

本振功率对目标微动激光平衡外差探测的影响研究

郭力仁, 胡以华, 李 政, 徐世龙

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室 电子工程学院, 安徽 合肥 230037;
2. 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 面向远距离目标微多普勒效应的探测, 建立了本振光功率变化对激光平衡外差探测回波信噪比影响的数学模型, 并进行了仿真分析。通过搭建的 1 550 nm 激光平衡外差探测实验平台测试了由于本振功率变化对于目标微多普勒特征提取效果的影响。研究表明, 对于平衡外差探测, 由于两光电探测器量子效率不可能完全匹配, 考虑到散粒噪声、热噪声和本振相对强度噪声的影响, 将存在一个最佳本振功率值使探测信噪比达到最大。当选取该本振功率进行探测时, 获得的目标微多普勒特征可读性更强, 提取误差更小。

关键词: 探测器; 微多普勒效应; 平衡外差探测; 本振功率; 激光雷达

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2933-05

Influence of Local Oscillate power on micro-motion balanced heterodyne detection for Lidar

Guo Liren, Hu Yihua, Li Zheng, Xu Shilong

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Aiming at detecting the micro-Doppler effect of target away, the mathematical model of variational Local Oscillate (LO) power influence to signal to noise ratio (SNR) of balanced heterodyne detection for coherent lidar were established. Besides, simulation analysis on this model was proceeded. The effect on feature extraction was observed through experiments. The results show that in balanced heterodyne detection, where quantum efficiency of two photo electric detectors can't match completely in reality, there will be a specific LO power making the SNR best, considering the shot noise, hot noise and LO intensity noise. While choosing the optimal LO power in detection, the micro-doppler feature extracted will be more readable and accurate.

Key words: detectors; micro-Doppler effect; balanced heterodyne detection; LO power; Lidar

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-15

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, 硕士生, 主要从事相干激光探测方面的研究。Email: guolirenone@163.com

导师简介: 胡以华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电信息技术研究。Email: skl_hyh@163.com

0 引言

许多雷达目标,如坦克、舰船、飞机等,在相对于雷达运动产生多普勒频移的同时,目标本身产生的振动或转动等相对于主体运动的微运动,会对回波信号产生频率调制作用,导致出现以目标多普勒频率为中心的频谱展宽的现象,这就是微多普勒效应^[1]。由于对目标微动微多普勒效应的激光相干探测具有高时空分辨率、强抗干扰能力等诸多优点,它将原来雷达的功能由只能测量目标宏观运动状态扩展到了可以测量目标的微观运动状态^[2],因此研究目标雷达探测中的微多普勒效应对于发展目标的精确探测识别有着举足轻重的意义。

目前,在微多普勒效应的理论建模和仿真分析方面,国内外的研究人员都已开展了大量的工作,并已取得了一定的成果^[3-5],对几种典型的微动都建立了基于散射点理论的数学模型^[6],并实现了仿真和实验室条件的验证。但在实际运用方面,开展的研究还比较少,比如,在对微多普勒效应探测中系统的参数设置、探测结构,传播介质上的影响因素等对探测结果的影响还未见有系统的报道。基于外差探测中选取不同的本振功率会导致不同的信噪比的现象,笔者立足于微多普勒效应的远距离探测,就本振功率变化对于目标微多普勒特征提取效果的影响规律进行了理论建模与仿真研究,得出了在特定实验系统参数情况下,获得最佳探测效果的本振功率,并搭建 1 550 nm 激光平衡外差探测实验平台,对该影响进行了实验验证。

1 微多普勒效应激光平衡外差探测信噪比与本振功率关系建模

1.1 微多普勒效应基本概念

目标振动产生的微多普勒效应,其本质主要是由于目标表面与雷达距离的微小变化相当于产生的对回波信号相位的调制作用^[7],反映在频率上就是会在目标运动产生的多普勒频移基础上再附加一个频率调制。设目标做正弦振动, t 时刻距探测器的距离为^[8]:

$$R(t)=R_0+D\sin(2\pi ft)\cos\beta\cos\alpha_p \quad (1)$$

这可理解为在回波中加入了 $\phi(t)=4\pi R(t)/\lambda_c$ 的相位调制,所以由目标的微振动产生的微多普勒频

移为:

$$f_m=\frac{2v}{\lambda_c}+\frac{4\pi fD}{\lambda_c}\cos\beta\cos\alpha_p\cos(2\pi ft) \quad (2)$$

式中: f, D 分别为振动频率和振幅; v 为目标运动速度; λ_c 为激光波长。 α_p, β_p 为参考坐标系中振动的方位角和俯仰角, α, β 为振动点相对于雷达的方位角和俯仰角。为简便起见,计算中已设 α 和 β_p 为 0。

1.2 平衡外差探测信噪比与本振功率关系分析

对于目标微动的遥感探测,高的信噪比更有利于目标特征的准确提取,减少识别误差。而本振光强度对于激光外差探测的信噪比有重要的影响。从转换增益的角度考虑,由于 $G=2P_L/P_S$, 为转换增益, P_L, P_S 分别代表本振功率和信号功率。所以希望本振光越强越好。但是,这同时使本振噪声分量增强,从而导致整体信噪比下降。此外,过强的本振还会损坏光电探测器^[9]。一般来说,转换增益提出了本振功率的下限,而探测器的损坏阈值和信噪比则限定了本振功率的上限。因此,理论上存在一个本振功率使得系统达到最佳信噪比。

设信号光和本征光的光场分布分别为:

$$E_s(t)=E_s\cos(\omega_s t+\rho_s) \quad (3)$$

$$E_l(t)=E_l\cos(\omega_l t+\rho_l) \quad (4)$$

根据平衡探测原理和光电探测器平方率响应特性,可以得到输出中频电流为:

$$i_{IF}=(\eta_1+\eta_2)\alpha\sqrt{1-\varepsilon}\sqrt{\varepsilon}E_sE_l\cos(\omega_{IF}t+\rho_s-\rho_l)+n_1(t)-n_2(t) \quad (5)$$

ε 为平衡探测器的分束比,取 0.5 时效果最好^[10],所以可得平衡探测器后的输出信号功率为:

$$S=\frac{1}{2}(\eta_1+\eta_2)^2\left(\frac{e}{h\omega}\right)^2P_S P_L R_L \quad (6)$$

式中: η_1, η_2 为探测器的量子效率; ω 为信号频率; e 为电子电量; h 为普朗克常量; $P_S=E_S^2/2, P_L=E_L^2/2$ 分别表示信号光功率和本振光功率; R_L 为光电探测器的电阻。

探测器电流中的噪声主要有本振光引起的过剩强度噪声、光电探测器中的散粒噪声、暗电流噪声、热噪声和 $1/f$ 噪声。其中, $1/f$ 噪声只有在探测频率低于 1 kHz 的低频范围才出现,对于光频信号而言可以忽略;暗电流噪声本质可认为包含于散粒噪声;本振光引入的散粒噪声与本振功率的大小有关,随着本振功率的增加,其散粒噪声将远大于热噪声。当平

平衡探测所选用的两个光电探测器完全匹配时,即 $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, 平衡探测的方法可以将本振过剩强度噪声完全消除, 噪声可以认为只包括本振产生的散粒噪声和探测器的热噪声^[11], 此时信噪比为:

$$SNR = \frac{S}{N_{shot} + N_{hot}} = \frac{(\eta\alpha)^2 P_s P_L}{2e\eta\alpha P_L B + 2K_B T B} \quad (7)$$

式中: N_{shot} 为散粒噪声; N_{hot} 为热噪声; $\alpha = e/h\omega$, K_B 为波尔茨曼常数; B 为探测器带宽; T 为探测器温度。可以看出, 随着 P_L 的增加, 信噪比逐渐增大, 当散粒噪声远大于热噪声时, SNR 趋向于一稳定值。

但是, 实际情况中, 两个探测器的量子效率不可能完全相同, 所以, 需要考虑本振引入的过剩强度噪声, 其功率为:

$$N_{excess} = 2e\gamma I_{dc}^2 BR_L = 2e\gamma\alpha^2 [\eta_1 - \eta_2] P_L^2 BR_L \quad (8)$$

γ 为本振光相对强度噪声系数^[12], 取值范围在 $10^2 \sim 10^6 \text{ A}^{-1}$ 。此时, 信噪比变为:

$$SNR = \frac{S}{N_{shot} + N_{hot} + N_{excess}} = \frac{(\eta_1 + \eta_2)^2 \alpha^2 P_s P_L}{4e\eta\alpha(\eta_1 + \eta_2) P_L B + 8K_B T B + 4e\gamma\alpha^2 (\eta_1 - \eta_2)^2 P_L B} \quad (9)$$

2 平衡外差探测 SNR 与本振功率关系的仿真

结合实际情况, 设置激光波长为 1 550 nm, 探测器带宽为 80 MHz, $P_s = 10^{-7} \text{ W}$, $P_L = 10^{-6} \sim 1 \text{ W}$, 假设入射功率不超过探测器的响应范围。当平衡探测中两光电探测器完全匹配时, 根据公式(7), 可得信噪比随本振光功率的变化情况如图 1 所示。

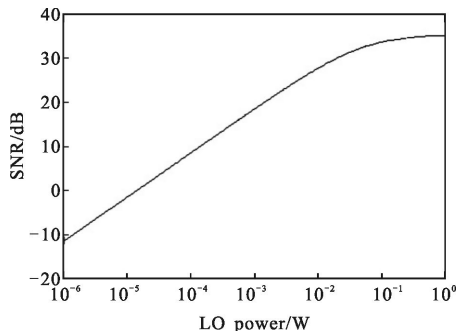


图 1 不考虑本振强度噪声时 SNR 随本振功率变化关系
Fig.1 Relationship between SNR and P_L neglecting the LO intensity noise

可以看出, 随着本振功率的增加, SNR 逐渐增加, 当散粒噪声将远大于热噪声时, 信噪比趋于一稳定值。

当两探测器不完全匹配时, 设探测器量子效率为 $\eta_1 = 0.9, \eta_2 = 0.8, \gamma = 10^6 \text{ A}^{-1}$ 。在不同回波信号功率的情况下由公式(9)可得图 2。

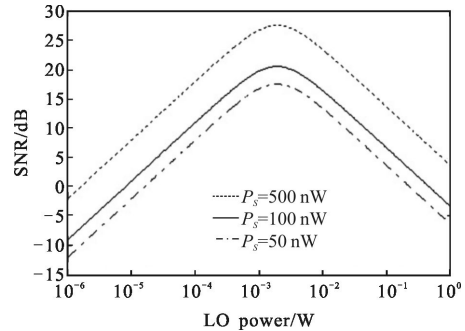


图 2 考虑本振强度噪声时, 不同信号功率下 SNR 随本振功率变化关系

Fig.2 Relationship between SNR and P_L considering the LO intensity noise in different P_s

从图 2 中可以看出, 随着本振的增加, 信噪比先增大后减小, 这是因为噪声的主要成分由散粒噪声变为了本振强度噪声。对于设置的参数, 当本振功率为 1.7mW 时, 输出信噪比达到最大。此外, 当探测距离不同时, 信号功率也随之改变, 这只影响信噪比整体的大小, 而不影响获得最大信噪比时本振功率的取值。说明探测系统参数确定后, 最佳本振功率也将确定。

改变探测器量子效率和相对强度噪声系数可得图 3。

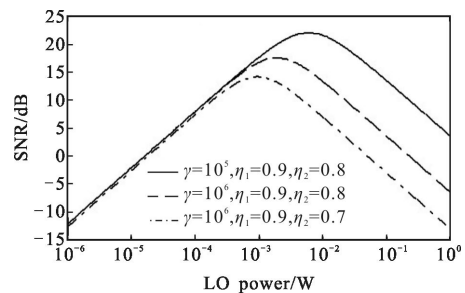


图 3 考虑本振强度噪声时 SNR 随本振功率变化关系
Fig.3 Relationship between SNR and P_L considering the LO intensity noise in different γ and η

从图 3 中可以看出, 相对强度噪声系数 γ 和两个光电探测器量子效率差值越小时, 最佳本振功率取值越大, 且此时能够获得的探测信噪比越大。当 γ 从 10^{-6} 降至 10^{-5} 时, 信噪比峰值提高了约 5 dB, 当两探测器量子效率差值减小 0.1 时, 信噪比峰值可提高 4 dB。

3 平衡外差探测 SNR 与本振功率关系的实验

3.1 实验装置

实验装置结构如图 4 所示。

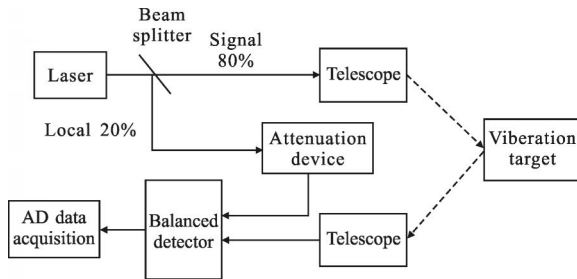


图 4 实验装置框图

Fig.4 Schematic of experimental device

激光器采用的是德国 NTK 公司生产的波长 1 550 nm 的光纤激光器,输出功率范围为 40~200 mW,激光线宽小于 0.1 KHz,输出连续激光经光纤分束器之后分为强度为 80% 和 20% 的两束。选取光强为 80% 的光束做为信号光经过光纤准直镜,照射被测目标,选取由 Txktronix AFG3251 任意波形发生器产生信号,经 AMPHIBIOUS YD-AC809 功放驱动的 Pioneer Hi-Fi 超低音喇叭作为目标;光强为 20% 的光束作为本振光,经过衰减器(衰减范围 0.8~45 dB)与望远镜收集的目标散射光一同进入保偏光纤耦合器,通过调节衰减器可以改变本振光强度。光纤耦合器输出端直接与平衡探测器相连接。经相干探测输出的电信号,连接到 A/D 采集卡实现数据采集,最后利用 Matlab 软件对所采集数据进行处理和分析。实验中平衡探测器采用的是 New Focus 公司的 Model 1817 型探测器,带宽为 80 MHz。采集卡型号为 SDR14,由 SP Devices 公司生成,采样位数是 2×14 bit,采样率可达 800 MHz。

3.2 实验结果与分析

实验中设定喇叭的振动频率为 200 Hz,振幅为 200 mV,距离收发系统 150 cm,激光器输出功率为 40 mW,测得在 150 cm 距离上回波光功率为 260 nW。根据数值分析结果及探测器的阈值,调节衰减器,使本振光功率在 10^{-6} ~1 W 的范围内变化。并选取 PL 为 100 μ W、600 μ W、1000 μ W 3 个典型的实验结果如图 5、6 所示。

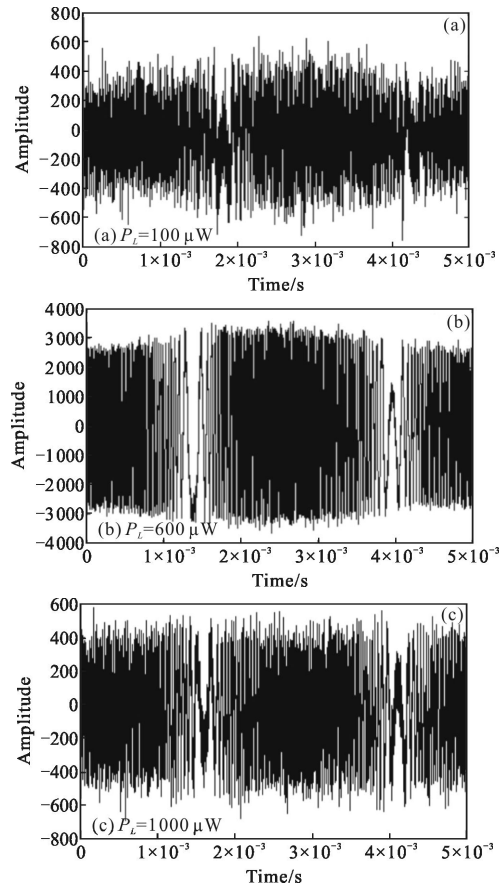


图 5 不同本振下目标振动回波信号

Fig.5 Echo signal of vibration in different P_L

时频分析时考虑到简单的 Wigner-ville 分布由于交叉项的干扰导致时频聚焦性差,而常用的短时傅里叶变换(STFT)又由于不确定原理不能同时获得高的时间和频率分辨率。所以采用当前效果较理想的平滑伪魏格纳威利联合时频分布^[13](SPWVD)方法对回波信号进行处理,提取微动特征。

微多普勒效应相当于对信号进行频率调制,从图 5 中可以明显看出,图(b)的调频现象最明显,而图(a)和(c)都较差,实验结果说明,随着本振功率的增加,回波信号质量经历了由差到好再变差的过程。图 6 中黑色背景代表背景噪声,白色代表信号分别强度及频率,白色线条与黑色背景的对比越清晰则说明此处的信噪比越高。从图中可以看出,同样选取最好的时频分析方法对回波进行时频变换时,图(b)的效果最好,几乎不受噪声影响,而图(a)和(c)的结果明显较差,特别是图(a),噪声干扰明显。说明本振功率的增大使时频分析后得到的微多普勒特征先增强后减弱。以上实验结果与理论推导和仿真结果相

同,进一步验证了所建立的本振功率与模型的正确性。而且可以预见,进一步增加探测距离,回波信号减弱,信噪比减小,未选取最佳本振功率将使特征更快的淹没于噪声中,难以提取。所以,根据实验系统选择最佳本振功率对于提高微多普勒效应探测距离和探测精度意义重大。

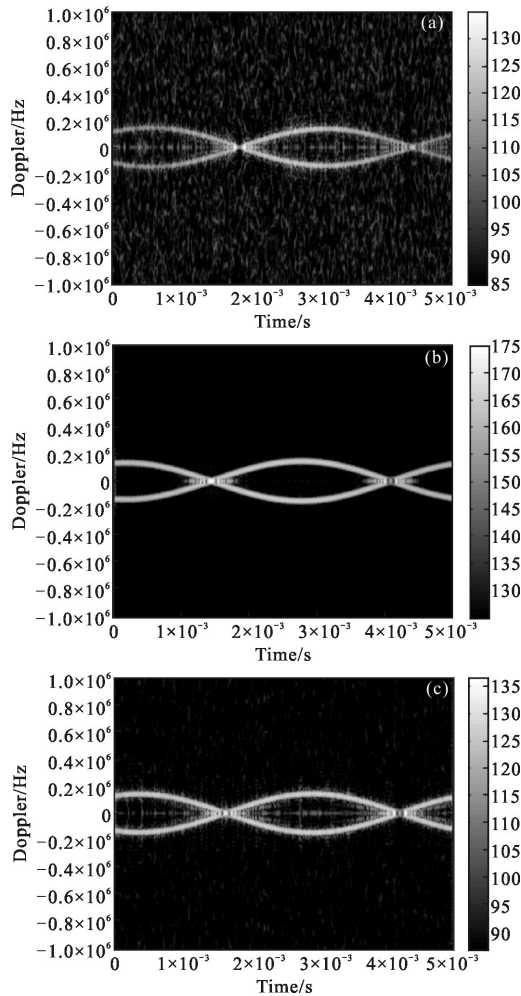


图 6 不同本振功率下回波 RSPWV 分布

Fig.6 RSPWV distribution in different P_L

4 结 论

在实际情况下,平衡探测中的两个光电探测器的量子效率不可能完全相同,所以需要考虑未彻底消除的本振强度噪声。通过仿真及实验结果表明:当本振功率不断增大且散粒噪声为主要噪声时,回波信噪比随之增大;当本振功率继续增大,使得本振强度噪声成为系统主要噪声时,回波信噪比将逐渐减小。信噪比的变化对于目标振动产生的微多普勒特征的提取有明显的影

响,获得最佳信噪比的本振功率值也确定。当选用最佳本振功率进行外差接收时,时频分析的结果可读性更强,特征提取误差更小。对于微多普勒效应的远距离探测,回波功率将更小,信噪比更差,选取最佳的本振功率对于目标的探测识别将有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Chen V C. Micro-Doppler effect of micromotion dynamics: a review [C]//AeroSense 2003, International Society for Optics and Photonics, 2003: 240-249.
- [2] Wang Dechun. An Overview of Micro-Doppler Radar [J]. *Journal of CAEIT*, 2012, 7(6): 575-580. (in Chinese)
- [3] Wil Otaguro, Cecil Hayes. Microdoppler radar systems [C]// SPIE, 2000, 4091: 268-277.
- [4] Zhang Qun, Luo Ying, He Jin. Review of the researches on micro-doppler effect of radar targets [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Nature Science Edition*, 2011, 12(2): 22-26. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [6] Chen V C, Li F, Ho S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Trans on AES*, 2006, 42(1): 2-21.
- [7] Sun Yang, Zhang Jun, Fan Yafu. Detecting micro-Doppler effect of micro-motion dynamics by laser coherent radar of 1 550 nm [J]. *Chinese J Laser*, 2010 (5): 1222-1226. (in Chinese)
- [8] Chen V. The Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Boston: Artech House, 2011.
- [9] An Yuying, Zheng Xiaodong. Photoelectric Detection Principle [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2009: 152-157. (in Chinese)
- [10] 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): 53-58. (in Chinese)
- [11] 李彦超.光电探测器的最佳本振光功率的测量方法: 中国, 201310698120.9[P]. 2014-03-05.
- [12] Yang Yanlin, 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. (in Chinese)
- [13] Thayaparan T, StankovicL, Djurovic I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 700-722.