正确性, 同时也说明采用的移频器性能比较理想。

在不同驱动功率下进行微多普勒效应探测实验, 对获得的实验数据采用目前联合时频分析效果最理想的重排平滑伪 Wigner-Ville 分布(RSPWVD)^[20]进行处理, 提取目标的微动特征。所得的时频分析结果如图 5 所示。

图 5 中黑色背景代表系统探测的噪声强度, 白色线条代表目标微振动信号在特定时刻、特定频率上的强度, 二者对比度越高则说明探测信噪比越高, 每个图片右侧的颜色条显示了不颜色对应的强度大小。从图 5(a) 可以看出驱动电压较低时, 噪声干扰严重, 时频分析结果模糊, 不利于微动特征的准确提取。随着驱动功率增大, 信噪比变好, 可以获得如图 5(d) 所示近乎理想的时频分析结果。图 5(a)~(d) 中信噪比的变化趋势与图 2(b) 的仿真结果一致, 说明移频驱动器电压在不超过 1 V 上限的情况下, 驱动电压越高, R_{SNR} 越高, 越利于目标特征的提取。值得注意的是实验中探测的距离较短, 只有 1.5 m, 当进行远距离实际探测时, 回波信号剧烈衰减, 在低驱动电压下, 反映目标微动特征白色线条将淹没在噪声中, 这更说明了选取高驱动电压的必要性。

用可调功率衰减器代替声光移频器, 并调节本振功率分别与表 1 中不同驱动电压下的一级衍射输出功率一致, 对同样条件下的目标进行零差相干探测与上面的外差探测进行对比。用 RSPWVD 方法对采集信号处理后的结果如图 6 所示。

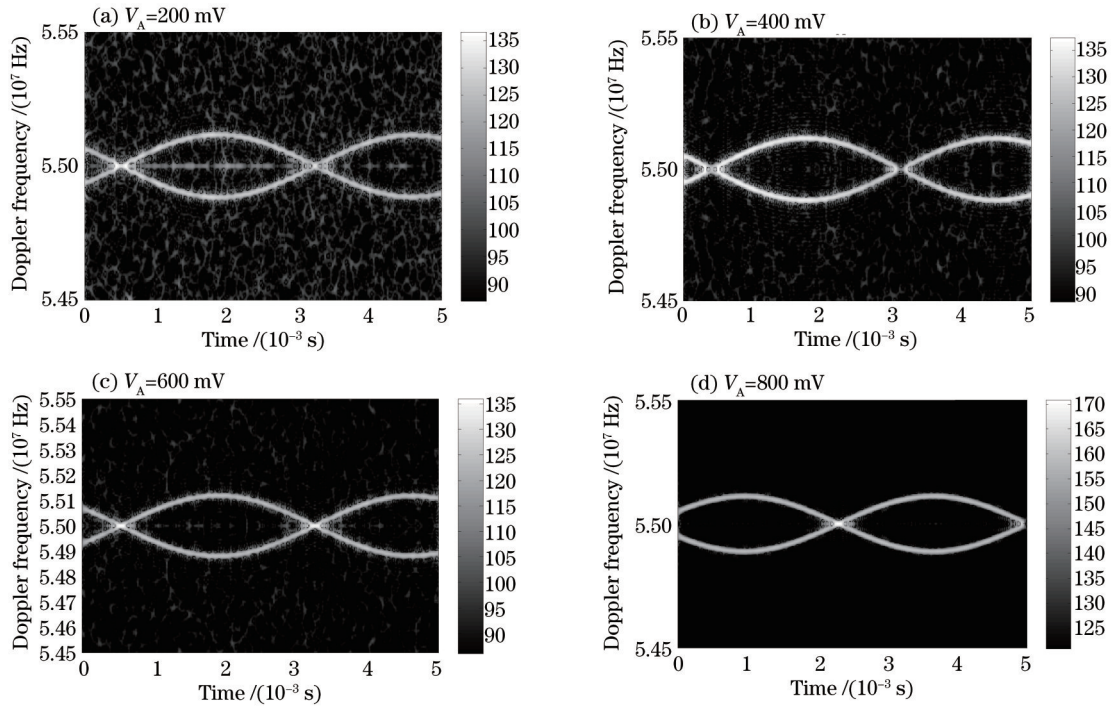


图 5 含声光移频器外差系统在不同驱动电压下得到的时频分析结果

Fig.5 Time-frequency analysis of heterodyne detection with AOFS under different V_A

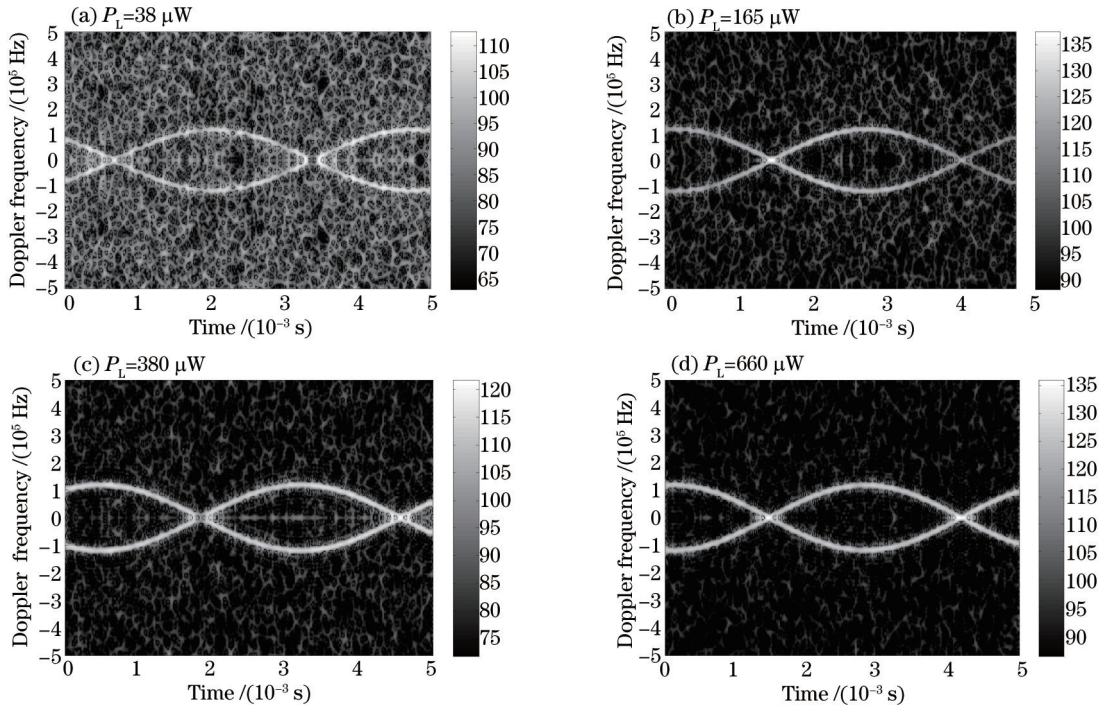


图 6 不含声光移频器零差系统在不同本振功率下得到的时频分析结果

Fig.6 Time-frequency analysis of homodyne detection without AOFS under different P_L

图 6(a)~(d)的本振功率分别与图(5)中的一级衍射功率对应,从图中可以看出随着本振功率增加,信噪比增强,微动探测效果变好。但是在给系统提供相同本振功率的情况下,通过数值分析看出采用 AOFS 的外差探测结构比零差探测的信噪比要好,目标微动特征也更明显。说明采用 AOFS 后更有利于目标微多普勒效应的远距离探测。

为说明采用移频器后获得微多普勒效应探测优势的原因,实验中对图 5 和图 6 对应的时域信号进行了傅里叶变换,频谱结果如图 7 所示。

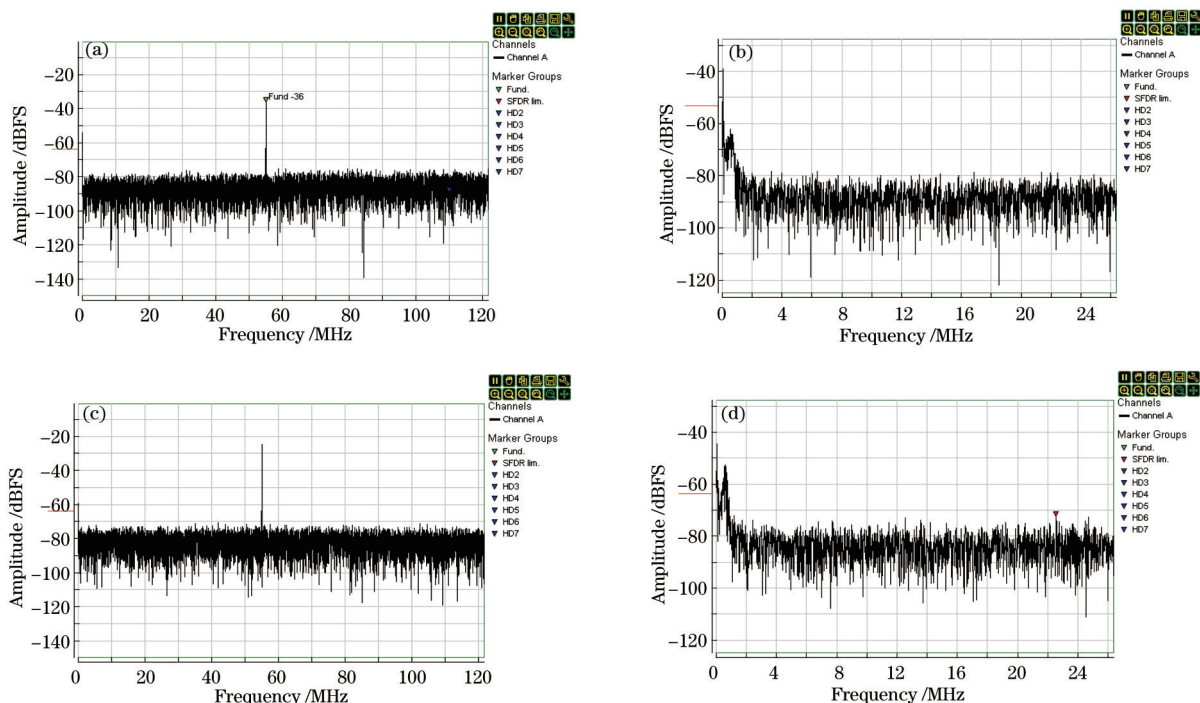


图 7 两种不同探测方法的频谱图。(a) $V_A=400$ mV; (b) $P_L=165$ μ W; (c) $V_A=800$ mV; (d) $P_L=660$ μ W

Fig.7 Spectral distributions of two detecting methods. (a) $V_A=400$ mV; (b) $P_L=165$ μ W; (c) $V_A=800$ mV; (d) $P_L=660$ μ W

图 7(a)、(c)分别表示移频器驱动电压为 400、800 mV 下外差系统测得信号的频谱图,图 7(b)、(d)为对应本振功率时,零差探测信号的频谱图。可以看出,零差探测时,系统的低频噪声很强,对同样处于低频的微多普勒信号干扰严重,而加入 AOFS 后的外差探测将微多普勒中心频率搬移到 55 MHz,避免了低频噪声的干扰,所以有图 5、6 的实验结果。而且图 7(c)中各频带处噪声分布一致也解释了图 5(c)中能获得均匀分布噪声背景的原因。

4 结 论

从理论分析、数值计算和实验验证三个方面详细研究了声光移频器对于微多普勒效应相干探测的影响规律。研究表明:利用 AOFS 的外差探测系统能有效克服低频噪声对微多普勒效应探测的影响,在相同探测条件下,能获得比零差探测结构更高的信噪比和更明显的目标微动特征,有利于远距离目标的探测和识别。在移频器驱动电压允许范围内,加的驱动电压越高,微动探测效果越明显,越有利于目标特征的提取,并给予了实验验证。该结果对基于微多普勒效应的目标远距离探测识别有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 V C Chen. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review [C]. AeroSense, 2003, International Society for Optics and Photonics, 2003. 240-249.
- 2 J A Nanzer, R L Rogers. Bayesian classification of humans and vehicle using micro-Doppler signals from a scanning-beam radar [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(5): 338-340.
- 3 V Chen. The Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Norwood: Artech House, 2011. 47-55.
- 4 V C Chen, F Li, S Ho, *et al.* Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulaion study [J]. IEEE Trans AES, 2006, 42 (1): 2-21.
- 5 Chen Peng, Hao Shiqi, Zhao Nanxiang, *et al.* Micro-Doppler analysis of helicopter's rotor blades [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3259-3264.

- 陈 鹏, 郝士琦, 赵楠翔, 等. 直升机旋翼微多普勒特性分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3259–3264.
- 6 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.
- 7 Wil Otaguro, Cecil Hayes. Microdoppler ladar system [C]. SPIE, 2000, 4091: 268–277.
- 8 T Thayaparan, S Abrlo, E Riseborough. Micro-Doppler Radar Signatures for Intelligent Target Recognition [R]. Ottawa: Defence Research and Development Canada Ottawa, 2004.
- 9 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, *et al.*. Singal-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.
- 10 Yuan Shuai, Wang Xueqin, Sheng Meiju, *et al.*. Experimental research on laser micro-Doppler for detecting complex vibration of moving target [J]. Laser & Infrared, 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.
- 11 Dong Jin. 200 mm Micro-Doppler Effect Lidar Heterodyne Detection System and Experiment Research [D]. YanTai University, 2012.
- 董 晶. $\Phi 200$ mm 微多普勒效应激光雷达相干探测系统及实验研究[D]. 烟台大学, 2012.
- 12 M G Anderson, R L Rogers. Micro-Doppler analysis of multiple frequency continuous wave radar signatures [J]. Radar Sensor Technology XI, Proceedings of SPIE, 2007: 65470A.
- 13 P Gatt, S W Henderson, J A L Thomson, *et al.*. Micro-Doppler lidar signals and noise mechanisms: theory and experiment [C]. AeroSense 2000. International Society for Optics and Photonics, 2000. 422–435.
- 14 Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, *et al.*. Lidar coherent detection and feature extraction of moving target based on micro-Doppler effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 39(10): 1014001.
- 董 晶, 陈 蕊, 李小龙, 等. 运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取[J]. 中国激光, 2013, 39(10): 1014001.
- 15 Yu Weijuan. Experimental Research on 1.55 μm All-Fiber Acousto-Optic Shifter Diffraction Efficiency and Laser Heterodyne [D]. Harbin Institute of Technology, 2008.
- 于维娟. 1.55 μm 全光纤声光移频器衍射效率及激光外差的实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- 16 Shang Jianhua, Ren Lihong, Xu Haiqin, *et al.*. Heterodyne laser Doppler vibrometer based on double acousto-optic frequency shifters [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1149–1155.
- 尚建华, 任立红, 徐海芹, 等. 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1149–1155.
- 17 An Yuying, Zeng Xiaodong. Photoelectric Detection Principle [M]. 2nd edition. Xi'an: Xidian University Press, 2009. 152–157.
- 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[M]. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 152–157.
- 18 Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, *et al.*. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1918–1922.
- 杨彦玲, 李彦超, 高 龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1918–1922.
- 19 Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, *et al.*. Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of 2 μm balanced coherent system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1104002.
- 王春晖, 高 龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 2 μm 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1104002.
- 20 Peng Mingjin, Li Zhi. Analysis and feature extraction of laser micro-Doppler signatures based on Hilbert-Huang transforms [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809004.
- 彭明金, 李 智. 基于希尔伯特-黄变换的激光微多普勒信号分析与特征提取[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809004.

栏目编辑: 史 敏