

文章编号:1004-4213(2011)05-0753-5

激光微多普勒探测系统中降低相位噪声影响的方法研究

张海洋,赵长明,杨苏辉

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘 要:相干微多普勒激光雷达具有探测灵敏度高、探测信息量大等特点,特别适合于动目标探测、目标特征识别等应用.本文从线宽和探测距离两个方面讨论了模场相位随机起伏(相位噪声)对于测速准确度的影响,实验证实了相位噪声对激光微多普勒探测的影响,并探索出解决上述问题的方法——光纤补偿法.实验中,以输出波长为 1.064 μm 单块非平面环形腔激光器为光源,利用光纤补偿方法,并结合时频变换的算法,用外差探测的方式成功观测到了微多普勒频移,在传输距离为 11 km 时,系统最低探测速度达到了 0.5 mm/s,速度分辨率达到了 mm/s 量级,频率分辨率达到了 kHz 量级,为微多普勒激光雷达的实际应用奠定了良好的实验基础.

关键词:相干激光雷达;微多普勒;相位噪声;距离补偿

中图分类号: TN958.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0753

0 引言

一个目标或目标组成部分的机械振动或转动对雷达回波信号产生附加频率调制,导致在目标的多普勒频率两侧产生边带,这种频率调制称为微多普勒效应^[1-3].很多运动形式都会产生微多普勒现象,弹道导弹飞行中段时释放的诱饵弹、直升飞机的螺旋桨、喷气引擎、军舰和装甲车上雷达天线罩等都包含微多普勒特征.目标的微多普勒特性反映了目标的电磁散射特性、几何结构和运动特征,为雷达目标特征提取和目标识别提供了新的途径.相干微多普勒激光雷达^[4]具有探测灵敏度高、探测信息量大等特点,特别适合于动目标探测、目标特征识别等应用.微多普勒激光雷达要想在实际应用中发挥作用,必须要解决远距离精确探测的问题.而其中重要的因素就是激光器线宽的影响,线宽的加宽主要由激光器内部自发辐射导致的噪音造成,传输距离越长,噪音的影响越大.本文从线宽和探测距离两个方面分别讨论了模场相位随机起伏(相位噪声)对于测速准确度的影响,实验证实了激光对激光微多普勒探测的影响,并探索出解决上述问题的方法——光纤距离补偿法.

1 外差探测中的噪音分析

单模激光可认为是一个有相位扰动,振幅稳定

的准单色电磁场

$$E(t) = E_0 \exp j[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中 E_0 为振幅, ω_0 为电磁场中心频率, $\varphi(t)$ 为相位随机波动,它导致谱线展宽.引入光场的自相关函数

$$G_E^{(1)}(\tau) = \langle E^*(t)E(t+\tau) \rangle = \langle \exp [j\Delta\varphi(t,\tau)] \rangle \cdot \exp(j\omega_0\tau) \quad (2)$$

$\Delta\varphi(t,\tau)$ 为相位抖动,表示从时间 t 到 τ 随机相位的变化.

$$\Delta\varphi(t,\tau) = \varphi(t+\tau) - \varphi(t) \quad (3)$$

在大多数情况下,该相位随机变化可假设成平稳高斯随机过程,有

$$\langle \exp[\pm j\Delta\varphi(t,\tau)] \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2}\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle\right] \quad (4)$$

则光场的相关函数可以表示为

$$G_E^{(1)}(\tau) = \exp\left[-\frac{1}{2}\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle\right] \exp(j\omega_0\tau) \quad (5)$$

$\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle$ 可以看作是随延迟时间线性变化的,则有

$$\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = 2\gamma|\tau| \quad (6)$$

2γ 为洛仑兹型激光场光谱的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM).

当采用自外差法探测时,由第二个耦合器输出的合成场为

$$E_T(t) = E(t) + \alpha E(t+\tau_0) \exp(j\Omega t) \quad (7)$$

式中 α 为两束光之间的分光振幅比, τ_0 为探测产生的延时时间, Ω 代表声光调制器所加的射频频率.光

第一作者:张海洋(1981-),男,讲师,博士,主要研究方向为固体激光器及激光雷达. Email: ocean@bit.edu.cn

收稿日期:2010-09-08;修回日期:2010-12-15

电探测器的平方率将 $E(t)$ 中相位随机波动转化为强度噪声,反映为光电流的频谱展宽.为了将光电流频谱与单模激光线宽相联系,引进光电流自相关函数 $R_I(\tau)$

$$R_I(\tau) = e\sigma G_{E_T}^{(2)}(0)\delta(\tau) + \sigma^2 G_{E_T}^{(2)}(\tau) \quad (8)$$

式中 e 为电子电荷, σ 为光电探测器灵敏度, $\delta(t)$ 为 δ 函数, $G_{E_T}^{(2)}(\tau)$ 为第一阶光电流强度相关函数,该函数定义为

$$G_{E_T}^{(2)}(\tau) = \langle E_T(t)E_T^*(t)E_T(t+\tau)E_T^*(t+\tau) \rangle \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)得

$$G_{E_T}^{(2)}(\tau) = E_0^4 \left\{ (1+\alpha^2)^2 + 2\alpha^2 \cos(\Omega\tau) \cdot \exp[-\langle \Delta\varphi^2(\tau_0) \rangle - \langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle + \frac{\langle \Delta\varphi^2(\tau-\tau_0) \rangle + \langle \Delta\varphi^2(\tau+\tau_0) \rangle}{2}] \right\} \quad (10)$$

令 $\bar{\Omega} = \Omega/2\gamma$, $\bar{\tau} = 2\gamma\tau$, $\bar{\tau}_0 = 2\gamma\tau_0$, 式(10)可简化为

$$\frac{G_{E_T}^{(2)}(\bar{\tau})}{E_0^4} = (1+\alpha^2)^2 + \begin{cases} 2\alpha^2 \cos(\bar{\Omega}\bar{\tau}) \exp(-\bar{\tau}) & (|\bar{\tau}| < \bar{\tau}_0) \\ 2\alpha^2 \cos(\bar{\Omega}\bar{\tau}) \exp(-\bar{\tau}_0) & (|\bar{\tau}| > \bar{\tau}_0) \end{cases} \quad (11)$$

忽略散粒噪声项,通过傅里叶变换得自外差的光电流谱为

$$\frac{S_1(\omega)}{\sigma^2 E_0^4} = [1+\alpha^2]^2 \delta(\omega) + \alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \delta(\omega-\bar{\Omega}) + \alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \frac{1}{\pi[1+(\omega-\bar{\Omega})^2]} \left[\exp(\bar{\tau}_0) - \frac{\sin(\bar{\omega}-\bar{\Omega})\bar{\tau}_0 - \cos(\bar{\omega}-\bar{\Omega})\bar{\tau}_0}{\bar{\omega}-\bar{\Omega}} \right] \quad (12)$$

可以看出式(12)中 $1/\pi[1+(\bar{\omega}-\bar{\Omega})^2]$ 表现为洛伦兹线形.为了计算简便假设声光调制频率 $\Omega=0$,多普勒频移为 ω_D ,此时信号中心频率为 ω_D ,根据式(12)可知相干探测输出信号的电流谱为

$$\frac{S_1(\omega)}{\sigma^2 E_0^4} = [1+\alpha^2]^2 \delta(\omega) + \alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \delta(\omega-\omega_D) + \alpha^2 \exp(-\bar{\tau}_0) \frac{1}{\pi[1+(\omega-\omega_D)^2]} \left[\exp(\bar{\tau}_0) - \frac{\sin(\bar{\omega}-\omega_D)\bar{\tau}_0 - \cos(\bar{\omega}-\omega_D)\bar{\tau}_0}{\bar{\omega}-\omega_D} \right] \quad (13)$$

1.1 线宽对于测速的影响

设激光器输出激光线宽分别为 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz. 探测距离设定为 3 km, 该距离均小于或等于激光器相干长度. 幅度衰减设定为 $\alpha=0.1$, 多普勒频移设定为 $\omega_D=2$ MHz.

将上述值代入式(13)可得图 1 所示不同线宽下

的光电流谱线分布.由图 1 可知,中心频率为 2 MHz 的多普勒频率由于相位噪声的影响而变宽,且线宽为 1 kHz 较线宽 10 kHz 和 100 kHz 频谱分布较窄.仿真结果说明在相干距离内,窄线宽由于相位噪声小,使得系统的测速误差较小.

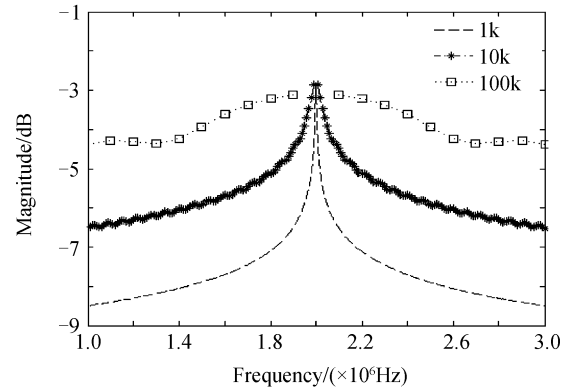


图 1 不同激光器线宽下的光电流谱线分布

Fig. 1 Spectral distribution of photocurrent with different laser linewidth

当探测距离为三种激光器相干距离时,仿真得出如图 2 所示的图形.图 2 为传输距离为 100 km 时,模拟出的信号电流功率谱.此时观测到的功率分布为准洛伦兹(Lorentz)线型,三个激光雷达探测到的功率谱的 FWHM 为对应激光器线宽的两倍,此时的相干探测激光雷达实际成为自外差线宽测量系统.

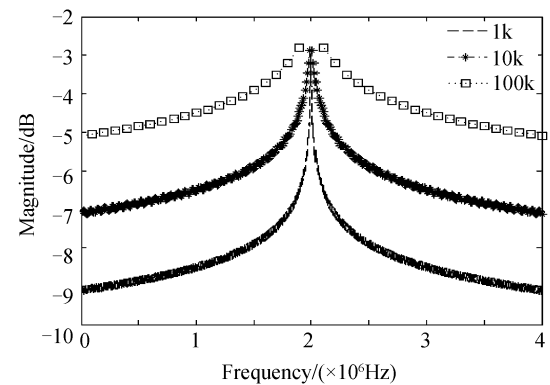


图 2 大于相干长度时不同线宽的电流谱线分布

Fig. 2 Spectral distribution of photocurrent with different laser linewidth when detection range is out of coherence length

1.2 探测距离对于测速的影响

设激光器输出激光线宽为 10 kHz,探测距离分别为 1 km, 5 km, 10 km, 三个探测距离均小于相干长度.幅度衰减为 0.1, $\omega_D=2$ MHz, 将其代入式(13)可得不同传输距离时的光电流谱线分布如图 3.从图 3 中可以看到传输距离为 1 km 时,电流谱线较窄,信噪比最高,相应的测速误差也最小.传输距离为 10 km 时,电流谱线最宽,测速误差也最大.

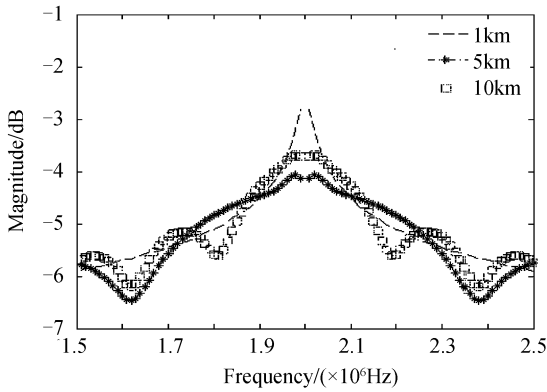


图3 不同探测距离时的光电流谱线分布
Fig.3 Spectral distribution of photocurrent with different detection range

当探测距离大于相干长度时,仿真结果如图4. 图4中激光线宽为10 kHz,探测距离分别为30 km, 50 km, 100 km. 由图4可知,三条谱线的分布大致相同,其FWHM只决定于激光器线宽.且距离越远,光电流谱线线型越接近洛伦兹线型.

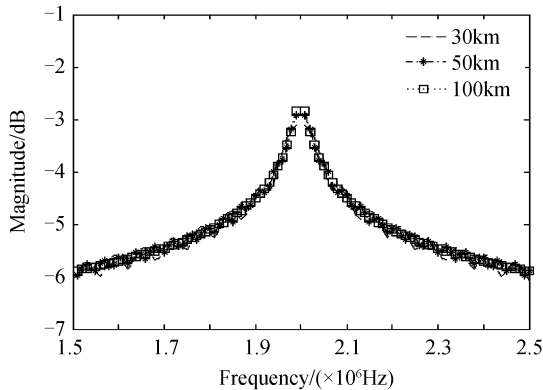


图4 大于相干长度时,不同距离时的光电流谱线分布
Fig.4 Spectral distribution of photocurrent with different laser linewidth when detection range is out of coherence length

图1~图4分别分析了不同激光器线宽和不同传输距离对于测速误差的影响.分析可知,窄线宽且探测距离短的激光雷达相对测速误差较小.随着探测距离的延长,当探测距离延长到相干长度的量级时,探测到的光电流谱线宽度实际上只决定于激光器的输出线宽,而不是探测距离的长短.该分析法只是针对相位噪音开展讨论的,并没有涉及到大气干扰等情况.另外,噪音对测速准确度的影响也在一定程度上取决于信号处理的方法,本节的处理方法是针对复数信号进行处理的,这种处理方法可以有效地减少噪音.

2 实验中相位噪音对微多普勒探测的影响

微多普勒探测系统实验原理如图5,其中激光器采用激光二极管泵浦的单块非平面环形腔Nd:

YAG激光器(NPRO),该激光器输出的 $1.064\ \mu\text{m}$ 的激光频率稳定度较高,输出激光功率达到100 mW.单频激光器的输出经声光调制器频移100 MHz后,其1级衍射光经过自聚焦透镜耦合进入单模光纤作为相干探测的参考光,0级光经自聚焦透镜耦合进入光纤,被光纤分束器分为两束.其中一束经过望远镜扩束后,照射到扬声器的发声单元上.扬声器的发声单元由低频信号发生器控制,能够产生最低0.1 Hz,幅度最大为1 mm的正弦运动.本实验中,利用光纤模拟空间光传输11 883 m时激光接收信号探测信号的变化(光纤折射率设为1.5).发射望远镜与目标空间距离约为2 m.

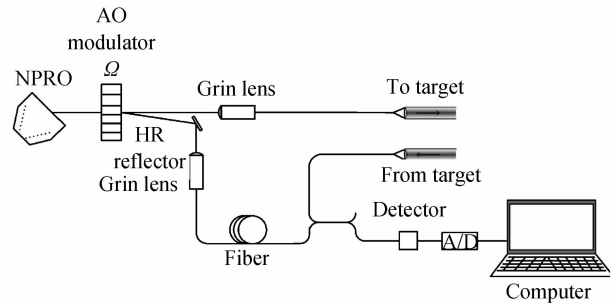
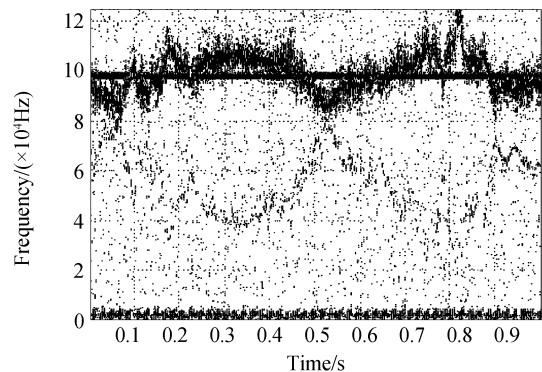


图5 微多普勒探测系统实验原理
Fig.5 Schematic diagram of Micro-Doppler detection system

实验中,驱动声光频移的射频信号的实际频率为100.09 MHz,采样率为250 kHz,采样时间为1 s,实验中没有采IQ两路复信号相关检测的方法,而是采用单路、实信号的处理方法,时频分布图为利用短时傅里叶变换(Short Fourier Transform, STFT)算法得出.微动目标的振动频率为2.1 Hz,振动幅度为0.25 mm.图6为探测距离为11 883 m时微动物体的微多普勒信息,其中图6(a)为信号时频分布图,图6(b)为利用一阶时间条件矩法提取的实际目标微多普勒变化曲线,且纵坐标为归一化频率值.

从图6(b)中可以看出,从时频分布中提取的微多普勒频移误差很大,这证明该系统在目前的探测



(a) The time-frequency distribution

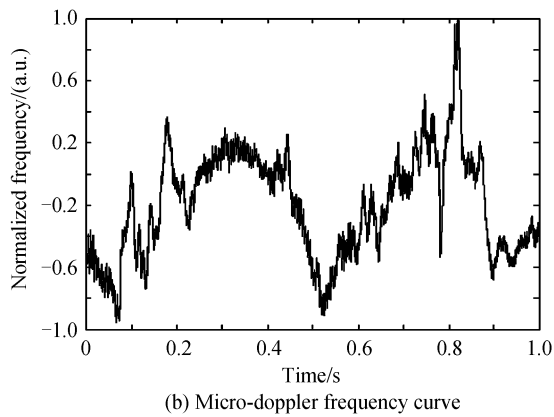


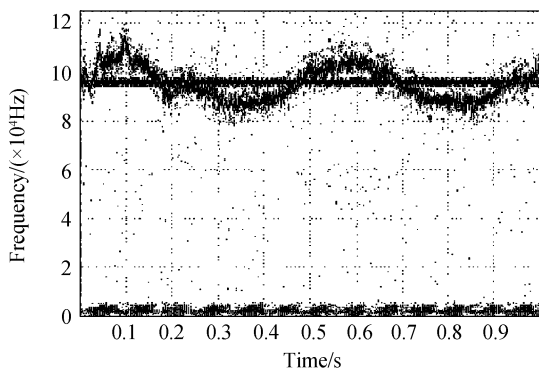
图6 探测距离为 11 883 m 时微动物体的微多普勒信息
Fig. 6 The micro-Doppler information with the detection range of 11 883 m

距离下还不能满足远距离高精度探测的要求,需要重新探索新的探测方法或者优化系统结构使其具备远距离探测的能力.

3 光纤补偿法测速实验

减小探测距离和压窄激光器输出的激光线宽均可以起到减小系统误差的目的.但是由于 kHz 量级的线宽对于激光器而言已经是非常优秀的频率特性,并且片面的压窄线宽还会影响单频激光器输出功率.减小目标和激光雷达的距离可以减小系统误差,却失去了远距离探测的意义.本文采用在本振光路上增加补偿光纤的方法,该方法可以有效地补偿远距离探测时造成的测速误差.

图 7 为探测距离 11 883 m、补偿光纤 3 852 m 时微动物体的微多普勒信息.图 7(a)为信号的时频分布图,图 7(b)为微多普勒变化曲线.由图 7 可知,较之图 6,通过在本振光路中增加补偿光纤的方法可以有效地减少测速误差,统计误差在 7.5% 以下.系统最低探测速度达到了 0.5 mm/s,速度分辨率达到了 mm/s 量级,频率分辨率达到了 kHz 量级.通过上述实验,证明光纤距离补偿方法可以抑制



(a) Time-frequency distribution of received signal

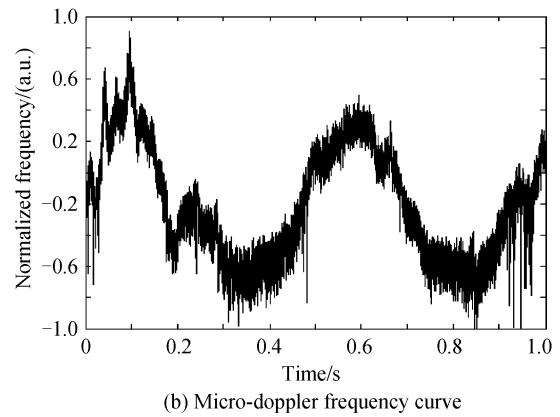


图7 补偿后的微多普勒信息
Fig. 7 The micro-Doppler information after compensating phase noise caused by the measurement error, realizing high accuracy micro-Doppler measurement at different distances, which is very meaningful for the demand of long distance precise detection.

4 结论

在以单频激光器为光源的相干微多普勒激光雷达系统中,利用时频变换的方法,成功地观测到了微多普勒频移.通过理论和实验分析了相位噪声对于微多普勒探测系统的影响,并通过实验验证了光纤距离补偿的方法可以有效地降低相位噪声的影响,为远距离精确探测应用奠定了良好的实验基础.

参考文献

- [1] CHEN Victor, HAO LING. Time-frequency transform for radar imaging and signal analysis[C]. Boston: Artech House, 2002.
- [2] CHEN Victor. Analysis of radar micro-doppler signature with time-frequency transform [C]. *Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing*, 2000: 463-466.
- [3] LI Jing, Hao LING. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. *IEEE Proceedings, radar Sonar Navigation*, 2003, **150**(4): 284-291.
- [4] ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, JIANG Qi-jun, et al. Laser detection on micro-doppler effect in Coherent Lidar [J]. *Chinese Journal of 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.
- [5] ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, JIANG Qi-jun, et al. Detection of doppler signal of moving target using 1.06 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 507-511. 张海洋,赵长明,蒋奇君,等.1.06 μm 相干激光雷达动目标多普勒信号探测[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 507-511.
- [6] LIU Hou-tong, LI Chao, HU Shun, et al. Impact of birefringence device on the polarization sounding of airborne lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 5-10. 刘厚通,李超,胡顺星,等.双折射器件对机载激光雷达偏振探测影响的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 5-10.

[7] GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, *et al.* Synthetic aperture imaging ladar imaging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 448-452.

郭亮,邢孟道,梁毅,等.合成孔径成像激光雷达成像算法研究[J].*光子学报*,2009,**38**(2): 448-452.

The Methods of Decreasing the Phase Noise Influence in Micro-Doppler Ladar

ZHANG Hai-yang, ZHAO Chang-ming, YANG Su-hui

(*School of Opto-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: With advantages of high sensitivity and more information, coherent micro-doppler laser was especially suitable for the detection of moving targets, identification of objects' characteristics, etc. The influence of phase fluctuation in the mode field (phase noise) on velocity accuracy was discussed in two aspects including linewidth and detection distance. The experimental results validated the phase noise influence on micro-doppler detection, and a new method resolving the above problems, which called range-compensated method, was proposed. In the experimental system, the laser source was monolithic non-planar ring laser with the wavelength of 1.06 μm . The micro-doppler frequency was observed by heterodyne detection, which was processed by means of time-frequency analysis. Minimum detecting velocity of the system is 0.5 mm/s, velocity resolution reaches a level of mm/s, and frequency resolution reaches a level of kHz, when the detection distance is 11 km. The results laid an experimental foundation for the practical application of micro-Doppler ladar.

Key words: Coherent ladar; Micro-Doppler; Phase noise; Range-compensated