

# 强度扰动对双频激光相干探测性能的影响

任建迎<sup>1\*</sup>, 孙华燕<sup>2</sup>, 赵延仲<sup>2</sup>, 张来线<sup>2</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学研究生院, 北京 101416;

<sup>2</sup>航天工程大学电子与光学工程系光学工程教研室, 北京 101416

**摘要** 采用双频激光相干探测技术实现高速目标的多普勒测量。结合随机统计理论和维纳-欣钦定理推导得到存在强度扰动时双频激光相干探测的信号功率谱函数, 基于理论模型分析了拍频线宽和扰动频率对信号功率谱的影响, 并进行了数值仿真和实验研究。结果表明, 功率谱分布表现为洛伦兹型, 在远距离探测时, 拍频信号线宽的增加使功率谱展宽。强度扰动频率接近多普勒频移量时, 功率谱展宽, 幅度下降, 这增加了频谱提取难度, 降低了多普勒测量精度。

**关键词** 激光光学; 双频激光; 拍频光; 强度扰动; 相干探测; 高速目标

中图分类号 TN29 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031407

## Effect of Intensity Disturbance on Performance of Dual-Frequency Laser Coherent Detection

Ren Jianying<sup>1\*</sup>, Sun Huayan<sup>2</sup>, Zhao Yanzhong<sup>2</sup>, Zhang Laixian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** Dual-frequency laser coherent detection technology is used to perform the Doppler measurement of high-speed targets. The power spectral function of the electric signal for the dual-frequency laser coherent detection with intensity disturbance can be obtained by combining the random statistical theory with Wiener-Khinchine theorem. Based on the theoretical model, the influences of beat line width and disturbance frequency on the signal power spectrum is analyzed, and the numerical simulation and experiments are conducted. The results reveal a Lorentz-type power spectrum distribution. For long-distance detection, an increase in the line width of the beat signal broadens the power spectrum. When the intensity disturbance frequency is close to the Doppler frequency shift, the power spectrum broadens and the signal amplitude decreases. In this case, the spectrum extraction process becomes more difficult, and the Doppler measurement accuracy decreases.

**Key words** laser optics; dual-frequency laser; beat frequency laser; intensity disturbance; coherent detection; high speed target

**OCIS codes** 140.3518; 140.3430; 030.1670; 350.4010

## 1 引言

采用激光相干探测可实现对运动目标的高精度测量。相比直接探测, 激光相干探测具有测量精度高、灵敏度好、抗干扰能力强的优点, 在激光探测领域具有广泛的应用。但在高速运动目标探测领域, 由于目标运动速度快, 多普勒频移大, 同时受探测器带宽

和数据采集系统的限制, 采用现有的激光相干探测方法无法实现对高速运动目标的高精度多普勒测量。

双频激光相干探测技术通过微波拍频光对目标进行探测, 拍频光信号处于微波波段, 比光频低 5~7 个数量级, 同时具有激光探测精度高、灵敏度好、抗干扰能力强的优点, 可实现高速目标的多普勒高精度测量<sup>[1-3]</sup>。由于双频激光相干探测具有以上诸

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-03; 录用日期: 2019-08-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805283)、试验技术研究青年科技基金项目(2016SY41B008)

\* E-mail: rjyfly@126.com

多优势,国内外对双频激光相干探测进行了大量的研究工作。Morvan 等<sup>[4]</sup>研究了激光-微波雷达技术,分析了多模前置放大器的性能及双频脉冲时间、调制频率对系统性能的影响。Onori 等<sup>[5-6]</sup>研究了利用双频激光相干探测技术精确测量多普勒频移和距离的方法,并开展了实验研究。Cheng 等<sup>[7]</sup>开展了利用自混频双频激光进行多普勒速度测量的研究,并进行了实验分析。研究表明激光源线宽和强度扰动对相干探测有重要影响<sup>[8-10]</sup>。以上文献主要分析的是激光器的线宽影响和光源不稳定引起的强度扰动。本文主要分析拍频光在探测过程中因受目标转动、振动、大气等影响而产生的信号光的强度扰动。因此,分析强度扰动对探测性能影响,这对双频激光相干探测的实际应用具有重要意义。

本文基于双频激光相干探测理论实现高速运动

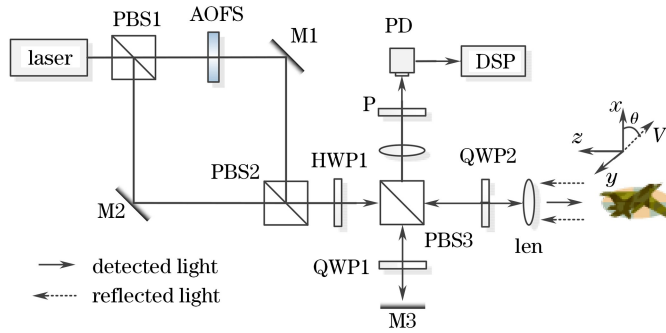


图1 双频激光相干探测技术原理框图

Fig. 1 Principle diagram of dual-frequency laser coherent detection technology

双频相干光混频后的拍频参考光可表示为

$$E_R = A \cos [2\pi f_{IF} t + \varphi_R(t)], \quad (1)$$

式中: $A$ 表示拍频光的振幅; $f_{IF}$ 表示拍频光的频率; $\varphi_R(t)$ 表示拍频光的随机相位; $t$ 为时间。拍频光经速度为 $V$ 的目标反射,回波信号光可表示为<sup>[8]</sup>

$$E_S = \alpha A \cos [2\pi f_{IF}(t - \tau_d) + 2\pi f_V t + \varphi_R(t - \tau_d)], \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 表示回波信号光与参考信号光的振幅比, $0 < \alpha < 1$ ;  $\tau_d$ 表示延迟时间; $f_V$ 表示多普勒频移, $f_V = 2Vf_{IF}/c$ ,  $c$ 为光速; $\varphi_R(t - \tau_d)$ 表示随机相位变化量。回波信号光与参考光混频后,探测器输出信号可表示为

$$I_{\text{mix}}(t) = \mu A^2 + \mu \alpha^2 A^2 + \mu \alpha A^2 \cdot \cos [2\pi f_V t - 2\pi f_{IF} \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] + \mu \alpha A^2 \cos [2\pi(2f_{IF} + f_V)t - 2\pi f_{IF} \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) + \varphi_R(t)], \quad (3)$$

式中: $\mu$ 表示探测器的探测效率。当混频后的和频项 $2f_{IF} + f_V$ 小于探测器的截止响应频率时,探测器

目标的低多普勒频移的探测,根据随机过程理论推导得到了带有强度扰动的功率谱表达式,分析了带有强度扰动的拍频回波光频率与拍频线宽、延迟时间对探测性能的影响,并进行了数值分析。

## 2 双频激光相干探测理论

双频激光相干探测技术中双频光的产生方法主要有两种:一种是注入式锁模激光器的光学混频法<sup>[11-12]</sup>;另一种比较常见的是先将单频光束,再将其中一路移频,最后将两束光合束混频<sup>[13]</sup>。基于后者的双频激光相干探测技术的原理框图如图1所示。图中PBS表示偏振分光棱镜,AOFS表示声光移频器,M1,M2和M3表示反射镜,HWP表示半波片,QWP为四分之一波片,PD表示光电探测器,P表示波片,DSP表示数字信号处理器。

输出 $f_V$ 和 $2f_{IF} + f_V$ 两个频率分量;当和频项 $2f_{IF} + f_V$ 大于探测器的截止响应频率时,探测器输出频率为 $f_V$ 的低频分量。其中 $f_V$ 的频率分量即为高速运动目标的多普勒频移, $\varphi_R(t - \tau_d) + \varphi_R(t)$ 表示混频信号的随机相位波动项,相位波动的存在使得拍频光的瞬时频率具有一定的随机带宽,所以瞬时频率的随机带宽可以用线宽来衡量。本文仅考虑存在 $f_V$ 频率分量的情况。

## 3 强度扰动的信号功率谱分析

假设强度扰动主要来自目标反射、大气传输过程。强度扰动引起回波光信号的强度起伏和相位变化,将强度扰动看作随机波动的过程,带有强度扰动的回波信号可表示为

$$E'_S = \alpha A [1 + A_n(t)] \cos [2\pi f_{IF}(t - \tau_d) + 2\pi f_V t + \varphi_R(t - \tau_d)], \quad (4)$$

式中: $A_n(t)$ 表示强度扰动对探测信号光的幅度调制, $A_n(t) = \beta \cos(2\pi f_n t + \varphi_0)$ ,  $\beta$ 表示强度扰动的振

幅比,  $f_n$  表示噪声扰动频率,  $n$  为噪声扰动,  $\varphi_0$  为噪声扰动相位。将带有强度扰动的探测回波光与(1)式的参考光混频, 混频后的输出信号可表示为

$$I'_{\text{mix}}(t) = \mu\alpha A^2 \cos [2\pi f_V t - 2\pi f_{\text{IF}} \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] + \mu\alpha\beta A^2 \cdot \cos [2\pi(f_V + f_n)t - 2\pi f_V \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] + \mu\alpha\beta A^2 \cos [2\pi(f_V - f_n)t - 2\pi f_V \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)]。 \quad (5)$$

由(5)式可知, 在中心频率  $f_V$  两侧分别存在  $f_V \pm f_n$  两个边频, 当两个边频的频率非常接近中心频率时, 滤除边频成分变得十分困难, 边频的存在势必会对信号频谱造成影响。由维纳-欣钦定理可知, 随机信号的自相关函数与对应的功率谱密度构成傅里叶变化对<sup>[14]</sup>, 可以通过求探测器输出信号的自相关函数获得功率谱, 探测器输出信号自相关函数为

$$G(\tau) = \langle I_{\text{mix}}(t) I_{\text{mix}}^*(t + \tau) \rangle = \langle \mu\alpha A^2 \{ \cos [\omega_V t - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] + \beta \cos [(\omega_V + \omega_n)t - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] + \beta \cos [(\omega_V - \omega_n)t - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t - \tau_d) - \varphi_R(t)] \} \times \mu\alpha A^2 \{ \cos [\omega_V(t + \tau) - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t + \tau - \tau_d) - \varphi_R(t + \tau)] + \beta \cos [(\omega_V + \omega_n)(t + \tau) - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t + \tau - \tau_d) - \varphi_R(t + \tau)] + \beta \cos [(\omega_V - \omega_n)(t + \tau) - \omega_V \tau_d + \varphi_R(t + \tau - \tau_d) - \varphi_R(t + \tau)] \} \rangle, \quad (6)$$

式中:  $\langle \cdot \rangle$  为系统平均;  $I_{\text{mix}}^*(t + \tau)$  为  $t + \tau$  时刻的混频信号;  $\tau$  为信号时间差;  $\omega_V$  为多普勒频移的角频率,  $\omega_V = 2\pi f_V$ ;  $\omega_n$  为噪声角频率,  $\omega_n = 2\pi f_n$ 。根据信号及噪声理论, 信号的随机相位波动是一个平稳随机过程, 其服从零均值高斯分布<sup>[13-14]</sup>。存在理论关系式使

$$\langle \exp [i\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle = \exp [-\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle / 2], \quad (7)$$

式中:  $\Delta\varphi(t, \tau) = \varphi(t + \tau) - \varphi(t)$ ,  $\varphi(\cdot)$  为信号相位;  $\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = 2\pi\Delta f |\tau|$ <sup>[15]</sup>,  $|\tau|$  为信号时间差的

模,  $\Delta f$  表示拍频激光谱线的半峰全宽(FWHM)<sup>[16]</sup>。令  $\Delta\omega = \pi\Delta f$ , 则(6)式可化简为

$$G(\tau) = \mu^2 \alpha^2 A^4 \{ \cos \omega_V \tau + \beta^2 [ \cos(\omega_V + \omega_n) \tau + \cos(\omega_V - \omega_n) \tau ] \} \cdot Q, \quad (8)$$

式中: 当  $\tau \geq \tau_d$  和  $\tau \leq -\tau_d$  时,  $Q = \exp(-\Delta\omega\tau_d)$ ; 当  $-\tau_d < \tau < \tau_d$  时,  $Q = \exp(-\Delta\omega\tau)$ 。根据维纳-欣钦定理, 自相关函数的傅里叶变换即是信号功率谱, 舍去负频率成分, 探测器输出信号功率谱可表示为<sup>[9]</sup>

$$G(\omega) = \frac{\mu^2 \alpha^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d)}{(\omega_V - \omega)^2 + \Delta\omega^2} [(\omega_V - \omega) \sin(\omega_V - \omega)\tau_d - \Delta\omega \cos(\omega_V - \omega)\tau_d] + \frac{\mu^2 \alpha^2 A^4 \Delta\omega}{(\omega_V - \omega)^2 + \Delta\omega^2} + \mu^2 \alpha^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d) \left[ \pi\delta(\omega_V - \omega) - \frac{\sin(\omega_V - \omega)\tau_d}{\omega_V - \omega} \right] + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d)(\omega_V + \omega_n - \omega)}{(\omega_V + \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \sin(\omega_V + \omega_n - \omega)\tau_d - \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta\omega \exp(-\Delta\omega\tau_d)}{(\omega_V + \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \cos(\omega_V + \omega_n - \omega)\tau_d + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta\omega}{(\omega_V + \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} + \mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d) \left[ \pi\delta(\omega_V + \omega_n - \omega) - \frac{\sin(\omega_V + \omega_n - \omega)\tau_d}{\omega_V + \omega_n - \omega} \right] + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d)(\omega_V - \omega_n - \omega)}{(\omega_V - \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \sin(\omega_V - \omega_n - \omega)\tau_d - \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta\omega \exp(-\Delta\omega\tau_d)}{(\omega_V - \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} \cos(\omega_V - \omega_n - \omega)\tau_d + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta\omega}{(\omega_V - \omega_n - \omega)^2 + \Delta\omega^2} + \mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \exp(-\Delta\omega\tau_d) \left[ \pi\delta(\omega_V - \omega_n - \omega) - \frac{\sin(\omega_V - \omega_n - \omega)\tau_d}{\omega_V - \omega_n - \omega} \right], \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为输出信号角频率;  $\delta$  为狄拉克函数。

## 4 数值理论仿真分析

数值仿真参数设置如下: 波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 移频

器的频移量  $f_{\text{IF}} = 3 \text{ GHz}$ , 目标径向运动速度  $V = 1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 信号光与参考光的振幅比  $\alpha = 0.8$ , 强度扰动的振幅比  $\beta = 0.2$ , 假设探测器探测效率  $\mu = 1$ 。

### 4.1 延迟时间小于相干时间

探测距离  $R=3$  km 时, 线宽为 1.0, 5.0, 10.0 kHz 时的拍频信号的功率谱分布曲线仿真结果如图 2(a) 所示, 拍频信号线宽对功率谱线宽几乎没有影响, 这与文献[8]结论一致。拍频信号线宽越窄, 得到的混频信号幅度与噪声幅度相差越大, 越有

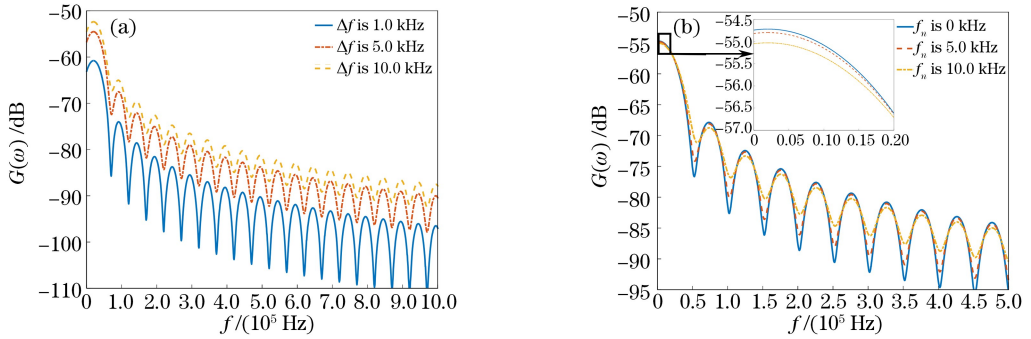


图 2  $\tau_d < \tau_c$  时的功率谱分布。(a) 不同线宽信号的功率谱分布; (b) 不同扰动频率的功率谱分布

Fig. 2 Power spectrum distributions when  $\tau_d < \tau_c$ . (a) Power spectrum distribution for signal with different line widths; (b) power spectrum distribution for signal with different disturbance frequencies

### 4.2 延迟时间远大于相干时间

当延迟时间远大于相干时间, 即  $\tau_d \gg \tau_c$  时, (9) 式可近似表示为

$$G(\omega) \approx \frac{\mu^2 \alpha^2 A^4 \Delta \omega}{(\omega_v - \omega)^2 + \Delta \omega^2} + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta \omega}{(\omega_v + \omega_n - \omega)^2 + \Delta \omega^2} + \frac{\mu^2 \alpha^2 \beta^2 A^4 \Delta \omega}{(\omega_v - \omega_n - \omega)^2 + \Delta \omega^2} \quad (10)$$

当扰动频率为 1.5 kHz 时, 不同拍频信号线宽的功率谱分布如图 3(a) 所示。线宽为 0.5 kHz 时,

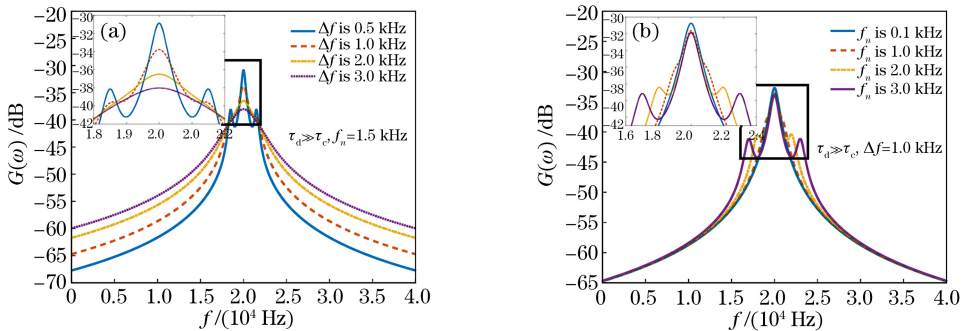


图 3  $\tau_d \gg \tau_c$  时的功率谱分布。(a) 不同线宽时的功率谱; (b) 不同扰动频率下的功率谱

Fig. 3 Power spectrum distributions when  $\tau_d \gg \tau_c$ . (a) Power spectrum distributions for different line widths; (b) power spectrum distributions under different disturbance frequencies

### 4.3 信号信噪比影响分析

采用频域积分法计算信号的信噪比, 把功率谱峰值外的其余部分看作噪声。图 4(a) 所示为信噪比下降, 功率谱峰值与噪声幅度之比下降, 造成信噪比

利于提取信号。当拍频信号线宽为 1.0 kHz 时, 强度扰动频率分别为 0, 5.0, 10.0 kHz 时的功率谱分布曲线如图 2(b) 所示, 结果显示, 强度扰动频率的增加导致功率谱峰值下降, 功率谱展宽不明显, 同时本底噪声的幅值减小。从仿真结果看出, 功率谱分布表现为洛伦兹线型的一部分。

中心频率两侧出现明显的边频峰值, 随着拍频线宽的增加, 中心频率与扰动频率引起的边频频谱合并, 造成功率谱展宽, 同时峰值功率幅度减小, 最终导致频谱检测难度加大, 多普勒测量精度下降。线宽为 1.0 kHz 时不同扰动频率的功率谱分布如图 3(b) 所示; 当扰动频率为 0.1 kHz 时, 没有出现扰动频率的边频, 功率谱分布为洛伦兹线型; 当扰动频率为 1.0, 2.0, 3.0 kHz 时, 功率谱中心频率两侧出现边频, 且随着扰动频率的增大边频距离中心频率越远, 但扰动频率的增大对功率谱峰值几乎没有影响。

比与拍频信号线宽的关系曲线。由图 4(a) 可以看出, 随着拍频线宽的增加, 信噪比迅速减小, 然后趋于稳定。这是因为线宽的增加导致拍频光的相干性下降, 功率谱峰值与噪声幅度之比下降, 造成信噪比



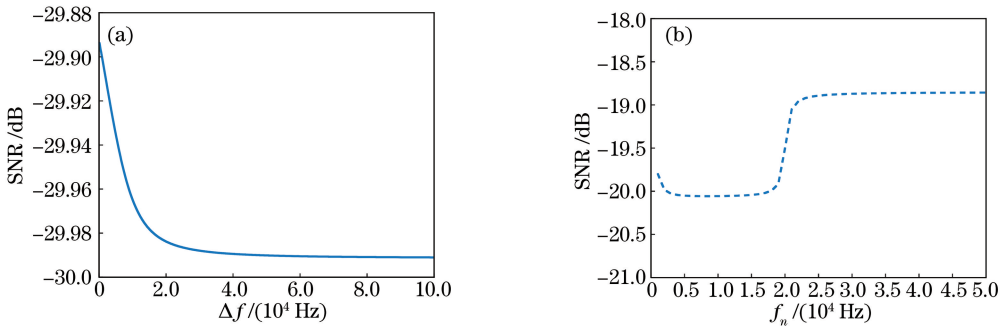


图4 信噪比变化曲线。(a)信噪比随拍频线宽变化;(b)信噪比随噪声扰动频率变化

Fig. 4 SNR curves. (a) SNR versus line width of beat frequency; (b) SNR versus noise disturbance frequency

的降低。图4(b)所示为信噪比与噪声扰动频率的关系曲线,由图4(b)可以看出,当强度扰动频率远小于多普勒频率时,信噪比较低,当强度扰动频率接近多普勒频率时信噪比开始增加,当远大于多普勒频移时信噪比趋于稳定。以上分析充分说明拍频探测受低频强度扰动的影响较大。

## 5 实验分析

微波拍频光探测主要是针对高速目标,但实验室内很难获得高速运动目标。为了较好地体现强度扰动对拍频探测信号的影响,实验中采用振荡器产生的理想电信号作为参考信号,这样最大限度地降低了参考信号噪声对混频信号的影响,本振信号频率与拍频光信号有11 kHz的频差,本地振荡产生

的参考信号如图5(a)中下方曲线所示。激光器波长为532 nm,输出功率为15 mW,声光移频器的频移量为64.21 MHz。激光器分束移频获得拍频光,再经匀速运动的反射镜反射后由探测器接收,受激光源强度起伏、移频器、运动镜片的振动影响,回波信号强度受到调制,探测器接收的回波信号如图5(a)上方曲线所示。图5(b)为理想参考信号与探测器输出信号混频后的输出信号。图6(a)是带有强度扰动的拍频探测光的功率谱分布,在中心频率尖峰两侧有明显的频谱展宽。图6(b)是混频输出信号的功率谱曲线,在低频部分和中心频率两侧出现了小的峰值,频谱分布表现为洛伦兹线型分布,与数值分析中谱线基本一致,充分说明了本文理论模型的正确性。率接近中心频率时其对功率谱幅度影响较大。当延

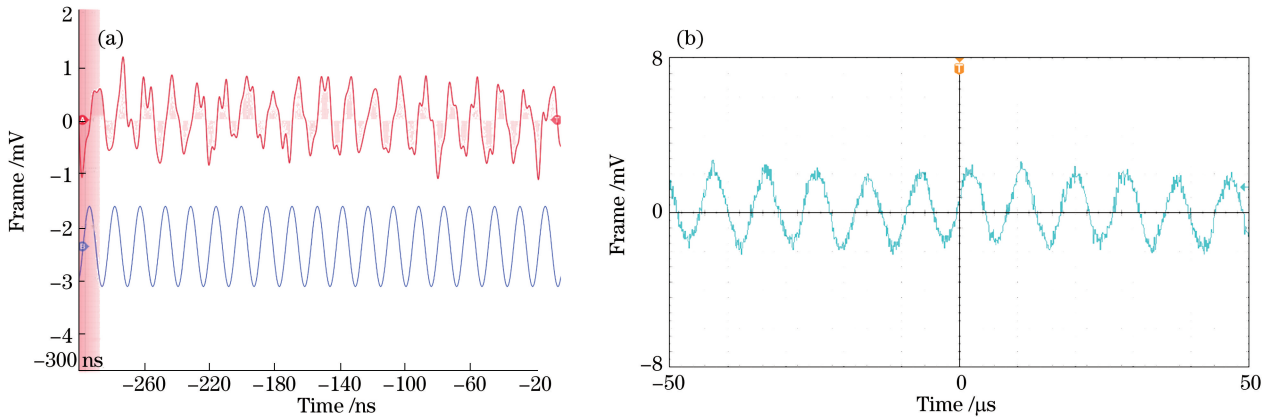


图5 实验获取的拍频信号与本地振荡信号。(a)拍频信号(上)与参考信号(下);(b)混频输出信号

Fig. 5 Beat signal and local oscillation signal obtained by experiment. (a) Beat signal (top) and reference signal(bottom); (b) mixing output signal

## 6 结论

双频激光相干探测功率谱密度与拍频信号线宽、强度扰动频率、延迟时间直接相关。当延迟时间小于相干时间时,拍频信号线宽的增加对功率谱线宽几乎没有影响,但影响功率谱的幅度,强度扰动频

迟时间远大于相干时间时,拍频信号线宽的增加使功率谱展宽,强度扰动频率接近中心频率时功率谱进一步展宽,增加了信号频谱检测的难度,降低了多普勒频移测量精度。通过模拟和实验验证了本文理论模型的正确性。本文的分析为双频激光相干探测系统设计、参数确定提供了一定的理论依据。

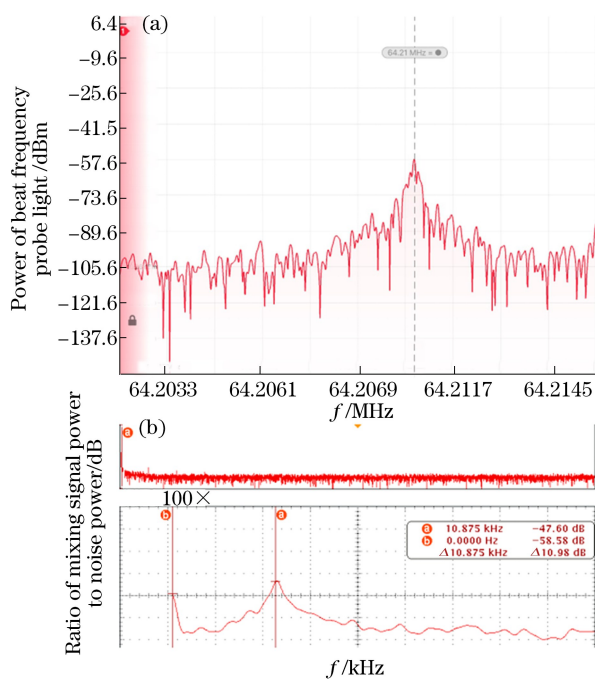


图6 拍频信号和混频输出信号功率谱。

(a)拍频信号功率谱;(b)混频输出信号功率谱

Fig. 6 Power spectra of beat signal and mixing output signal. (a) Power spectrum of beat frequency signal; (b) power spectra of mixing output signal

另外,受激光器、移频器、探测器等影响,参考光信号并不是理想稳定的信号,因此参考信号受强度扰动影响的情况仍需进一步分析研究。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y H, Wu Z S. Range Doppler detection based on the pulsed two-frequency laser[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(3): 159-163.  
李艳辉, 吴振森. 基于双频脉冲激光器的距离多普勒探测[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(3): 159-163.
- [2] Cheng C H, Lee C W, Lin T W, et al. Dual-frequency laser Doppler velocimeter for speckle noise reduction and coherence enhancement [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20255-20265.
- [3] Cheng C H, Jia-Wei L E, Lin T W, et al. Speckle noise reduction of a dual-frequency laser Doppler velocimeter based on an optically injected semiconductor laser[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8255: 82551P.
- [4] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, et al. Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study [J]. Applied Optics, 2002, 41 (27): 5702-

5712.

- [5] Onori D, Scotti F, Scaffardi M, et al. Coherent interferometric dual-frequency laser radar for precise range/Doppler measurement [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20): 4828-4834.
- [6] Onori D, Scotti F, Laghezza F, et al. Coherent laser radar with dual-frequency Doppler estimation and interferometric range detection [C] // 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf), May 2-6, 2016, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE, 2016: 16056044.
- [7] Cheng C H, Lin L C, Lin F Y. Self-mixing dual-frequency laser Doppler velocimeter [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3600-3610.
- [8] Yan C H, Wang T F, Zhang H Y, et al. Short-range optical limited displacement resolution in laser heterodyne detection system[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(23): 234208.  
晏春回, 王挺峰, 张合勇, 等. 近距离激光外差探测光学极限位移分辨率[J]. 物理学报, 2017, 66(23): 234208.
- [9] Shan H J, Yang H Z, Yang S H, et al. Effects of laser intensity fluctuation and phase noise on dual-frequency laser detection [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212005.  
单慧洁, 杨宏志, 杨苏辉, 等. 激光强度起伏及相位噪声对光学双频探测的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212005.
- [10] Zhang J H, Yang D Z, Gao J, et al. Effect of time-frequency disturbance on performance of dual-frequency laser coherent detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061403.  
张建华, 杨德钊, 高洁, 等. 时频扰动对双频激光相干探测系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061403.
- [11] Simpson T B. Phase-locked microwave-frequency modulations in optically-injected laser diodes [J]. Optics Communications, 1999, 170(1/2/3): 93-98.
- [12] Scalise L, Paone N. Self-mixing laser Doppler vibrometer [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4072: 25-36.
- [13] Li L, Zhao C M, Gao L, et al. Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 249-252.  
李磊, 赵长明, 高岚, 等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 249-252.
- [14] Marshall W K, Crosignani B, Yariv A. Laser phase noise to intensity noise conversion by lowest-order

- group-velocity dispersion in optical fiber: exact theory [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(3): 165-167.
- [15] Gallion P, Mendieta F J, Chabran C. Single mode laser spectral spread repercussion in single-mode optical fiber coherent detection systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 369: 527-531.
- [16] Gallion P, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(4): 343-349.