

文章编号: 0258-7025(2008)12-1981-05

基于相干激光雷达的激光微多普勒探测

张海洋 赵长明 蒋奇君 杨苏辉 苏必达

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 利用相干激光雷达探测目标微动特性技术是一种以单频激光为光源,用外差探测的方式实现对低速、低频多个运动物体进行微多普勒信息提取和识别的技术。以波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 的窄线宽单块激光器为光源,发射激光经过模拟长距离传输的4 km的光纤延迟,照射到以扬声器的发声单元和电动平移台为目标的微动物体上,目标反射的激光会聚进入单模光纤,参考光与信号光通过3 dB光纤合束器线性耦合进入同一根光纤,并在探测器表面进行相干。用于接收相干信号的探测器的接入方式为光纤输入,带宽为3.5 GHz。利用时间-频率域联合描述的方法对数/模(A/D)采样后的数据进行分析。在4 km光纤延迟时,本系统最低探测速度为0.5 mm/s,速度分辨率达到毫米每秒量级,频率分辨率达到千赫兹量级。利用微多普勒信息探测技术,实现了探测物体表面的微动状态信息和识别运动状态的目的。

关键词 探测器;相干激光雷达;微多普勒效应;时频分析;单频激光器

中图分类号 TN 958.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1981

Laser Detection on Micro-Doppler Effect in Coherent Ladar

Zhang Haiyang Zhao Changming Jiang Qijun Yang Suhui Su Bida

(Department of Photoelectric Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A coherent ladar system for detecting vibration of a moving target was demonstrated. Micro-Doppler information was obtained to identify moving targets. Single frequency laser at $1.064\ \mu\text{m}$ was input to a 4 km long single mode fiber to simulate the translation of long distance. A loudspeaker was used as the target with micro-motion. Back-scattered light from the target was collected by the receiving optics and coupled into a single mode fiber. A 3 dB fiber coupler was used to combine the received signal and the master oscillation, the output of the coupler was detected by a photodiode detector with 3.5 GHz bandwidth. The electrical signals of detector's output were sampled by a high speed A/D card. The information of micro-motion can be extracted through the arithmetic of time-frequency analysis. With the delay of 4 km fiber, the lowest speed that the system can detect was 0.5 mm/s, the resolution of speed detection was in the order of mm/s, the resolution of frequency was in the order of kHz. Utilizing the technology of micro Doppler detection, the targets of different motion dynamics can be classified and identified.

Key words detectors; coherent ladar; micro-Doppler effect; time-frequency analysis; single frequency laser

1 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^[1~7]。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。例如从表面振动的微多普勒特征可以将燃气涡轮发动机驱动的坦克与柴油发动机驱动的汽车分辨出来。

多普勒现象对工作频率很敏感,而相干激光雷达工作频率在 $10^{13} \sim 10^{15}$ Hz,因而激光雷达相对于

收稿日期:2008-01-16;收到修改稿日期:2008-04-24

作者简介:张海洋(1981—),男,河北人,博士研究生,主要从事激光雷达技术的研究。E-mail: ocean@bit.edu.cn

导师简介:赵长明(1960—),男,河北人,教授,博士生导师,目前研究方向为新型激光器与激光雷达技术。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

微波雷达探测微多普勒信息具有明显的优势。随着单频激光技术特别是全固态单频激光技术的发展,使微多普勒探测的发展更加迅速。国外对于激光微多普勒效应的分析和研究较早,并已经取得初步成果^[8,9]。国内研究起步较晚,只有一篇利用迈克尔孙干涉仪探测单个物体微多普勒现象的报道^[10]。本文提出的利用相干激光雷达探测目标微动特性测量技术是一项以单频激光为光源,实现对低速、低频多个运动目标的微多普勒信息提取的技术。实验系统中,以单块单频激光器为光源,用外差探测的方式观测到在不同目标特征下的微多普勒信息,并通过一系列基于激光雷达的算法进行多普勒信息提取,从而达到探测和识别目标表面微动状态的目的。

2 基本原理

2.1 微多普勒探测原理

相干激光雷达系统适用于探测微多普勒效应。在相干激光雷达中,目标回波在径向距离的变化引起相位的变化,径向距离上半个波长的变化就会引起 360° 的相位变化。多普勒频移可以反映相位随时间的变化情况,因此,目标表面的振动状态可以通过回波信号的多普勒频移来探测和识别。根据文献^[11]提出的理论模型,当目标为点目标时雷达接收到的信号为

$$s(t) = A \exp\{j[2\pi f_0 t + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中 A 为微动目标点的反射率, f_0 为发射激光的中心频率,相位变化 $\phi(t) = 4\pi f_0 R(t)/c$, $R(t)$ 为任意时刻目标雷达与目标的距离。目标的微动引起的微多普勒频移为

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2f_0}{c} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (2)$$

本实验采用扬声器的发声单元为运动目标,其运动近似为正弦运动,即 $R(t) = L \sin(\omega t)$, L 为振动幅度, ω 为振动频率,则发声单元引起的微多普勒频移为

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2f_0 L \omega \cos(\omega t)}{c}. \quad (3)$$

2.2 实验装置

微多普勒探测系统如图1所示,其中激光器采用激光二极管抽运的单块非平面环形腔Nd:YAG激光器^[12~14],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(AO)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,经过数千米用于模拟远距离传输的光纤后,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。另外一束光照射到做往复匀速运动的电动平移台上。由发声单元与平移台反射回来的信号光,分别经过望远镜会聚后,再由光纤耦合器耦合到一根光纤中。然后再与参考光通过光纤耦合器耦合到一根光纤中,连接到带有FC标准接头的高速光电探测器上,并在探测器光敏面上相干。由探测器输出的电信号经过调制与数/模(A/D)采集及软件处理后,就可以实时地观测到微多普勒信号。

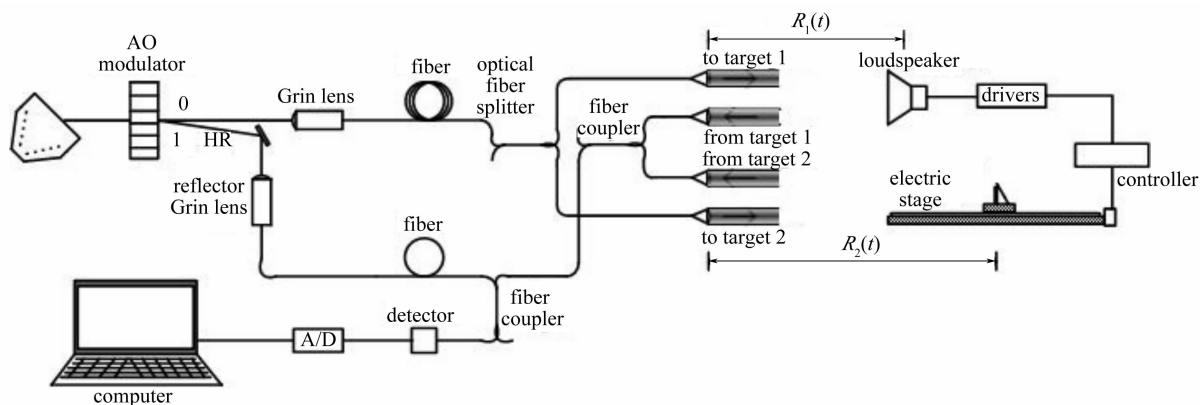


图1 微多普勒相干激光雷达原理图

Fig.1 Schematic of coherent micro-Doppler lidar

3 实验

相干激光雷达系统中单频光源是关键,本系统

采用波长 $1.064 \mu\text{m}$ 的单块非平面环形腔激光器(NPRO),具有优良的光束质量($M^2 < 1.2$)和频率

稳定性(线宽 <2 kHz)。为了模拟远距离探测情况,在发射光路上设置了长度4 km的光纤延迟。声光频移为100 MHz(模拟开关设定,具有一定误差)。相干信号使用带宽为3.5 GHz的光电探测器探测,探测器的输出通过带宽为150 MHz的高速信号处理系统处理为基频信号后,计算机中的处理软件就可以实时地获得微多普勒信号。

3.1 微多普勒探测

为了探测发声单元的微多普勒信号,首先关闭电动平移台,设定发声单元位移幅度 $L = 0.4$ mm,信号发生器的频率 $f = 0.75$ Hz,且调整发声单元的运动方向相对于接收望远镜为径向运动。如图2所示,图2(a)为接收到的信号进行傅里叶变换(FFT)后所形成的信号的频谱特征图,(b)为根据文献[11]提出的理论模型推导出的接收信号的理论频域分布图。实际频率分布图与理论分布图的比较可知振动目标的信号频谱具有丰富的频率成分,在1.8 kHz与4.5 kHz都具有一个频率尖峰。实际信

号的频率分布图除了噪声较理论频率分布图有一些差异外,频谱分布情况与理论分布能够很好地吻合。为了能够在时域内观测到微多普勒信号的变化,采用了一种时间-频率域联合描述方法,即短时傅里叶变换(STFT)^[15]。图3(a)为采集到的实际信号经过短时傅里叶变换后的图形,(b)为根据理论模型的仿真图形。二者实验条件相同,采样时间为5.5 s,且计算机对于基带信号的二次采样率均为12.5 kHz/s。图3(a)中固定时间点上存在周期性的频率毛刺,其主要原因是由于普通发声单元对低频信号的非线性响应造成的失真,随着驱动信号频率的升高,非线性效应会逐渐减弱。为了验证本装置对不同运动速度的响应,调整了驱动信号频率,为了尽量减少由于发声单元非线性响应而引入的噪声,减弱了驱动电压。图4,5分别为驱动频率 $f = 1.1$ Hz和 $f = 2.1$ Hz,幅度 $L = 0.34$ mm,采样时间 $T = 2$ s时的时频分布图。

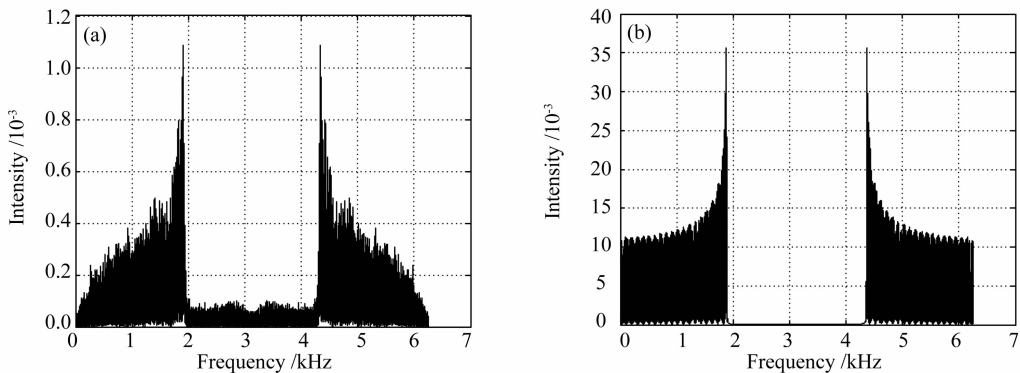


图2 实际信号(a)和理论信号(b)的频谱分布图

Fig. 2 Frequency distribution of real signal (a) and simulation signal (b)

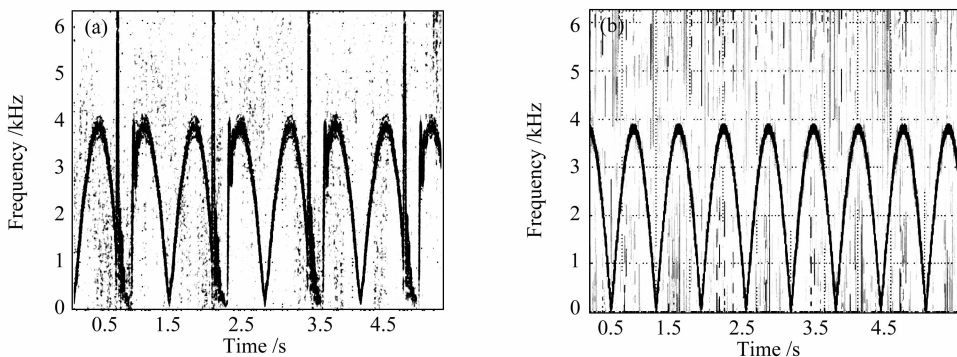


图3 $f = 0.75$ Hz时的时频分布图。(a) 实际采集到的信号时频图;(b) 信号的理论时频图

Fig. 3 Time-frequency distribution at $f = 0.75$ Hz. (a) time-frequency signature of target;

(b) time-frequency signature of simulation

比较图2~5可知,激光雷达所观测到的不同驱动频率下发声单元的微多普勒频移随时间的变化规

律与理论分布的变化规律基本一致,微多普勒频移变化周期也与设定值相同,频移幅度也基本相同,通

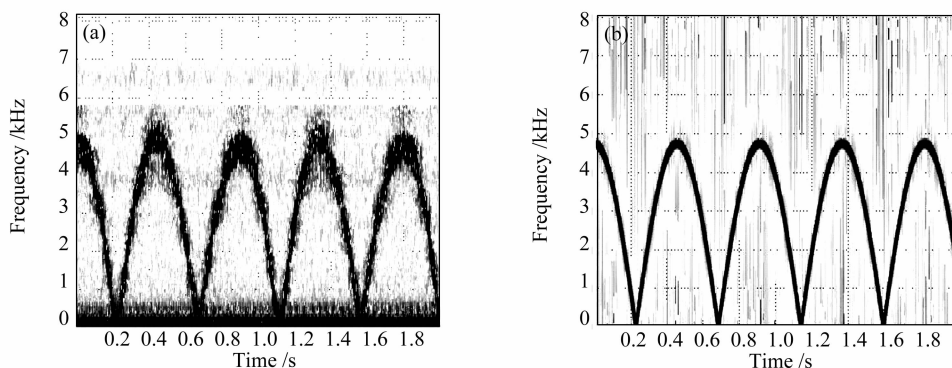


图 4 $f = 1.1$ Hz 时的时频分布图。(a) 实际采集到的信号时频图;(b) 信号的理论时频图

Fig. 4 Time-frequency distribution at $f = 1.1$ Hz. (a) time-frequency signature of target;
(b) time-frequency signature of simulation

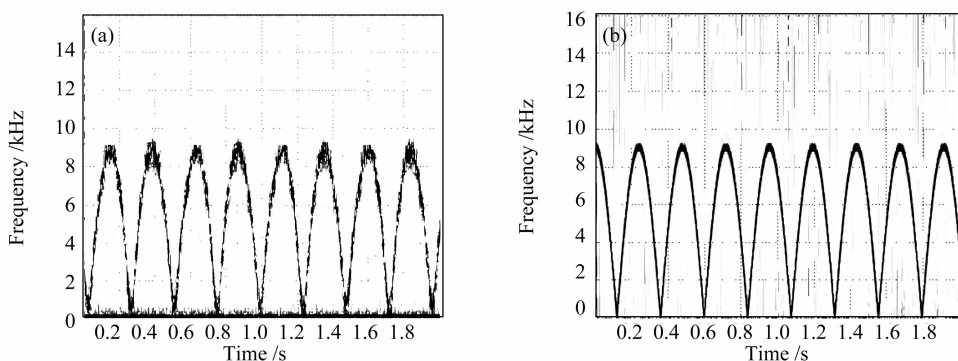


图 5 $f = 2.1$ Hz 时的时频分布图。(a) 实际采集到的信号时频图;(b) 信号的理论时频图

Fig. 5 Time-frequency distribution at $f = 2.1$ Hz. (a) time-frequency signature of target;
(b) time-frequency signature of simulation

过相同频率下多次测量结果比较,测得其相对误差小于 1%,这与发声单元的失真度 $< 1\%$ 基本相同。由此可以判断,经过 4 km 光纤延迟后,本系统对于低频低速运动目标引起的微多普勒频移的探测仍然具有很高的频率分辨率和灵敏度,这对于远距离精确探测很有意义。在图 2~5 中观测到的噪点则主要是由于激光器内部自发辐射导致的激光器线宽加宽^[16]而产生的噪声,并且延迟光纤越长,噪声的强度越大。通过多次测量,测得本系统最低探测速度为 0.5 mm/s,而且此项参数会随着延迟光纤的增长而继续恶化,这一结果与在 4 km 光纤延迟自差法测量激光器时观测到激光器线宽 < 1 kHz 所对应的理论最小探测速度相符,详细理论推导参看文献^[16]。

3.2 目标识别

探测目标的微多普勒信息的最终目的是识别和区分目标。为了模拟这一过程,设计了发声单元与电动平移台联动模式。在实验中,平移台除了运动方向反向点之外,电动平移台均以 0.00174 m/s 的

速度在 0.87 m 的行程内作往返运动。同时设定发声单元位移幅度 $L = 0.4$ mm, 振动频率 $f = 2.2$ Hz, 即运动速度在 0~5.6 mm/s 变化。根据 (3) 式,推算出发声单元的微动引起的微多普勒频移表达式为: $f_{D1} = 11.06 \times 10^3 \cos(13.816t)$ Hz, 由表达式可知其频移是正弦变化的。用同样的方法可推知平移台的频移为: $f_{D2} = 3.48 \times 10^3$ Hz。实验中,使用频谱仪观测到了如图 4 所示的波形。图中频谱仪的分辨率带宽为 100 Hz, 显示带宽为 50 kHz, 并设定声光调制器的频率为 101.93 MHz。

图 6 为利用频谱仪观测到的瞬时频谱,左边宽度较宽的峰为电动平移台平动引起的微多普勒频移,步进电机驱动平移台时,振动现象非常明显,从而导致频带加宽。右边的尖峰为发声单元振动引起的微多普勒频移。由于频谱仪只是记录瞬间频率分布的情况,不能实时记录频率的变化过程,图 6 中并没有反映出发声单元的微多普勒频移按照余弦变化的情况。由图 6 还可以看出,本系统可以将不同物体的微多普勒频移区分开,能够识别出不同微动物

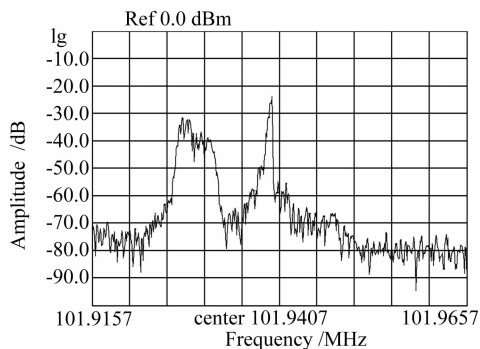


图6 频谱仪观测到的两个目标的微多普勒频移

Fig. 6 Micro-Doppler frequency shift of two targets in spectrum analyzer

体的数量以及运动状态。

4 结 论

在以单频激光器为光源的相干激光雷达系统中,利用时频变换的方法,成功地观测到了微多普勒频移,同时还利用观测到的不同物体的微多普勒频移特征,进行了初步的运动状态识别实验。在4 km 光纤延迟时,本系统最低探测速度为0.5 mm/s,速度分辨率达到毫米每秒量级,频率分辨率达到千赫兹量级。作为基于相干激光雷达的激光微多普勒探测技术,如何从无线电雷达已有的成熟技术特别是信号处理技术中吸取有益的思想,结合现有的激光雷达技术^[17~19]和特点取长补短,还有很多技术需要研究。

参 考 文 献

- 1 V. C. Chen, H. Ling. Time-Frequency Transform for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. Boston: Artech House, 2002
- 2 V. C. Chen. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform [C]. Proc. Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, 2000. 463~466
- 3 J. Li, H. Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 2003, **150**(4):284~291
- 4 T. Sparr, B. Krane. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR [J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 2003, **150**(4):277~283
- 5 T. Thayaparan, S. Abroi, E. Riseborough. Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition [C]. DRDC Ottawa TM 2004-170, Defence R&D Canada, Ottawa, 2004
- 6 T. Thayaparan, S. Abrol, S. Qian. Micro-Doppler analysis of rotating target in SAR [C]. DRDC Ottawa TM 2005-204,

- Defence R&D Canada, Ottawa, 2005
- 7 V. C. Chen, F. Li, S. S. Ho *et al.*. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2006, **42**(1):2~21
- 8 Stephen M. Hannon, J. Alex Thomso, Sammy W. Henderson *et al.*. Agile multiple pulse coherent lidar for range and Micro-Doppler measurement [C]. *SPIE*, 1998, **3380**:259~269
- 9 Wil Otaguro, Cecil Hayes. Microdoppler lidar systems [C]. *SPIE*, 2000, **4091**:268~277
- 10 Yuan Shuai, Wang Xueqin, Sheng Meiju *et al.*. Experimental research on laser micro-Doppler for detecting complex vibration of moving target [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(10):1036~1038
- 元 帅,王学勤,盛梅菊等. 激光微多普勒探测运动目标复合振动的实验研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(10):1036~1038
- 11 T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough *et al.*. Analysis of radar micro-Doppler signature from experimental helicopter and human data [J]. *IET Radar Sonar Navig.*, 2007, **1**(4):289~299
- 12 Wu Keying, Wei Guanghui, Zhao Changming *et al.*. Design of diode pumped unidirectional nonplanar single frequency ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1245~1250
- 吴克瑛,魏光辉,赵长明等. 激光二极管抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器的设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9):1245~1250
- 13 Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):149~152
- 王 欣,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):149~152
- 14 Wang Jingfeng, Zhang Haiyang, Chao Changming *et al.*. Injection seeding Nd:YAG laser and its application in heterodyne detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):186~190
- 王景峰,张海洋,赵长明等. 种子注入固体激光相干探测实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):186~190
- 15 Zhang Xianda. Modern Signal Processing [M]. Second ed.. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 362~367
- 张贤达. 现代信号处理[M]. 第二版. 北京:清华大学出版社, 2002. 362~367
- 16 J. A. Armstrong. Theory of interferometric analysis of laser noise [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(6):1024~1031
- 17 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang *et al.*. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):889~892
- 马宗峰,张春熹,张朝阳等. 光学外差探测信噪比研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):889~892
- 18 Liu Kexiang, Xu Rongguo, Wu Zhensen *et al.*. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):206~212
- 刘科祥,许荣国,吴振森等. 外场目标激光散射特性测量及分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):206~212
- 19 Li Lei, Zhao Changming, Gao Lan *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