

时频扰动对双频激光相干探测系统的影响

张建华 杨德钊 高洁 刘锡民

上海无线电设备研究所, 上海 200090

摘要 速度识别能力的高低直接决定了激光探测系统性能的优劣,受探测器带宽限制,传统激光探测系统无法实现对数马赫目标的速度多普勒信号检测。提出的同偏振双频激光相干探测测速方案成功解决了该难题,极大提高了系统效能。基于双频激光相干探测原理,分析了在实际应用中的振幅扰动、相位扰动及频率扰动等时频扰动对该系统信噪比的影响并与单频系统进行了对比。结果表明:单、双频系统回波信号信噪比受振幅扰动的影响基本一致;而针对各种频率扰动和相位扰动,双频激光探测系统回波信号信噪比明显高于单频激光探测系统,如当相位扰动达 0.5π 时,单频激光探测系统信噪比接近 0 dB,而双频激光探测系统信噪比仍高于 18 dB。

关键词 相干光学; 相干探测; 双频激光; 频率扰动; 相位扰动

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061403

Effect of Time-Frequency Disturbance on Performance of Dual-Frequency Laser Coherent Detection System

Zhang Jianhua Yang Dezhaoh Gao Jie Liu Ximin

Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China

Abstract The performance of laser detection system (LDS) is directly influenced by the velocity identification capability. Due to the bandwidth restriction of the receiver, the laser Doppler shift of the high speed targets can not be detected in LDS. A dual-frequency laser coherent detection (DLCD) system is introduced consequently, which has successfully solved the problem and enhanced the system capabilities obviously. Based on the theory of the DLCD, the signal-noise ratio (SNR) influenced by the amplitude disturbance, the phase disturbance and the frequency disturbance are analyzed, and the characteristics different from the signal-frequency laser coherent detection (SLCD) are illuminated. The simulation results indicate that the amplitude disturbance effect on the SNR of DLCD is consistent with that of the SLCD. For various kinds of frequency and phase disturbance, the SNR of DLCD is higher than that of the SLCD. When the phase disturbance increases to 0.5π , the SNR of SLCD is 0 dB, while the DLCD is still higher than 18 dB.

Key words coherence optics; coherent detection; dual-frequency laser; frequency disturbance; phase disturbance

OCIS codes 030.1670; 080.1665; 140.3515; 050.5082

1 引言

与直接探测相比,激光相干探测可检测目标多普勒频率信息进而实现对目标的速度测量,具有精度高、灵敏度高、能有效滤除杂散光干扰等优点,在激光探测领域得到广泛应用^[1-3]。但是目前激光相干探测系统的测速应用主要集中在低速测量领域,如流体测量、地面目标速度测量、风场探测等,在高速测量领域中的应用还是空白。这主要是因为激光频率高达 10^{14} Hz,高速目标的相对速度可达数马赫,多普勒频移高达千兆赫兹量级,受探测器带宽的限制,激光探测特别是大视场探测系统无法对高速目标的多普勒信号进行检测。

速度识别能力的高低直接决定了激光探测系统性能的优劣,这主要是因为:速度信息可以极大提升对目

收稿日期: 2015-11-21; **收到修改稿日期:** 2015-12-23; **网络出版日期:** 2016-05-31

作者简介: 张建华(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光探测技术方面的研究。E-mail: hitzhjh@163.com

导师简介: 刘锡民(1977—),男,博士,研究员,主要从事激光探测技术方面的研究。

E-mail: liuximin03@163.com(通信联系人)

标的综合感知能力,提高总体效能;更为重要的是利用速度信息可以极大提升激光探测系统的抗自然环境干扰能力。但是由于激光波长短,其非常容易受云、烟、雾、雨、雪等自然环境的干扰,成为激光探测技术发展的瓶颈。而自然环境干扰与目标的最大区别就是相对速度,一旦激光探测设备具备了对高速目标的速度感知能力,便可极大提升激光探测设备的抗自然环境干扰能力。本课题组提出了同偏振双频激光相干探测方法,区别于现有的激光单频认证相干探测以及垂直偏振双频相干探测系统,其可以利用双频频差对目标进行探测,从而将高速目标千兆赫兹量级的多普勒频率转换为千赫兹量级,进而有效克服了激光探测系统低带宽与高多普勒之间的矛盾,同时解决了垂直偏振双频相干探测系统结构复杂、能量利用率低的问题,可极大提升激光探测系统的抗干扰能力。

双频激光相干探测系统通过检测信号的相位、频率信息,得到目标的速度和距离信息。大气湍流、目标特性及光学系统像差等会对激光回波的振幅、相位及频率产生扰动,造成回波信号信噪比(SNR)下降,影响系统对信号的频率及相位的检测,导致系统测距误差加大和多普勒测速精度降低。众多研究者对激光相干探测系统回波信号进行了详细研究^[4-7],文献[4]分析了多普勒信号强度的影响因素,并对空间失配角及偏移失配因素进行实验研究;文献[5]分析了大气湍流以及目标特性对目标回波的影响,并进行了仿真研究;文献[7]提出一种基于交叉认证和经验模态分解的滤波算法,有效提高了回波信号的信噪比。上述文献都是针对单频激光相干系统回波信号的研究,尚没有涉及双频激光相干系统回波信号的分析。本文基于双频激光相干探测系统原理,仿真分析了双频激光的振幅扰动、相位扰动及频率扰动等对回波信号信噪比的影响。

2 双频激光相干探测原理

双频激光相干探测原理如图 1 所示。

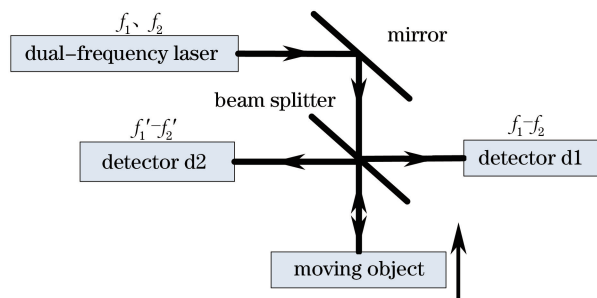


图 1 双频激光相干探测原理图

Fig. 1 Structure of the dual-frequency laser coherent detection system

双频激光器发射双频激光,经分束棱镜后,一束光由光电探测器接收作为本振信号;另一束光照射到高速目标,经反射后被光电探测器接收,得到回波信号。本振信号与回波信号进行二次混频,得到双频激光多普勒信号,经信号处理系统解算获得高速目标速度信息。

在双频激光相干探测过程中,利用波的相干叠加原理和光电探测器平方律检测关系^[8],本振信号的频率为

$$f_L = f_1 - f_2, \quad (1)$$

式中, f_1 、 f_2 分别为双频激光的两个频率,差值在百兆赫兹量级。双频激光经高速目标散射后产生不同的多普勒频移,经光电探测器检测得到回波信号,其频率为

$$f_s = f'_1 - f'_2 = (f_1 + f_{d1}) - (f_2 + f_{d2}), \quad (2)$$

式中, f'_1 、 f'_2 为含多普勒频移的双频激光的频率; f_{d1} 、 f_{d2} 分别为双频激光产生的多普勒频移。回波信号与本振信号进行二次乘积混频及低通滤波后,得到双频激光多普勒信号,其频率为

$$f_d = f_s - f_L = f_{d1} - f_{d2}, \quad (3)$$

依据激光多普勒频移公式,双频激光多普勒信号的频率与目标相对速度的关系为

$$f_d = f_{d1} - f_{d2} = 2vf_1/c - 2vf_2/c = 2v(f_1 - f_2)/c, \quad (4)$$

式中, c 为电磁波的传播速度; v 为目标的相对速度; $f_1 - f_2$ 为双频激光的频差。由(4)式可知,当激光波长取 $1.0 \mu\text{m}$,双频激光的频差为 300 MHz ,目标相对速度为 1000 m/s 时,单频激光多普勒频移为 2 GHz ,而双

频激光多普勒频移仅为 2 kHz。由此可知,双频激光相干探测可将单频激光多普勒频移(GHz)转换到双频激光频差的多普勒频移(kHz),降低了高速目标的多普勒频移,从而实现激光探测系统对高速目标的速度获取。

3 时频扰动对双频激光相干探测回波信噪比影响

在激光相干探测系统中,信号光由于受到目标特性、大气湍流和光学系统像差等影响,会对回波的振幅、相位及频率产生各种时频扰动。传统激光相干探测信号光为单一频率,只需考虑单个频率的振幅、相位及频率扰动对回波信号的影响,而双频激光相干探测信号光包含两个频率,它们各自的振幅、相位及频率均含有扰动,需考虑两个频率信号的扰动耦合以及其对总回波信号的叠加影响。开展时频扰动对激光回波信号的仿真研究,分析激光扰动对单、双频激光回波信号影响的差异,是双频激光相干探测系统的重要研究内容。

3.1 回波信号特征

在传统的单频激光相干探测系统探测中,信号光的表达式为

$$E_s(t) = (A_s + \Delta A) \cos [2\pi(f_s + \Delta f)t + \varphi_s + \Delta\varphi], \quad (5)$$

式中, A_s 、 f_s 、 φ_s 分别为信号光的振幅、频率及相位; ΔA 、 Δf 、 $\Delta\varphi$ 分别为对应的振幅扰动、频率扰动及相位扰动。本振光的表达式为

$$E_L(t) = A_L \cos(2\pi f_L t + \varphi_L), \quad (6)$$

式中, A_L 、 f_L 、 φ_L 分别为本振光的振幅、频率及相位。信号光和本振光通过光电探测器相干接收,得到单频激光回波信号,其表达式为

$$i_s(t) = (A_s + \Delta A) A_L \cos [2\pi(f_s + \Delta f)t + \varphi_s + \Delta\varphi] \cos(2\pi f_L t + \varphi_L), \quad (7)$$

在双频激光相干探测中,信号光包含两个频率信号,其表达式为

$$E_{s1}(t) = (A_{s1} + \Delta A_1) \cos [2\pi(f_{s1} + \Delta f_1)t + \varphi_{s1} + \Delta\varphi_1], \quad (8)$$

$$E_{s2}(t) = (A_{s2} + \Delta A_2) \cos [2\pi(f_{s2} + \Delta f_2)t + \varphi_{s2} + \Delta\varphi_2], \quad (9)$$

式中, A_{s1} 、 A_{s2} 为信号光的振幅, ΔA_1 、 ΔA_2 为相应的振幅扰动; f_{s1} 、 f_{s2} 为信号光的频率, Δf_1 、 Δf_2 为相应的频率扰动; φ_{s1} 、 φ_{s2} 为信号光的相位, $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 为相应的相位扰动。信号光通过光电探测器相干接收得到双频激光回波信号,其表达式为

$$i_d(t) = (A_{s1} + \Delta A_1) (A_{s2} + \Delta A_2) \times \cos [2\pi(f_{s1} + \Delta f_1)t + \varphi_{s1} + \Delta\varphi_1] \cos [2\pi(f_{s2} + \Delta f_2)t + \varphi_{s2} + \Delta\varphi_2], \quad (10)$$

由(7)式和(10)式可知,单、双激光回波信号的影响因素有振幅扰动、相位扰动和频率扰动;其中双频激光回波信号受两个扰动源共同作用的影响,而单频激光回波信号仅与信号光一个扰动源相关。

3.2 时频扰动对回波信号的影响分析

双频相干探测中,取一激光波长为 1.0 μm ,激光频率为 3×10^{14} Hz,另外一个频率为 3×10^{14} Hz + 6×10^8 Hz,在利用 MATLAB 软件进行仿真时,对信号频率进行适当缩比^[9],幅值归一化为 1,对相对速度为 2500 m/s 的目标进行探测,考虑到实际接收系统中的噪声问题,添加一幅值为 0.005 的高斯随机噪声作为系统噪声;系统采样频率设为 4.5 MHz,采样点数取 1024 点;振幅扰动、相位扰动及频率扰动采用具有一定相关性的两个高斯随机分布^[10],由于两束激光产生于同一谐振腔且沿相同光路同时刻传输,因此两者受时频干扰的噪声相关度较高,相关度取为 0.9。在双频相干探测中,系统宽带相对单频系统窄 3 个数量级以上,且经过强本振电信号与回波电信号的混频,其信噪比与单频相干探测系统相近,为了对比干扰对时域信噪比的影响,取无干扰时两者信噪比相当,同时为了对比干扰对频谱特性的影响,取频率相同的慢速目标的单频多普勒回波和快速目标的双频多普勒回波进行对比,同时采用 100 次蒙特卡罗模拟仿真的办法,统计频谱中信号信噪比因时频扰动而引起的变化情况,并采用光滑曲线对信噪比随干扰源变化的数据进行拟合。在无扰动的理想状态下,单、双频激光回波信号相同,其时域波形和功率谱仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可知,单、双频激光回波信号周期为 0.1 ms,功率谱密度为 53 dB,噪声功率谱密度为 0 dB,信号的信噪比为 53 dB。

1) 振幅扰动

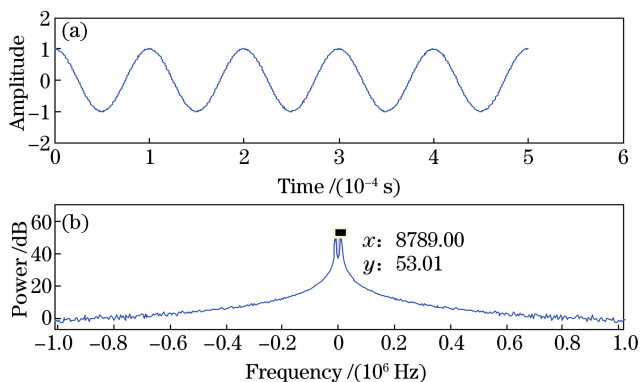


图2 理想状态下激光回波信号的(a)时域波形和(b)功率谱的仿真结果

Fig. 2 (a) Time domain waveform and (b) simulation result of power spectrum of laser echo signal in ideal condition

在激光传输过程中,激光振幅扰动主要由大气湍流引起,湍流起伏程度决定振幅扰动的大小^[11]。图3给出了在振幅扰动大小取0.5时,单、双频激光回波信号的仿真结果。图4给出了单、双频激光回波信号的信噪比随振幅扰动增大的变化关系。

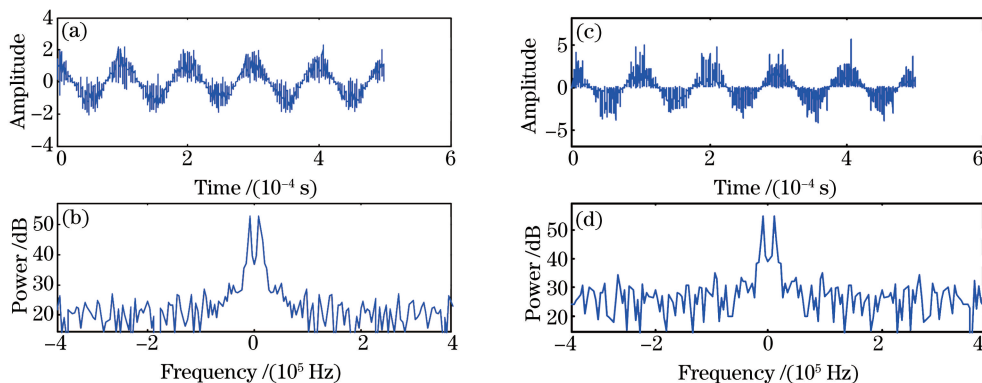


图3 振幅扰动取0.5时,激光回波信号的仿真结果。单频激光回波信号的(a)时域波形和(b)功率谱;

(b) 双频激光回波信号的(c)时域波形和(d)功率谱

Fig. 3 Simulation results of laser echo signals with amplitude disturbance of 0.5. (a) Time domain waveform and

(b) power spectrum of single-frequency laser echo signal; (c) time domain waveform and

(d) power spectrum of dual-frequency laser echo signal

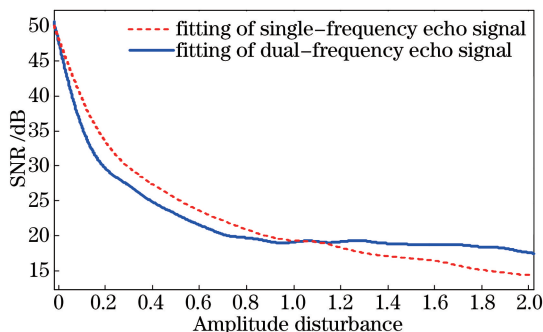


图4 单、双频激光回波信号的信噪比与幅值扰动关系

Fig. 4 SNRs of the signal-frequency and dual-frequency laser echo signal as a function of the amplitude disturbance

由图3可知,当激光振幅扰动为0.5时,单、双频激光回波信号具有相同的功率谱密度;但双频激光回波信号的噪声功率谱密度稍大,信号的信噪比稍低。由图4可知,随着振幅扰动的增加,单、双频激光回波信号的信噪比不断下降,扰动较大时双频信号信噪比比单频信号信噪比稍高,说明双频激光探测对强干扰的抑制能力更好,总体来讲,幅度扰动对单频及双频激光相干探测系统的影响相差不大。

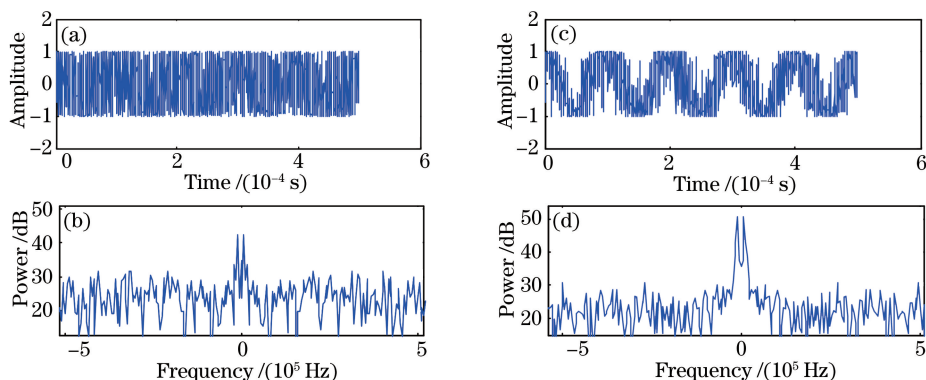


图 5 相位扰动取 0.5π , 激光回波信号的仿真结果。单频激光回波信号的 (a) 时域波形和 (b) 功率谱; 双频激光回波信号的 (c) 时域波形和 (d) 功率谱

Fig. 5 Simulation results of laser echo signals with phase disturbance of 0.5π .

(a) Time domain waveform and (b) power spectrum of single-frequency laser echo signal; (c) time domain waveform and (d) power spectrum of dual-frequency laser echo signal

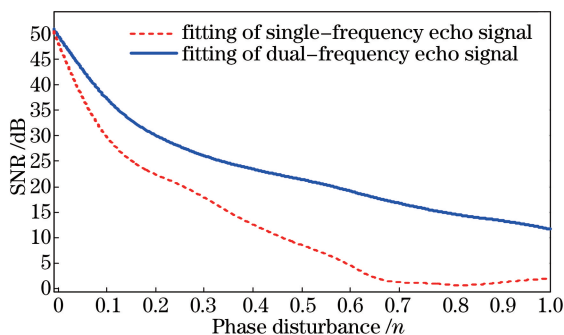


图 6 单、双频激光回波信号的信噪比与相位扰动关系

Fig. 6 SNRs of the signal-frequency and dual-frequency laser echo signal as a function of the phase disturbance

2) 相位扰动

在激光相干探测过程中, 相位扰动来源于大气湍流起伏以及目标表面粗糙度, 是导致回波信号信噪比下降的重要因素^[10]。图 5 给出了相位扰动大小取 0.5π 时, 单、双频激光回波信号的仿真结果。图 6 给出了单、双频激光回波信号的信噪比随相位扰动增大的变化关系。

由图 5 可知, 激光相位扰动取 0.5π 时, 双频激光回波信号与单频激光回波信号相比, 具有高信噪比。由图 6 可知, 随着相位扰动幅度的不断增加, 单频激光回波信号的信噪比快速下降, 而双频激光回波信号的信噪比下降相对缓慢, 说明双频激光探测系统具有强的抗位相扰动能力。

3) 频率扰动

激光器受到工作环境条件等影响, 输出频率是一个随时间无规则变化的起伏量。频率扰动可以通过激光频率的稳定度来表示

$$S = \Delta f / f, \quad (11)$$

式中, Δf 为激光频率的扰动, f 为激光的频率。稳定度较好的激光器的频率稳定度可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$, 对激光回波信号频率的扰动为千赫兹量级^[12]。图 7 给出了频率扰动均方差取 1 kHz 时, 单、双频激光回波信号的仿真结果。图 8 给出了单、双频激光回波信号的信噪比随频率扰动增大的变化关系。

由图 7 可知, 激光频率扰动取 1 kHz 时, 双频激光回波信号噪声功率较小, 信噪比高于单频激光回波信号。由图 8 可知, 与单频激光回波信号的信噪比相比, 双频激光回波信号的信噪比随着频率扰动的增加下降缓慢, 说明双频激光探测系统亦具有强的抗频率扰动能力。

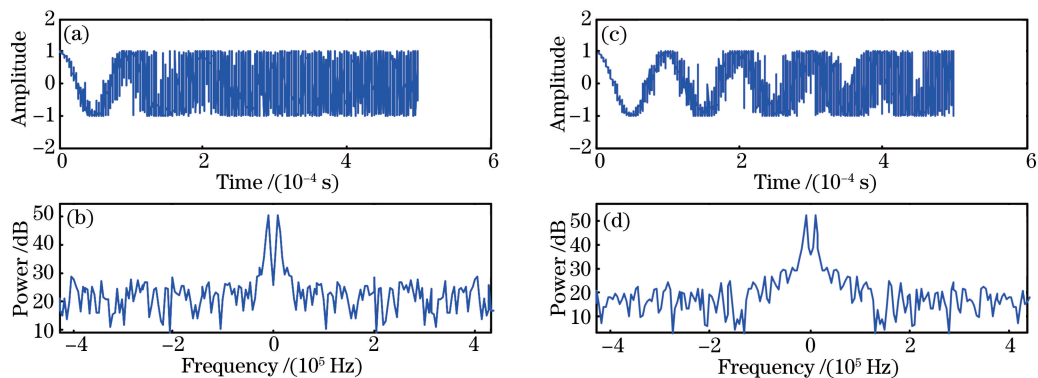


图7 频率扰动取1 kHz,激光回波信号的仿真结果。单频激光回波信号的(a)时域波形和(b)功率谱;
(b) 双频激光回波信号的(c)时域波形和(d)功率谱

Fig. 7 Simulation results of laser echo signals with frequency disturbance of 1 kHz.

(a) Time domain waveform and (b) power spectrum of single-frequency laser echo signal;

(c) time domain waveform and (d) power spectrum of dual-frequency laser echo signal

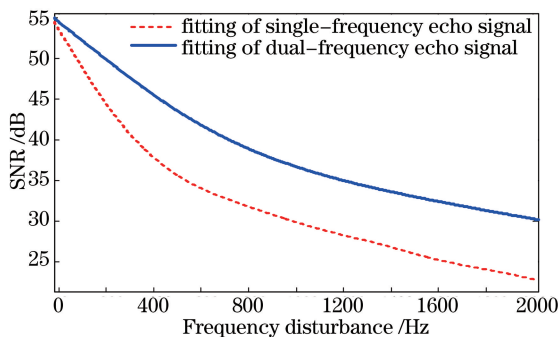


图8 单、双频激光回波信号的信噪比与频率扰动关系

Fig. 8 SNRs of the signal-frequency and dual-frequency laser echo signal
as a function of the frequency disturbance

4 结 论

激光探测设备虽然具有强抗电磁干扰能力,但是抗自然环境干扰差成为该技术发展的瓶颈,这主要是因为受光电探测器带宽的限制,传统激光探测系统无法检测到快速目标的高频多普勒信号。提出的同偏振双频激光相干探测方法,有效克服了激光探测系统低带宽与高多普勒之间的矛盾,可极大提升激光探测系统的抗干扰性能。实际应用中激光相干探测系统会受到大气湍流、目标特性及光学系统像差等影响,这些影响会对激光回波的振幅、相位及频率产生扰动,造成回波信号信噪比的下降,与传统的单频激光相干探测系统不同,时频扰动对双频激光相干探测系统的影响分析需考虑两个频率信号的扰动耦合以及其对总回波信号的叠加影响。基于同偏振双频激光相干探测系统原理,仿真分析了时频扰动对其回波信号信噪比的影响并与单频系统进行了对比:幅度扰动对单频及双频激光相干探测系统的影响相差不大,在扰动较小时,单频系统信噪比受影响小些,扰动较大时,双频系统信噪比受影响弱些;随着相位扰动幅度的不断增加,双频激光回波信号信噪比明显高于单频激光,且当相位扰动达到 0.5π 时,双频激光回波信号的信噪比仍高于 18 dB;与单频激光相比,双频激光回波信号的信噪比随频率扰动的增加下降缓慢,受频率扰动影响明显小于单频系统。以上结论也说明了在各种时频扰动下,双频激光探测系统具有更高的信噪比,同时可实现对高速目标的速度测量,可极大提高激光探测系统的测量精度和抗干扰能力,研究结果为同偏振双频激光相干探测系统的分析和设计提供了必要的理论依据和数据支撑。

参 考 文 献

- 1 Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Research on the speckle influenced resolution imaging of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0928001.
许 倩, 周 煜, 孙建锋, 等. 合成孔径激光成像雷达散斑效应分辨单元成像研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0928001.
- 2 Peng Shuping, Chen Tao, Yu Hongjun, *et al.*. Doppler frequency spectral discrimination of moving target based on coherent detection[J]. *Chinese J Lasers*, 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.
- 3 O T Strand, L V Berzins, D R Goosman, *et al.*. Velocimetry using heterodyne techniques[C]. *SPIE*, 2005, 5580: 593-599.
- 4 Liang Qiaochun, Wang Ying, Chen Peifeng, *et al.*. Investigation of spatial mismatch problems in laser heterodyne detection[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 43-50.
梁乔春, 王 英, 陈培锋, 等. 激光外差探测中的空间失配问题研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(1): 43-50.
- 5 Wang Liguu, Wu Zhensen, Wang Mingjun. Numerical research on effect of the size of the target in turbulence on the residual scintillation index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201003.
王利国, 吴振森, 王明军. 大气湍流中目标尺寸对回波闪烁残余指数影响的数值研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201003.
- 6 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, *et al.*. Effect of amplitude profile difference of signal and local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1006001.
刘宏展, 纪越峰, 许 楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1006001.
- 7 Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. An empirical mode decomposition algorithm based on cross validation and its application to lidar return signal de-noising[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014001.
王欢雪, 刘建国, 张天舒, 等. 一种基于交叉证认和经验模态分解的滤波算法及其在激光雷达回波信号降噪处理中的应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1014001.
- 8 Xu Guili, Chen Zhijun, Guo Ruipeng, *et al.*. Photoelectric detection technology and system design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 109-111.
徐贵力, 陈智军, 郭瑞鹏, 等. 光电检测技术与系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 109-111.
- 9 He Jing, Miao Qiang, Wu Dewei. Microwave and light wave radar cross section similitude with unequal electrical length [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(20): 200301.
何 晶, 苗 强, 吴德伟. 微波-光波变电长度缩比条件下目标雷达散射截面相似性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 200301.
- 10 Ye Shunliu, Zhu Shaolan, Sun Qibing, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of semi-active laser guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(6): 628-631.
叶顺流, 朱少岚, 孙启兵, 等. 大气湍流对激光半主动制导精度的影响[J]. *激光与红外*, 2010, 40(6): 628-631.
- 11 Cong Rijin, Wang Jingyuan, Wang Rong, *et al.*. Study on the attenuation of different infrareds transmission in fog[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080603.
丛日进, 汪井源, 王 荣, 等. 近中远红外光在雾中的传输损耗研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080603.
- 12 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, *et al.*. Research of laser frequency stabilization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081401.
苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081401.