❖特约专栏❖

相干激光引信综述(特邀)

刘锡民，张建华，杨德钊，张明祎

(上海无线电设备研究所,上海 200090)

摘　要：激光相干探测具有灵敏度高、携带信息丰富等优势,在军事、测绘、通信等领域得到了广泛的应用,特别是在激光雷达和激光通信领域的应用发展迅速,但在激光引信领域尚没有大规模地开展。相干探测应用到激光引信是通过检测激光多普勒信号获得目标的相对速度信息,利用速度差别极大地提高激光引信抗自然环境的干扰能力。介绍了相干探测的原理及特点,详述了四种相干激光引信体制,针对典型的线性调频相干激光引信,对其工作原理及系统组成进行了介绍。目前相干探测激光引信技术尚处于起步阶段，由于该体制可以极大提升激光引信的抗干扰能力及作用距离等综合性能,具有广阔的应用前景,值得各相关研究机构进行深入研究,进而加快相干激光引信的工程化应用进程。

关键词：相干探测；　激光引信；　线性调频；　抗干扰

中图分类号：TJ439　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3788/IRLA201847.0303001

Review on coherent laser fuze(*Invited*)

Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhao, Zhang Mingyi

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the advantages of high sensitivity and carrying rich information, laser coherent detection technology has been used widely in military, mapping, communications and other fields. Coherent detection is developing rapidly in laser radar and laser communication applications, but it has not been carried out on a large scale in laser fuze. With coherent detection applied to laser fuze, the speed of targets can be obtained by detecting the laser Doppler signals, and the anti-interference ability of natural environment can be improved greatly by using the velocity difference between the target and the interference. A brief introduction of the principle and the characteristics of coherent detection was given, and then four kinds of coherent laser fuze system, the principle and system composition of a typical linear frequency modulation coherent laser fuze were discussed in detail. At present, coherent laser fuze was still in its infancy, which enhanced the system capabilities obviously and had a broad application prospects, and it deserved further study by relevant research institutes for expediting the engineering application process of coherent laser fuze.

Key words: coherent detection;　laser fuze;　linear frequency modulation;　anti-interference

收稿日期：2017-12-08；　**修订日期**：2018-01-14

作者简介：刘锡民(1977-),男,研究员,博士,主要从事激光引信技术方面的研究。Email:liuximin03@163.com

通讯作者：张建华(1989-),男,工程师,硕士,主要从事激光引信技术方面的研究。Email:hitzhjh@163.com

0 引 言

激光探测是利用探测器将接收的激光信号变化转变成电信号,即将光信息转换为电信息,并通过不同的信息处理方法来获取不同的信息，完成对目标的探测。激光探测技术按照探测方式分为激光非相干探测(又称直接探测)和激光相干探测两种。

激光的高度相干性、单色性和方向性使光频段的相干探测成为可能。激光相干探测主要基于激光的高相干性和探测器的平方律特性。它与无线电波相干接收方式的原理相同，因而同样具有无线电波相干接收方式的选择性好、灵敏度高等一系列的优点[1]。

1 相干探测原理及特点

激光相干探测系统如图 1 所示。待探测频率为 f_S 的信号光和由激光器输出频率为 f_L 的本振光经过合束器入射到光电探测器表面进行相干混频，因为探测器仅对其差频($f_{IF}=f_S-f_L$)分量响应,故只有频率为 f_{IF} 的中频电信号输出，再经过信号处理进行解调,最后得到有用的信号信息。

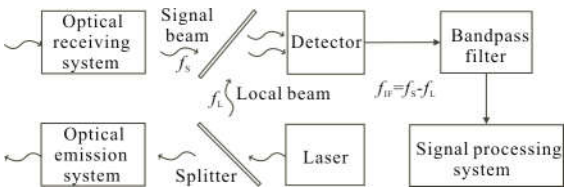

图 1 激光相干探测系统

Fig.1 Laser coherent detection system

假设光电探测器光敏面的量子效率是均匀的,同时垂直入射到光电探测器表面上的本振光和信号光是平行且重合的平面波,这时,信号光和本振光的电场表达式分别为：

$$E_S(t)=|E_S|\cos(2\pi f_S t+\phi_S) \tag{1}$$

$$E_L(t)=|E_L|\cos(2\pi f_L t+\phi_L) \tag{2}$$

式中：E_S、E_L 分别为信号光和本振光的振幅；ϕ_S、ϕ_L 分别为信号光和本振光的相位；f_S、f_L 分别为信号光和本振光的频率。

由光电探测器平方律检测关系，输出信号可表示为：

$$I_{IF}(t)=\gamma[E_S^2(t)+E_L^2(t)+2E_S(t)E_L(t)] \tag{3}$$

以目前的工艺水平，光电探测器的响应频率远远小于激光频率。因此,平方项输出为直流信号,乘积项可化简为和频项和差频项，其中和频项频率远大于探测器带宽,输出为零,忽略直流偏置,中频电信号可以表示为：

$$I_{IF}(t)=2\gamma|E_S||E_L|\cos(2\pi f_{IF}t+\phi_0) \tag{4}$$

从上述分析可以得出,在激光相干探测中,光探测器输出的中频功率正比于信号光和本振光平均功率的乘积。因此,在信号光功率非常小情况下,适当提高本振光功率仍能得到可观的中频输出。这就是激光相干探测能够探测到极微弱光信号的原因。

2 相干探测技术的应用

激光相干探测具有灵敏度高、携带信息丰富、能有效地滤除杂散背景光等优势,在军事、测绘、通信等领域得到广泛的应用和迅速的发展，其典型应用主要有相干激光雷达系统和相干激光通信系统[2-4]。

激光引信利用激光特有的方向性强、亮度高及相干好的特点，具有高的角度和距离分辨率以及强的抗电磁干扰能力,在武器系统中得到快速发展,已成为新一代先进导弹的重要标志之一[5]。

目前,激光引信普遍采用激光非相干探测体制,利用时间间隔测量法实现对目标的探测。只能检测信号光功率的变化，无法获得信号光频率相位等信息。虽然激光引信得以迅速发展,但是抗环境杂波干扰能力差等问题却严重制约了激光引信的性能提升和更广泛的应用。为此,人们在非相干探测体制上采取了多种手段[6-10],但都不能较好地解决该问题,而新型的相干探测体制激光引信可进一步提升系统的信噪比,同时可得到信号频率相位等信息,可极大提高激光引信抗云雾及地海杂波等自然环境干扰能力。但是,目前相干探测体制在激光引信领域尚没有大规模开展。

3 相干激光引信的优点

相干激光引信是基于激光相干探测原理，将目标反射回来的信号光和由本振激光器输出的本振光经过合束器入射到光电探测器表面进行相干混频，获得光回波信号的振幅、频率和相位等信息,对信号

进行解算得到区分目标和环境干扰的信息[11-12]。

与非相干激光引信相比，相干激光引信具有以下的优点。

(1) 相干激光引信可以获取目标的速度信息。导弹与目标交会过程中，导弹与目标相对速度与导弹相对自然环境的速度差别巨大，如图 2 所示。利用这一差别，可以将云、烟、雾、霾、雨、地海杂波等自然环境回波与目标回波区分开来，进而解决激光引信抗自然环境能力差的问题。非相干激光引信检测回波光功率的变化，无法得到目标的速度信息。相干激光引信通过检测激光多普勒信号，可以得到目标相对速度信息。

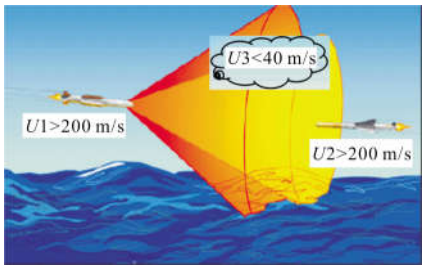

图 2 导弹与目标交会示意图

Fig.2 Schematic of intersection of missiles and targets

(2) 相干激光引信可以提升系统的信噪比进而增大作用距离。非相干激光引信信噪比为输出光电流均方值正比于噪声光电流的均方值。探测距离较远时，信号光非常弱，非相干探测系统输出电流均方值小，信噪比变低。相干激光引信系统的信噪比与本振光均方电流值和信号光均方电流值成正比。在较远距离探测时，可以适当增大本振光功率，提高系统信噪比。

(3) 相干激光引信具备更好的抗背景光干扰能力和更强的抗主动光干扰能力。通过本振光的相关性可以从体制上消除阳光等杂散光以及主动干扰光对其的影响。

4 相干激光引信体制

将激光相干探测技术应用到激光引信中，可极大地提升激光引信的性能。相干激光引信主要有以下几种体制，单纯实现测速功能的体制主要有单频相干探测激光引信和双频相干探测激光引信；实现测速测距全功能的体制主要有脉冲多普勒相干探测激光引信和线性调频相干探测激光引信。

4.1 单频相干探测激光引信

单频相干探测激光引信是采用单一频率激光进行相干探测，利用激光的多普勒效应得到目标的速度信息，其探测原理如图3 所示。

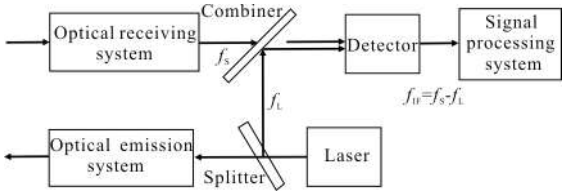

图 3 单频相干激光引信探测原理图

Fig.3 Detection principle diagram of single-frequency coherent laser fuze

激光器出射单频激光经分束器分为两部分光，其中小部分光作为本振光，大部分光经过光学发射天线进行整形后对目标进行探测，目标反射后由光学接收天线进行接收，得到包含目标多普勒频移的信号光；信号光和本振光同时会聚到光电探测器上得到拍频信号，即激光多普勒频移；经信号处理电路解算出目标的速度信息，完成目标的探测和识别。

单频相干探测激光引信可以实现对目标速度信息的获取，通过速度信息可以将云、烟、雾、霾、雨、地海杂波等自然环境回波与目标回波区分开来，从而提高系统抗自然环境干扰的能力。由于激光频率高达 10^{14} Hz 以上，目标相对速度以 1 000 m/s 计算，其多普勒频移达到 GHz 量级，要求光电探测器有足够高的响应带宽，此种方法无法应用到带宽较低的激光引信，如大视场激光引信等领域。

4.2 双频相干探测激光引信

双频相干探测激光引信是利用共源的双频激光进行相干探测，采用输出为同偏振的线偏振光的双频激光器作为光源，并使这两个线偏振光同时传感速度信息，具有更高的光强利用率和信噪比，可以有效提高测速上限，扩大测速范围。双频激光多普勒测速方法的原理如图 4 所示[13]。

双频激光器发出光的频率为 f_1 和 f_2，二者为偏振方向相同的线偏振光，频差为 $\Delta f = f_1 - f_2$，输出光经分束棱镜分为两束光。一束反射光由光电探测器

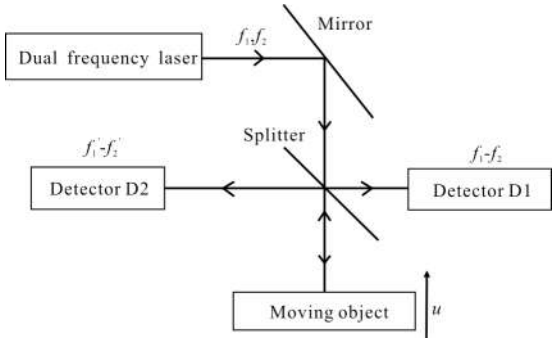

图 4 双频相干激光引信探测原理图

Fig.4 Detection principle diagram of dual-frequency coherent laser fuze

D1 接收,测得的拍频信号 f_{d1} 作为参考信号。另一束透射光照射到以速度 u 运动的待测物体上，经待测物体反射后，具有多普勒频移的反射光由光电探测器 D2 接收,测得的拍频信号 f_{d2} 作为测量信号。探测器 D1 测得的参考信号频率为 $f_{d1}=\Delta f$,探测器 D2 探测到的测量信号频率为：

$$f_{d2}=\Delta f(1+2u/c) \tag{5}$$

参考信号 f_{d1} 和测量信号 f_{d2} 之差正比于待测的速度,所以待测物体的速度为：

$$u=c(f_{d2}-f_{d1})/(2\Delta f) \tag{6}$$

可知当待测物体的速度 u 很高时,$f_{d2}-f_{d1}$ 仍较小。即采用一定频差的双频激光器作为光源,相对于单频测速，这种方法得到的频差远远小于单频相干探测方案，因此探测高速目标时不需要很大的接收带宽。

双频相干探测激光引信利用共源双频激光对高速目标进行探测,通过控制双频激光频率的差值,可将高速目标 GHz 量级的多普勒频率转换到 kHz 量级,有效降低了激光引信系统探测带宽的要求,并利用双频激光多普勒频移偏差解算出目标的速度信息，进而提升激光引信抗云雾及地海杂波等自然环境干扰能力。由于双频激光多普勒频移偏差很小,要求激光器输出的双频激光具有及窄的线宽，同时双频激光频率的差值具有很高的稳定性。

4.3 脉冲多普勒相干探测激光引信

以上两种方案能够获取目标的速度信息，但是无法获得距离信息,若要同时获得距离和速度信息,可以采用脉冲多普勒或线性调频激光引信。脉冲多普勒相干探测激光引信是采用脉冲激光进行相干探测,通过对激光进行脉冲放大实现远距离探测,利用脉冲激光上升沿和多普勒频率信息解算出目标的距离及速度信息,完成目标的探测和识别。脉冲多普勒相干探测激光引信如图 5 所示。

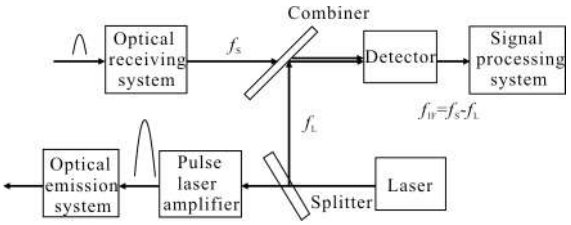

图 5 脉冲多普勒相干激光引信探测原理图

Fig.5 Detection priciple diagram of the pulse Doppler coherent laser fuze

激光器出射单频激光经分束器分为两部分光：一部分光作为本振光;另一部分光作为探测光。脉冲激光经过目标反射后被光学接收天线接收，与本振光同时会聚到光电探测器上，利用收发脉冲上升沿时间延迟得到距离信息，利用脉冲持续时间内的信号进行相干探测得到多普勒信号，进而解算出速度信息。

脉冲多普勒相干探测激光引信利用脉冲激光对高速目标进行探测，通过激光脉冲放大器提高了激光发射功率,增大了激光引信系统的作用距离,同时通过检测脉冲激光回波的上升沿，可获得目标的距离信息。由于脉冲多普勒相干探测激光引信需要对激光进行脉冲放大,增加了系统结构的复杂性。

4.4 线性调频相干探测激光引信

线性调频相干探测激光引信是将激光频率进行线性调制后发射出去，利用线性调频技术和多普勒频率获得目标的距离及速度信息，完成对目标的探测和识别。线性调频相干探测激光引信如图 6 所示。

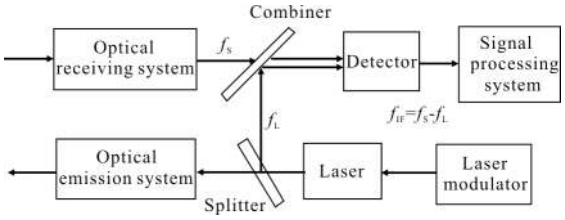

图 6 线性调频相干激光引信探测原理图

Fig.6 Detection principle diagram of linear frequency modulation coherent laser fuze

直接对激光器进行内调制或者对激光器输出进行外调制，对激光频率完成线性频率调制后输出激光，经分束器分为两部分光，线性调频激光经过目标反射后被光学接收天线进行接收，与本振光同时会聚到光电探测器上，得到含有距离及速度信息的多普勒信号，经信号处理电路解算出目标的距离及速度信息，完成对目标的探测和识别。

线性调频相干探测激光引信利用线性调频和相干探测技术，通过检测多普勒信息，可以同时获取目标高精度的距离及速度信息，可极大提升激光引信抗云雾及地海杂波等自然环境干扰能力。同时，内调制线性调频模块可以集成在激光器中，降低了激光引信系统的复杂性，利于实现系统的工程化。

5 典型的线性调频相干激光引信系统

线性调频相干探测激光引信通过对输出激光的频率进行线性调制，将本振光与回波信号光进行干涉拍频并对拍频信号进行分析，从而得到目标的距离和速度信息。

5.1 工作原理

通常目标距离和速度的频谱会相互干扰，即存在距离速度耦合现象，为剔除该耦合，可采用对称三角波的调制解调方式进行处理。采用对称三角波调制连续波激光器的激光发射和接收信号的时间频率关系如图 7 所示。

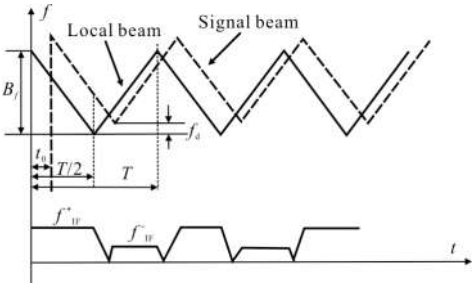

图 7 对称三角波调制信号的时频关系

Fig.7 Relation of time-frequency in symmetric triangular signal

因此，目标的距离和速度可分别表示为：

$$R=T_m c(f^+_{IF}+f^-_{IF})/(8B_f) \tag{7}$$

$$V=\lambda(f^+_{IF}-f^-_{IF})/4 \tag{8}$$

因此，通过检测对称三角波的下降和上升频率调制段的频移大小，就可以解算出目标的距离及速度信息，从而识别出目标或干扰的回波，实现干扰环境下的目标探测与引爆。

5.2 系统组成

线性调频相干探测激光引信利用调制后的连续波激光对目标进行探测，由光电探测器进行相干接收获得目标的频率信息，进而解算出目标的速度和距离信息，实现对目标识别和抗干扰。图 8 给出了线性调频相干探测激光引信的系统方案。

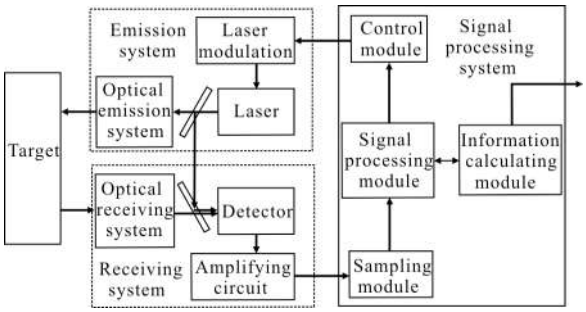

图 8 线性调频相干激光引信的系统方案

Fig.8 Program of linear frequency modulation coherent laser fuze

线性调频相干探测激光引信系统主要由发射系统、接收系统、信息处理系统以及二次电源模块等部分构成。发射系统包括激光器、激光调制器以及发射光学天线；接收系统包括接收光学天线、光电探测器以及接收放大电路；信息处理系统包括控制模块、采集模块、信号处理模块以及信息解算模块。激光器通过调制器驱动输出线性调频连续波激光，激光束经过分束器得到本振光束和出射光束；出射光束经发射光学天线整形后照射到目标上，经目标反射后由接收光学天线进行会聚，通过合束器实现与本振光束的合束，并由光电探测器进行相干接收得到回波电信号；该信号经过接收放大电路后由采集模块采集，再通过信号处理模块解算得到目标的距离及速度等信息，实现干扰环境下对目标的探测与识别。

6 结束语

激光相干探测具有灵敏度高、携带信息丰富、能有效地滤除杂散背景光等优势，在军事、测绘、通信等领域得到广泛的应用和迅速的发展，但在激光引信领域，受限于相关技术，尚没有大规模的应用。新型的相干激光引信具有以下的优点：(1) 相干激光引信可以获取目标的速度信息。激光相干探测通过检测激光多普勒信号获得目标的相对速度信息。利用

此特点,相干探测可以提高激光引信系统抗云、烟、雾、霾、雨、地海杂波等自然环境干扰的能力。(2) 相干激光引信可以提升系统的信噪比进而增大作用距离。(3) 相干激光引信具备更好的抗背景光干扰能力。目前相干探测激光引信技术尚处于起步阶段,具有广阔的应用前景, 值得各相关研究机构进行深入研究,进而加快相干激光引信的工程化应用进程。

参考文献:

[1] Wang Yusan. The Principle and Application of Opto-electronics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 330-335. (in Chinese)
王雨三. 光电子学原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,2004: 330-335.

[2] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(5): 1414-1419. (in Chinese)
韩燕,孙东松,翁宁泉,等. 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程,2015,44(5): 1414-1419.

[3] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(S1): S104002. (in Chinese)
胡杨, 朱鹤元. 1.55μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达[J]. 红外与激光工程,2016,45(S1): S104002.

[4] Xu Chunfeng, Han Cheng, Jiang Huilin. Simulation of orbit characteristic between GEO and LEO laser communication [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(8): 0822008. (in Chinese)
徐春凤,韩成,姜会林. GEO 与 LEO 间激光通信轨道特性仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0822008.

[5] Chen Huimin, Yan Xiaopeng. Study on the techniques of pulse laser fuze [C]//SPIE, 2008, 6622: 662208.

[6] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)
陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学 精密工程,2015,23(3): 626-631.

[7] Wang Rui. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(6): 951-956. (in Chinese)
王锐. 激光距离选通成像门宽对图像信噪比影响[J]. 中国光学,2015,8(6): 951-956.

[8] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
徐正平,沈宏海,许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学,2015,8(1): 28-38.

[9] Miao Xikui, Zhao Wei, Zhang Hengwei, et al. Research of laser encoding method based on time-controlled pulse interval [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(10): 1006002. (in Chinese)
苗锡奎,赵威,张恒伟,等. 时间控制脉冲间隔激光编码方法研究[J]. 红外与激光工程,2016, 45(10): 1006002.

[10] Yan Xiaopeng, Li Ping, Chen Huimin. Study on detcection techniques for laser fuze using pseudorandom code [C]// SPIE, 2007, 6824: 682418.

[11] Chen Huimin, Li Ping, Yan Xiaopeng, et al. Laser fuze detection techniques using different methods [J]. ***Optical Technique***, 2006, 32(Z1): 348-350. (in Chinese)
陈惠敏,栗苹,闫晓鹏,等. 基于不同作用体制的激光引信探测技术[J]. 光学技术, 2006,32(Z1): 348-350.

[12] Liu Lisheng, Zhang Heyong, Wang Tingfeng, et al. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
刘立生,张合勇,王挺峰,等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1508-1515.

[13] Zhang Yanyan, Huo Yujing, He Shufang, et al. A new dual-frequency laser Doppler velocity measurement method [J]. ***Laser & Infrared***, 2010, 40(7): 694-696. (in Chinese)
张艳艳,霍玉晶,何淑芳,等. 一种新的双频激光多普勒测速方法的实验研究[J]. 激光与红外,2010,40(7): 694-696.