

doi:10.3788/gzxb20154412.1206004

基于声光移频的激光侦测正交解调方法

何宁¹,冯太琴¹,廖欣²

(1 桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

(2 无线宽带通信与信号处理广西重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:针对激光侦测信号调制与传输特点,提出一种基于多普勒移频的激光侦测系统,研究声光多普勒移频效应理论,探讨相干光平衡探测与正交解调原理,从数值仿真和频域分析了系统抗噪性能及载频失配对信号恢复的影响,给出基于声光移频效应的相干平衡激光侦测的技术实现方法.实验结果表明,基于相干平衡探测与正交解调的激光侦测系统可有效抑制基底及过剩强度噪声对系统输出的影响,进一步提高接收信噪比,实现声波振动对界面产生微扰的非接触信号检测,为实际应用提供一种有效的技术途径.

关键词:光学相干;声光移频;激光侦测;正交解调;噪声抑制

中图分类号:TN919.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)12-1206004-7

Quadrature Demodulation in a Laser-interception System Based on Acousto-optic Frequency Shifting

HE Ning¹,FENG Tai-qin¹,LIAO Xin²

(1 School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

(2 Key Laboratory of Wireless Windeband Communication And Signal Processing, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: According to modulation and transmission characteristics of laser interception, a laser-interception system based on Doppler frequency shift was put forward. The theory of Doppler frequency shift was studied, and the optical coherent balanced detection and quadrature demodulation were discussed. The effects of anti-noise performance and carrier-frequency mismatching on signal recovery were analyzed by numerical simulation and frequency-domain analysis, a technical method for laser coherent balanced interception based on acousto-optic frequency shift was proposed. Experimental results show that noise floor and excess intensity noise can be effectively suppressed by the proposed method, namely signal noise ratio can be improved, and thus non-contact detection for the perturbation at interface generated by acoustic vibration can be realized, which provides an effective technical method for practical application.

Key words: Optical coherence; Acousto-optic frequency shift; Laser interception; Quadrature demodulation; Noise suppression

OCIS Codes: 060.1660; 060.2330; 060.4510; 060.0060

0 引言

声光多普勒测量可对各种调制的振动微扰信号进行远距离、非接触式实时测量,它是一种光学外差相干探测,可获得信号的幅度、频率、相位和到达时间等信息,有利于微弱信号的检测.利用声光技术的相干探测

具有更好的灵活性、机动性和保密性,能克服低信噪比环境中的噪声影响,具有高灵敏度、动态响应快、高分辨率和抗干扰等优点.近年来,利用激光技术对动态目标的多普勒测量研究在目标产生的振动检测、风速测量、运动目标跟踪、多普勒成像、伪装识别、地雷探测等方面取得了显著成果,被广泛应用于微弱信号探测领

基金项目:国家自然科学基金(No.61461014)和广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金(No.GXKL061507)资助

第一作者:何宁(1958—),男,研究员,本科,主要研究方向为光通信及光电探测技术. Email:eicnhe@guet.edu.cn

通讯作者:廖欣(1968—),男,工程师,本科,主要研究方向为射频通信技术. Email:liaoshin@guet.edu.cn

收稿日期:2015-05-19; **录用日期:**2015-10-08

<http://www.photon.ac.cn>

域^[1-3].

激光侦测是一种非接触探测技术,具有一定的隐蔽性,目前常用的技术原理是将激光发射到被测目标周围易受声压作用产生振动的物体上,通过“猫眼效应”对反射光直接检测而实现主动侦测^[4],这种方式容易受外界干扰,在空间光传输中,大气扰动造成光电探测信号输出产生起伏,严重影响激光侦测的效果,特别在弱信号环境下,这种现象更加明显.而采用相干检测虽然可提高对信号侦测的选择性和抗干扰能力及接收灵敏度,但本振光的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)、散粒噪声和温差对系统的影响仍无法消除^[5-7].因此,如何提高侦测系统激光传输稳定性,增强信号检测的抗噪性能,是实现高性能激光侦测的关键.

传统激光侦测系统采用光强调制,进行非接触方式的声源探测,被测信号反射光路在空间传输,易受大气湍流和环境噪声影响^[8],降低了系统信噪比.一般情况激光侦听直接探测系统信噪比在大气环境噪声条件下能保持在 0 dB 以上,而正常人耳从噪声中提取语音

信号的极限信噪比为-12 dB,能较好解决大气干扰问题^[9].本文提出一种基于声光移频效应的相干光平衡探测及正交解调方法,利用声光调制后光载波受被测目标振动进行再调制而产生的多普勒频移,通过相干检测提高信号稳定性和抗干扰能力,解决无线光信号传输受大气扰动引起的幅度和相位起伏,探讨系统在抑制随机噪声和减小探测输出信号抖动影响方面的效果.

1 声光移频的激光侦测原理

为了提高激光侦测能力,采用声光移频效应的激光侦测正交解调方法,通过激光有效检测由声信号传播引起界面振动携带的信号频率信息,将激光注入保偏光纤处理,保证相干探测中稳定的偏振条件和光学匹配,减小背景光噪声引入的噪声影响,提高抗干扰能力,解决相干探测中载频失配问题,有利于改善系统信噪比,设计系统如图 1.

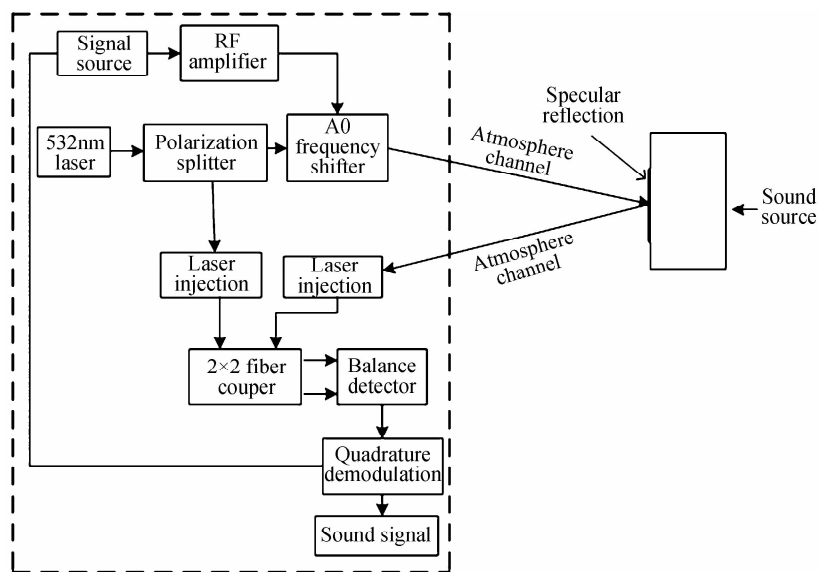


图 1 实验系统框图

Fig. 1 Experimental system diagram

实验系统主要由单频激光器、射频(Radio Frequency, RF)信号放大器、声光移频器、 2×2 光纤耦合器、光电探测器和正交解调电路组成.激光器输出经分束棱镜后分为信号光和参考光,其中信号光经声光移频器后的 1 级衍射光入射到被测声源的反射镜面上,反射光受声源振动被调制,产生多普勒瞬时频移,光纤注入器将反射光注入光纤,在 2×2 光纤耦合器中与另一路光纤注入的参考光混合后送平衡探测器进行相干检测处理,输出的调幅信号经正交解调电路解调后还原出被侦测的声音信号.

声光移频器^[10]通过衍射来改变入射光束,根据 RF 频率将激光频率上移或下移相应频率,声波在介质

中发生声光相互作用,产生的弹性应变或应力会引起介质折射率变化,此时,介质可以看作是“超声光栅”,且介质折射率的变化具有周期性^[11].RF 超声场和光场在声光相互作用介质内形成的超声光栅可以看做是体光栅,由于体光栅随声场同步波动,因而激光的移频频率与外加 RF 信号频率相同,只要 RF 信号频率固定,即可利用本振光与信号光之间的固定差频实现外差探测.目前声光移频器主要通过布喇格衍射实现激光信号的移频,当入射光以 Bragg 角入射时,若入射光与声波传播方向相反,则产生 +1 级衍射光,衍射光与水平方向夹角(超声波波面间的夹角)为 θ_0 ,衍射光频率提高;反之,衍射光频率降低.声光移频器原理如图 2,其

中,1级衍射光束的频率和入射光束的频率满足 $f_i \pm f_s = f_d$,其中 f_i 、 f_d 、 f_s 依次表示入射光、衍射光和声光介质中超声波的频率。

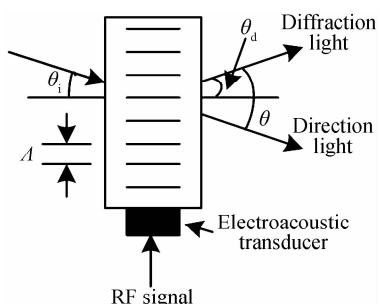


图2 声光移频器原理

Fig.2 Acousto-optic frequency shifter schematic diagram

大气干扰产生的噪声、侦听系统周围声音引入的噪声、光电探测系统本身的噪声是激光侦听系统中噪声的主要来源,可以利用平衡探测器来有效抑制。在接收端对调幅(Amplitude Modulation, AM)信号进行解调的方式有相干解调、非相干解调和正交解调。其中非相干解调实现起来最容易,但是在输入信噪比低时,解调会发生失真,产生“解调门限”问题,激光侦测属于微弱信号检测,因此一般不采用。相比非相干解调,相干解调的抗噪声性能要好些,不会出现“解调门限”的现象,但是在解调过程中要求有与高频载波频率和相位完全相同的波形才能正确解调出调制信号。要达到载波同步,必须要通过复杂的载波恢复过程,如果对载波的频率估计不准确,容易造成载频失配,解调会严重失真^[12]。采用正交解调的方法对 AM 信号进行处理,可以较好地解决有关载频失配的问题,同时保持了相干解调较好的抗噪声性能,而且系统设计也比较简单。

2 噪声抑制与抗载频失配分析

2.1 平衡探测原理及噪声分析

平衡探测器^[13]作为近几年发展起来的器件,与单端探测相比,可以消除参考光的过剩强度噪声和探测器散粒噪声,抑制共模噪声,提高中频信号功率,改善系统信噪比且能充分利用本振光功率^[14]。平衡探测原理如图3,它主要由一个 2×2 光纤耦合器和两个探测器组成。两路光信号 E_L 和 E_S 进入 2×2 光纤耦合系统后形成了两束光束对 $(E_{S1} + E_{L1})$ 和 $(E_{S2} + E_{L2})$,两束光分别进入光电探测器形成光生电流 I_1 和 I_2 ,两项光电流经过差分处理后,形成的平衡式探测系统响应电流信号为^[7]

$$I_{\text{balance}}(t) = \frac{e}{h\nu} \{ [(1-\epsilon)\eta_1 - \epsilon\eta_2] A_S^2 + [\epsilon\eta_1 - (1-\epsilon)\eta_2] \cdot A_L^2 \} + \frac{e}{h\nu} \{ 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)} A_S A_L \cos[(\omega_L - \omega_S)t + (\varphi_L - \varphi_S)] \} + [n_1(t) - n_2(t)] \quad (1)$$

式中, e 为电子电荷量, h 为普朗克常量, ν 为光频率 ϵ 表示光纤耦合器的分束比, η_1 和 η_2 分别为系统中两个光电探测器相应的量子效率, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为噪声电流, A_L 、 ω_L 、 A_S 、 ω_S 分别表示信号光和参考光的振幅和频率。

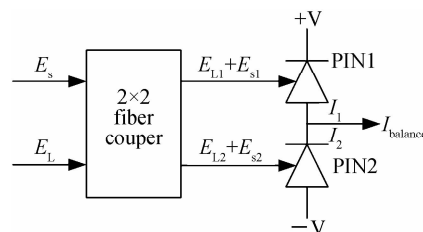


图3 平衡探测原理

Fig.3 Balance detection system

光电探测器作为接收系统前端,对输出噪声的性能影响较大,其光电转换后的输出电流包含参考光中的过剩强度噪声、热噪声及散粒噪声,由于热噪声数量级远小于散粒噪声,可忽略不计^[15]。而平衡探测的散粒噪声为两探测器噪声之和,依据信噪比公式,可知平衡探测的信噪比满足

$$\text{SNR}_{\text{balance}} = \frac{I_{\text{balance}}^2}{I_{\text{excess}}^2 + I_{\text{shot}}^2} = \frac{(\eta_1 + \eta_2)^2 (1-\epsilon) \epsilon A_S^2 / h\nu}{\left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1-\epsilon)]^2 B_w + [\eta_1 \epsilon + \eta_2 (1-\epsilon)] B_w} \quad (2)$$

式中, B_w 为探测器带宽, γ 为相对强度噪声系数。同理,在相同的输入信号光和参考光的情况下,采用单端探测的信噪比满足

$$\text{SNR}_{\text{single}} = \frac{\eta_1 (1-\epsilon) A_S^2 / h\nu}{B_w + \left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 \eta_1 \epsilon B_w} \quad (3)$$

根据式(2)和(3),假设平衡探测器中两个光电探测器相匹配,单端探测系统中探测器量子效率为 $\eta_1 = 0.9$,且相对强度噪声系数取值为 $\gamma = 10^5 \text{ A}^{-1}$,平衡探测与单端探测的信噪比随本振光功率的变化关系如图4。

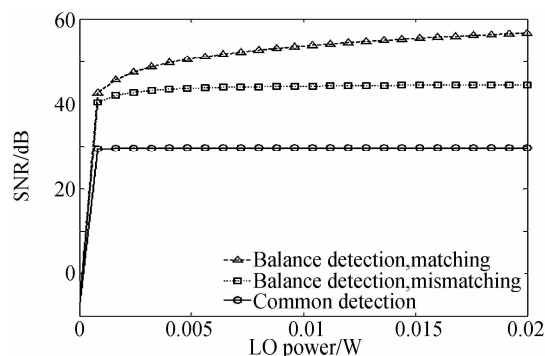


图4 平衡探测与单端探测信噪比特性仿真

Fig.4 SNR simulation of balance detection and common coherence detection

从图4可以看出,在光束的分束比和过剩强度噪声的限制下,单端探测信噪比随本振光功率的增加不明显,而理想的平衡探测系统(匹配状态),由于不存在过剩强度噪声,随着本振光功率的增大,信噪比不断增加.实际应用中由于过剩强度噪声不能完全被消除,信噪比将随本振光功率的增加而趋于一个饱和值.

2.2 正交解调原理仿真与性能分析

激光侦测系统中反射光受声波信号振动微扰产生一种激光幅度调制,通过平衡探测后得到AM信号,系统借鉴软件无线电中的思想来对AM信号进行解调,即正交解调,其目的是将调制信号中的高频成分滤除,将信号变到了零中频,有效解决载频失配导致的解调失真问题.正交解调原理如图5.

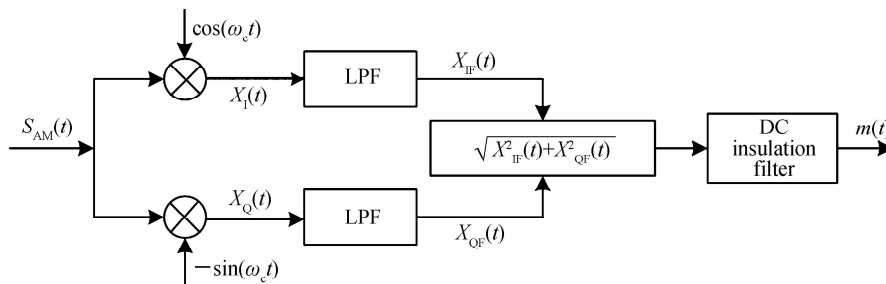


图5 正交解调原理框图

Fig. 5 Quadrature demodulation schematic diagram

接收的AM信号 $S_{AM}(t)$ 分两路分别与接收端产生的高频正交载波 $\cos(\omega_c t)$ 和 $-\sin(\omega_c t)$ 相乘来得到同相分量和正交分量,分别为

$$X_I(t) = S_{AM}(t) \cos(\omega_c t) = [A_0 + m(t)] \cos(\omega_0 t + p) \cdot \cos(\omega_c t)$$

$$= \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] [\cos(\omega_0 t + \omega_c t + p) + \cos(\omega_0 t - \omega_c t + p)] \quad (4)$$

$$X_Q(t) = -S_{AM}(t) \sin(\omega_c t) = -[A_0 + m(t)] \cos(\omega_0 t + p) \sin(\omega_c t)$$

$$= \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] [\sin(\omega_0 t + \omega_c t + p) - \sin(\omega_0 t - \omega_c t + p)] \quad (5)$$

两路分量均经低通滤波器将高频成分(和频分量)滤除

后得到

$$X_{IF}(t) = \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] \cos[\omega_0 t - \omega_c t + p] \quad (6)$$

$$X_{QF}(t) = \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] \sin[\omega_0 t - \omega_c t + p] \quad (7)$$

对 $X_{IF}(t)$ 和 $X_{QF}(t)$ 进行平方和开方后得到

$$\sqrt{X_{IF}^2 + X_{QF}^2} = A_0 + m(t) \quad (8)$$

经过隔直滤波将直流成分滤除后获得调制信号 $m(t)$.

利用MATLAB对AM调制及利用正交解调的方法进行了仿真,搭建的AM调制仿真模型如图6虚线部分,实线部分为正交解调部分.

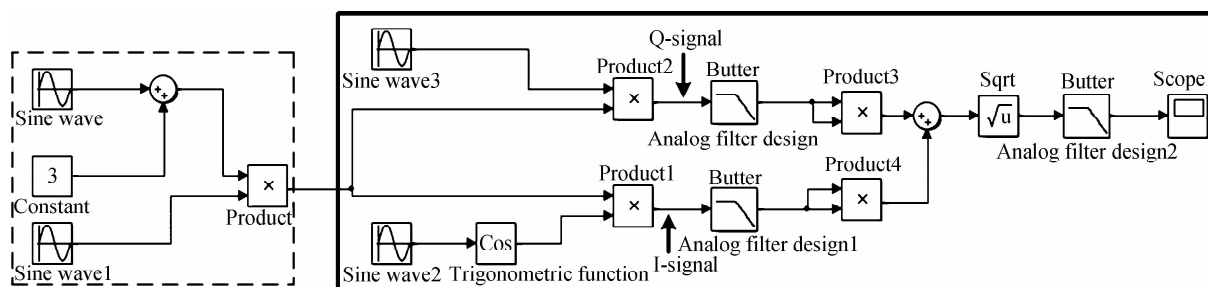


图6 AM调制及正交解调仿真图

Fig. 6 AM modulation and quadrature demodulation simulation

图6虚线框中音频调制信号和高频载波通过调制器产生的AM已调信号波形如图7.

对于正交解调来说,已调信号分别与 $\sin(\cdot)$ 和 $\cos(\cdot)$ 相乘后得到同相分量(I路信号)和正交分量(Q路信号).I、Q两路分量自乘后相加输出的波形如图8,且叠加后的波形比I、Q两路单独分量的幅度要大.

经除法器与低通滤波器后的波形如图9.可以看出,正交解调能较好的解调出原始的调制信号.

由图5可知,经正交解调后的同相分量 $X_I(t)$ 和正交分量 $X_Q(t)$ 可通过低通滤波将本地载波与和频成分

滤除,从频域上分析,当高频分量小于 $f_s/2$ (f_s 为载频信号频率),需要保留的低频分量与需要滤除的高频分量可以完全分离,但当高频分量大于 $f_s/2$ 时,高频分量的镜像与低频分量发生混叠,造成滤波后的同相和正交分量失真,导致AM解调出错.所以适当控制正交解调的调制频偏,本地载波与信号载波之间的频率偏差不会影响信号解调,因此,采用正交解调对AM信号解调具有一定的抗载频失配能力.

通过对相干平衡探测和正交解调方法的理论与仿真分析,证明了系统的噪声抑制及抗干扰能力,系统充

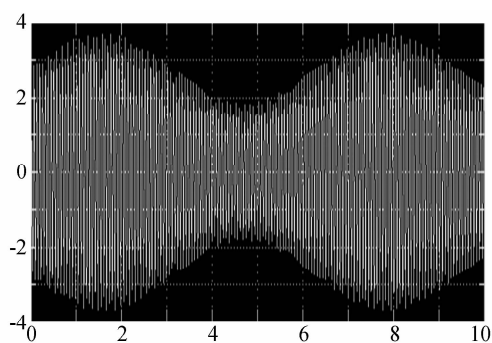


图 7 已调信号波形
Fig. 7 Modulated signal waveform

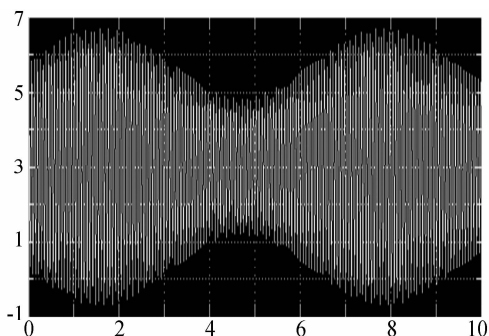


图 8 I、Q 两路相加后波形
Fig. 8 Waveform after I add Q

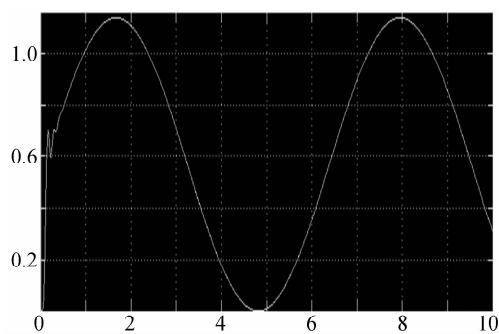


图 9 解调后输出信号波形
Fig. 9 Output signal waveform after demodulation

分利用声光移频、平衡探测和正交解调优势,通过相干检测和差分技术,不仅提高了被测信号的选择性,而且有利于降低随机噪声起伏对系统的影响.理论和实验证明,采用相干检测技术系统信噪比相比强度调制/直接检测系统可以提高 10 dB 以上.

3 系统实验测试

依据图 1 对系统噪声性能进行测试与分析,实验测试平台如图 10.图中光路系统由激光器、声光移频器、光纤耦合器和平衡探测器完成声音信号的激光侦测,对光电转换输出的微弱 AM 信号进行正交解调,由

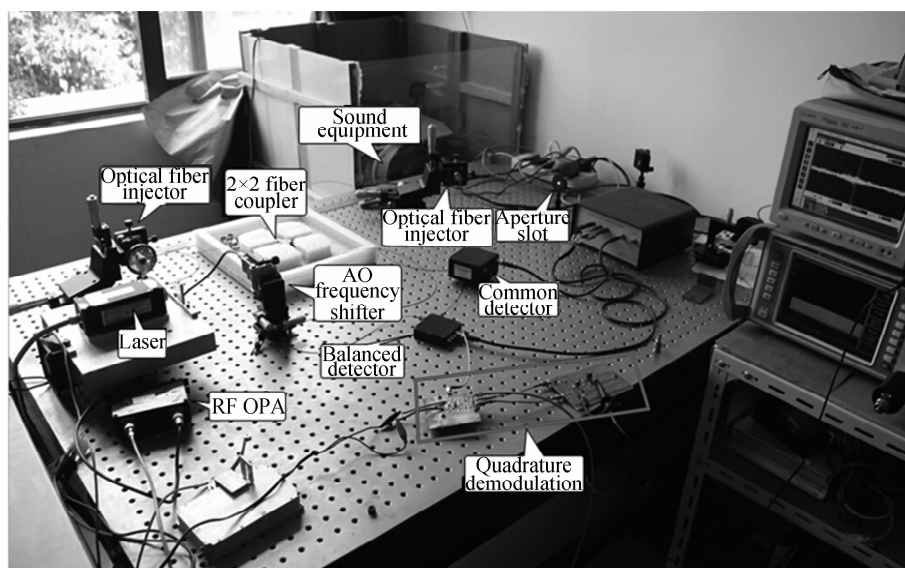


图 10 系统实验测试平台
Fig. 10 Experimental test platform

RF2713 芯片正交解调、AD835 芯片信号相乘、OPA690 芯片信号相加放大后滤波还原声音信号.

根据实验条件,系统设定激光器输出光功率为 16 dBm,声光移频器输入的射频信号(信号载频)频率为 35 MHz,AM 波形的调制信号为随机音频信号,系统经光束分光及声光移频后,由激光注入到达光纤耦合器的信号光与参考光分别为 -29 dBm 和 0 dBm,由平衡探测器输出的相干检测电信号是调制到 35 MHz

载频上玻璃界面扰动产生的移频信号,通过频谱仪观察信号频率在 35 MHz 时系统的信号与噪声输出状态,图 11 所示为单端与平衡探测模拟系统输出信号的频谱.

由图 11 可知单端探测的基底噪声被明显抬高,而平衡探测的噪声要小很多,其输出载噪比较单端探测系统提高了近 5 dB.

由激光侦测得到的 AM 信号送后端正交解调电路

处理,对声波振动产生的微扰信号进行检测.实验采用声音信号作用玻璃界面进行测试,正交解调后的 I 路、Q 路信号波形及叠加的波形分别为图 12(a)和(b).

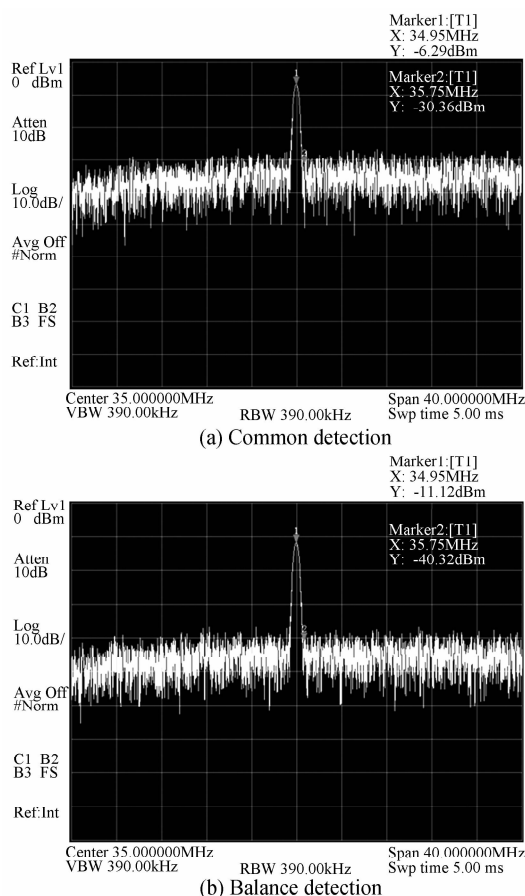


图 11 模拟输出信号的频谱对比
Fig. 11 Analog output signal spectrum

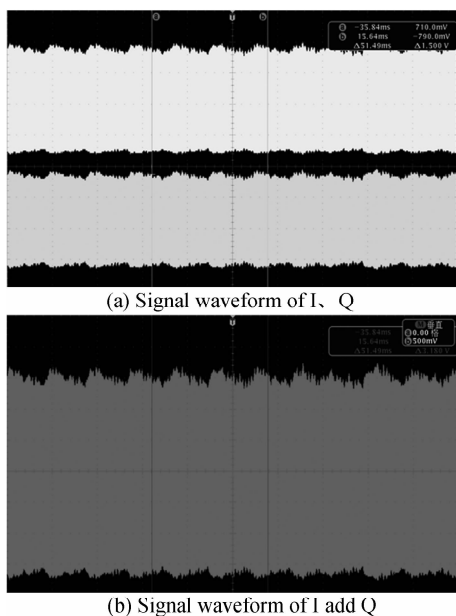


图 12 正交解调后波形
Fig. 12 Signal waveform

I、Q 叠加信号经除法及低通滤波放大后,可恢复出音频信号.可见,采用激光多普勒移频侦测系统能较好实现声波振动产生微扰的实时信号检测.

通过实验测试,系统采用声光多普勒移频对激光侦测环境中声波振动引起玻璃界面产生的微扰信号进行相干检测及正交解调,在实时性、频率带宽、检测精度和接收灵敏度方面都获得一定效果.噪声抑制方面利用平衡探测比单端探测具有较大优势.在空间环境信噪比为 -23 dB 的实验条件下,采用平衡探测的正交解调系统信噪比可达到 8dB 以上,比单端探测的正交解调系统提高了 5dB 左右.依据系统激光器线宽、光学匹配状态、激光注入效率、光电探测模块和正交解调模块的低噪特性、以及测量应用环境不同,其探测灵敏度和信噪比改善有密切关系.

4 结论

本文结合声光效应与相干光探测技术,从理论和实验探讨激光多普勒侦听技术方法,分析了激光侦听系统的噪声特性,提出采用平衡探测抑制信号传输过程带来的基底及过剩强度噪声,通过频域分析了正交解调在解决载频失配对信号恢复的影响,在目标声源的激光多普勒检测信噪比改善等方面具有一定优势,有利于提高系统接收能力和输出稳定性,为弱信号环境下通信信号的噪声抑制的实际应用提供一种新的技术途径.

参考文献

- [1] SHANG Jian-hua, REN Li-long, XU Hai-qin, *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.
- [2] ANTONELLIA L, BLACKMON F. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, **116** (6): 3393-3403.
- [3] PENG Shu-ping, CHEN Tao, YU Hong-jun, *et al.* Doppler frequency spectral discrimination of moving target based on coherent detection[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2013, **40** (12): 1208008.
彭树萍,陈涛,于洪君,等.基于相干探测的动目标多普勒频谱识别[J]. *中国激光*, 2013, **40**(12): 1208008.
- [4] ZHANG Chao-fan. The improvement and realization of laser eavesdropping[J]. *Laser and Infrared*, 2008, **38** (2): 145-148.
张超凡. 激光窃听技术的改进与实现[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(2): 145-148.
- [5] WANG Chun-hui, GAO Long, LI Yan-chao, *et al.* Investigation of balanced detection and receiver for coherent radar [C]. SPIE, 2009, **7382**: 738201I-7382018.
- [6] XU Nan, LIU Li-ren, WAN Ling-yu, *et al.* Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (2): 347-351.

- 许楠,刘立人,万玲玉,等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, **30**(2):347-351.
- [7] YANG Yan-ling, LI Yan-chao, GAO Long, *et al.* Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent radar [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.
- [8] JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng. The technology and systems of space laser communication[M]. Beijing : National defense industry press, 2010, 47-50.
- 姜会林,佟守峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2010, 47-50.
- [9] KANG Hong-xiang. Research on the noise resist of atmospheric disturbance and environment noise in the laser listening system[D]. National university of defense technology , 2003.
- 康宏向. 激光侦听信号中大气噪声与环境噪声的降噪研究[D]. 国防科技大学, 2003.
- [10] GUO Li-ren, HU Yi-hua, LI Zheng, *et al.* Research on influence of Acousto-optic frequency shifter to micro-doppler effect detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0212006.
- 郭立仁,胡以华,李政,等. 声光移频器对微多普勒效应探测的影响研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(2): 0212006.
- [11] GONG Yu-xin, HE Ning, ZHANG Lei. Research into the approaches of coherent detection with optical fiber delay line based on phase-controlling [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, **29**(7):14-16.
- 龚雨心,何宁,张雷. 基于光纤延迟线相位控制的相干光探测方法研究[J]. 光通信技术, 2014, **29**(7):14-16.
- [12] ZHANG-Yong, XU Yi-nan. Perform ance analysis of AM signal quadrature demodulation method [J]. *Electronic World*, 2013:42-43.
- 张勇,许忆楠. AM 信号正交解调方法的性能分析[J]. 电子世界, 2013:42-43.
- [13] LIU Dan, LIU Zhi, WANG Pu-yao, *et al.* Anti-Jamming modulation/demodulation technology of atmospheric laser communication system[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **39**(7):0705004.
- 刘丹,刘智,王璞瑶,等. 一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术[J]. 中国激光, 2012, **39**(7):0705004.
- [14] WANG Chun-hui, GAO Long, PANG Ya-jun, *et al.* Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to noise ratio of $2\mu\text{m}$ 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 $2\mu\text{m}$ 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.
- [15] LIU Hong-yang, ZHANG Yan-ge, AI Yong, *et al.* Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2014, **51**:070601.
- 刘宏阳,张燕革,艾勇,等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计和实现[J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**:070601.