

文章编号: 0253-2239(2010)08-2446-06

# 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究

孟昭华 洪光烈\* 胡以华 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 使用窄线宽半导体激光器、声光移频器、马赫-曾德尔幅度调制器以及全光纤相干光路, 构建了一套基于平衡相干探测与啁啾调幅的激光测距实验系统。介绍了啁啾调幅相干激光雷达的工作原理, 完成了基于直接数字合成(DDS)技术的啁啾信号生成及射频信号处理电路的设计。对实验系统的时间分辨力与最小可探测功率进行了测试, 对实验出现的一些现象进行了分析。

**关键词** 光学器件; 相干激光雷达; 啁啾; 调幅

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2446

## Research on Chirped Amplitude Modulation Coherent Lidar

Meng Zhaohua Hong Guanglie Hu Yihua Shu Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** A theory validation system of coherent lidar with balanced coherent detection and chirped amplitude modulation is built based on narrow line width diode laser, acousto-optic frequency shifter, Mach-Zehnder intensity modulator, and all-fiber coherent detection optics. The principle of the chirped amplitude modulation coherent lidar is introduced. The design of direct digital synthesis(DDS) based chirp signal generation and radio frequency signal processing circuits are also discussed. The measurement of time resolution and minimum detection power of the system is conducted and some phenomena in the experiment are analyzed.

**Key words** optical devices; coherent lidar; chirp; amplitude modulation

## 1 引 言

目前激光测距多基于两种体制, 一种为利用测量激光脉冲的飞行时间来实现测距, 此方法利用脉冲激光器的高功率特性, 可实现远距离测量, 但测距精度受到激光脉冲宽度的限制; 另一种则采用调制的连续波激光或者长激光脉冲, 通过测量回波中调制信号的相对变化来实现测距<sup>[1]</sup>, 此类方法可实现高精度的距离测量, 但受限于激光功率, 不能实现远距离的测量。为了实现较远距离的高精度测量, 基于相干探测的啁啾调幅测距方式被提出<sup>[2]</sup>, 利用相干探测的高灵敏度来提高调制测距的作用范围<sup>[3]</sup>。

## 2 啁啾调幅相干探测激光雷达系统原理

### 2.1 平衡相干探测原理

激光相干探测是激光回波信号与本振光信号在

探测器上进行相干, 通过测量两者相干所得到的中频信号, 进而完成对激光回波信号探测的探测方式。相干探测通过引入本振光信号提高了探测灵敏度<sup>[4~6]</sup>。

若激光本振信号

$$E_{\text{loc}} = A_{\text{loc}} \cos \omega_{\text{loc}} t \quad (1)$$

和激光回波信号

$$E_{\text{in}} = A_{\text{in}} \cos(\omega_{\text{in}} t + \varphi) \quad (2)$$

同时照射光电探测器时, 则探测器输出电流为

$$I_1 = R \{ P_{\text{in}} + P_{\text{loc}} + \sqrt{P_{\text{in}} P_{\text{loc}}} \cos \gamma \cos[(\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{loc}})t + \varphi] \}, \quad (3)$$

式中  $R$  为探测器响应率, 单位为  $\text{A/W}$ , 包含了两信号的差频分量:

$$R \sqrt{P_{\text{in}} P_{\text{loc}}} \cos \gamma \cos[(\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{loc}})t + \varphi],$$

式中  $\cos \gamma$  由光信号相干度以及光束匹配程度决定<sup>[7~8]</sup>。

收稿日期: 2009-09-20; 收到修改稿日期: 2009-11-05

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)及中国科学院支撑项目(61501010403)资助项目。

作者简介: 孟昭华(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为激光相干探测与信号处理。E-mail: MZH1983@yahoo.com.cn

导师简介: 胡以华(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向是空间信息处理。E-mail: yh-hu@263.net

\* 通信联系人。E-mail: guanglieh@yahoo.com.cn

由于需要使用功率较大的本振光,因此本振信号产生的散粒噪声与相对强度噪声就成为相干探测主要的噪声源,可以采用平衡探测方式以减小这两种噪声的影响<sup>[2]</sup>。

平衡探测的光路如图 1 所示,由 50/50 的光纤耦合器与平衡探测器构成。光纤耦合器两端口分别用于回波与本振光信号的输入,两个输出量端口输出的为本振与回波信号的混合信号。50/50 耦合器两耦合臂的相对附加相移为  $180^\circ$ 。

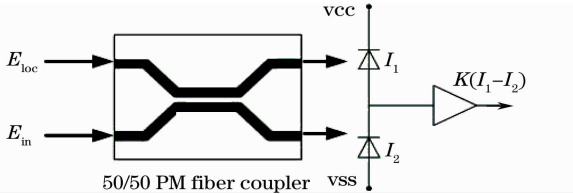


图 1 平衡探测的光路

Fig. 1 Optical path of balance detection

如输入本振信号与回波信号的电场分量为  $E_{loc}$  与  $E_{in}$ (对应信号功率分别为  $P_{in}$  与  $P_{loc}$ )则光纤耦合器两输出端口的输出信号分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= 1/\sqrt{2}(E_{in} + E_{loc}) \\ E_2 &= 1/\sqrt{2}(E_{in} - E_{loc}) \end{aligned} \quad (4)$$

混合信号  $E_1$  与  $E_2$  在分别输入平衡探测器的一只 PIN 管后,由(3)式可得产生的电流分别为

$$I_1 = \frac{1}{2}R\{P_{in} + P_{loc} + \sqrt{P_{in}P_{loc}} \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \varphi]\}, \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}R\{P_{in} + P_{loc} - \sqrt{P_{in}P_{loc}} \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \varphi]\}. \quad (6)$$

平衡探测器输出内部两只 PIN 管的电流之差。设  $K$  为平衡探测器的跨阻增益,则输出电压为

$$V_{out} = KR \sqrt{P_{in}P_{loc}} \cos \gamma \cos[(\omega_{in} - \omega_{loc})t + \varphi]. \quad (7)$$

平衡探测器消除了由高入射光信号功率引起的相对强度噪声,同时还可以相同的互减方式消除伴生的直接探测信号,避免其在频域上与相干探测信号混迭。

## 2.2 啁啾调幅测距原理

啁啾调幅是利用线性调频的信号(啁啾信号)去调制激光雷达发射激光的幅度。当接收到回波激光信号时,被幅度调制的回波啁啾信号与原始无延迟啁啾信号之间存在一个由回波延时决定的固定频差,通过检测频差,就可以得到回波延时,进而得到目标距离。

啁啾信号的频率表达式为

$$f(t) = f_s + \frac{B}{T}t, \quad (-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}) \quad (8)$$

式中  $f_s$  为啁啾信号的中心频率, $B$  为啁啾信号的带宽, $T$  为啁啾信号频率变化的周期。

由此可得原始的啁啾信号

$$\begin{aligned} v(t) &= \cos 2\pi \int [f(t) dt] = \\ &= \cos[2\pi(f_s t + \frac{Bt^2}{2T}) + \varphi], \end{aligned} \quad (9)$$

经过  $\tau$  延时后的回波啁啾信号为

$$v(t - \tau) = \cos \left\{ 2\pi \left[ f_s(t - \tau) + \frac{B(t - \tau)^2}{2T} \right] + \varphi \right\}. \quad (10)$$

延时的啁啾信号与原始啁啾信号混频后通过低通滤波可得到两信号的差频信号  $V_x$

$$V_x = \frac{1}{2} \cos \left( \frac{2\pi B\tau t}{T} + 2\pi f_s \tau - \frac{\pi B\tau^2}{T} \right). \quad (11)$$

由上式可见,差频信号  $V_x$  是一个余弦函数, $V_x$  的频率  $f_x$  同延迟时间  $\tau$  成正比。差频信号  $V_x$  的频率为  $f_x = \tau B/T$ 。为了获取精确的回波延迟时间  $\tau$ ,要求啁啾信号频率随时间增长的斜率  $B/T$  恒定。否则  $f_x$  就会随时间变化,不能保持恒定,无法通过  $f_x$  计算  $\tau$ (如图 2 所示)。

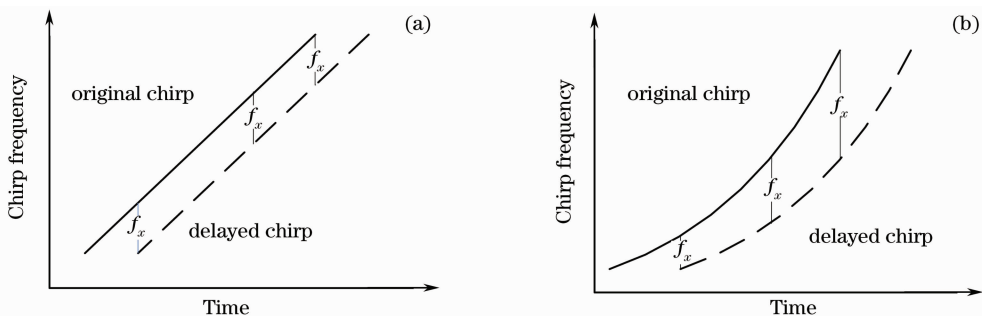


图 2 啁啾的影响。(a)线性啁啾;(b)非线性啁啾

Fig. 2 Effect of chirp. (a)linear chirp; (b)nonlinear chirp

### 3 啁啾调幅相干激光雷达实验系统

实验系统中使用的激光器为 NEW FOCUS 6330 可调窄线宽半导体激光器,波长可调谐范围为 1550~1630 nm,线宽小于 300 kHz,使用保偏光纤耦合输出时,最大输出功率为 4 mW。实验中使用的波长为 1573 nm。激光经过声光移频器(AO frequency shifter)后分为两部分,被移频的 1 级光直接作为相干探测的本振光,未被移频的 0 级光进入马赫-曾德尔幅度调制器(M-Z intensity modulator)被啁啾信号调幅。实验系统中选用

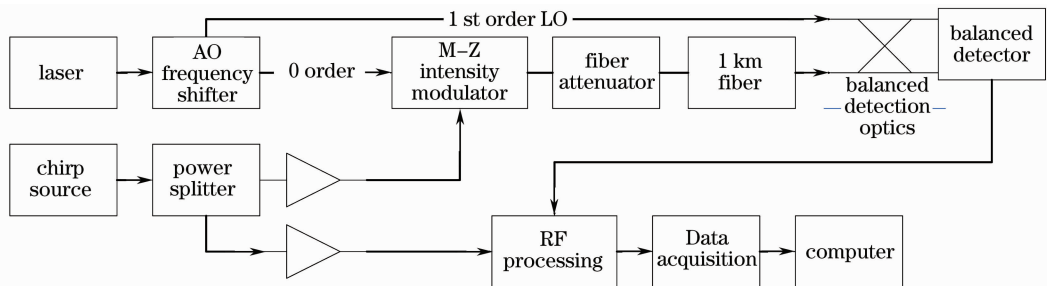


图 3 实验系统结构框图

Fig. 3 Structure of a theory. validation system

#### 3.1 基于直接数字合成(DDS)的啁啾信号源

由于啁啾调幅测距对啁啾信号的频率随时间增加的线性度有很高要求,在这种要求下,使用 DDS

系统合成啁啾信号就成为了最佳选择,信号源的产生如图 4 所示。

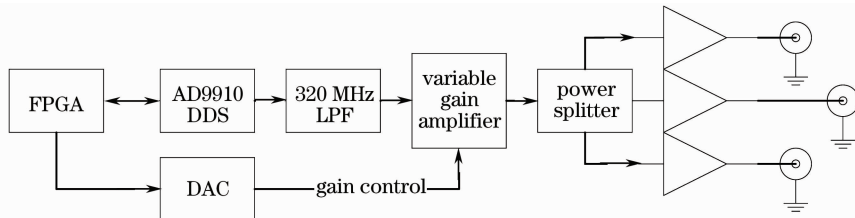


图 4 啁啾信号源框图

Fig. 4 Block diagram of chirp source

直接数字合成系统中选用的 DDS 器为 ADI 公司生产的 AD9910,为 1 GSPS 的 DDS 合成器。AD9910 可实现四种工作模式,包括单频模式, RAM 调制模式、数字斜率调制模式与并行数据端口调制模式。

其中 AD9910 DDS 合成器的数字斜率调制模式为基于 DDS 内部的斜率控制器,可对 DDS 输出信号的频率、相位或者幅度进行线性扫描控制。啁啾信号的产生,就是选择对频率进行扫描控制,需设定斜率寄存器内部的频率起始值、终止值、扫描斜率以及扫描方式。实验系统中设定起始频率为 80 MHz,终止频率 240 MHz,扫描周期 1 ms。

为了确保输出啁啾信号在频带内幅度基本恒

BRIMOSE 公司 600 MHz 的声光移频器,选用的马赫-曾德尔幅度调制器为 JDSU 公司的 20 GHz 带宽的模拟幅度调制器。

实验系统如图 3 所示,被调制的光信号通过光纤衰减器与光纤延迟线作为模拟回波信号。模拟回波信号与本振光在平衡相干光路中混合,经过平衡探测器得到相干探测的中频信号。中频信号在射频处理部分经过放大、滤波以及去啁啾、去中频后得到对应光纤延迟时间的  $V_r$  信号,经过数据采集(Data acquisition)进入计算机进行分析。

定,可以使用现场可编程逻辑阵列(FPGA)通过数模转换器控制变增益放大器的增益,补偿模拟信号通路中的衰减。实验中调节啁啾信号源的两路输出都为 14 dBm,分别用于驱动幅度调制器与去啁啾混频器(chirp mix)。使用的幅度调制器的半波电压  $V_\pi$  为 6.0 V,调幅深度为 0.76。

#### 3.2 射频信号处理电路

射频信号处理电路框图如图 5 所示。系统中使用 600 MHz 的声光移频器,因此光相干后得到的中频信号为 600 MHz,啁啾信号频率为 80~240 MHz,不考虑电光调制器与相干探测的非线性,平衡探测器的输出信号为啁啾信号对光相干中频的调幅,信号频谱如图 6 所示。

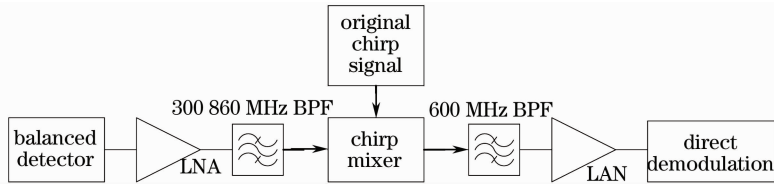


图 5 射频信号处理电路框图

Fig. 5 Processing circuits of radio-frequency signal

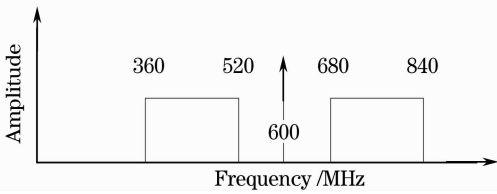


图 6 平衡探测器输出信号频谱

Fig. 6 Balanced detector output spectrum

平衡探测器的输出被两级低噪声放大器(LNA) ABA-52563 放大, 经过带通滤波器(BPF)后, 与原始啁啾信号在混频器中混频去啁啾。去啁啾后, 信号为回波延时对应的差频信号  $V_x$  对相干中频的调幅, 使用中心频率为 600 MHz 的带通滤波器去除泄漏的混频本振的影响。最后使用 HSMS-282C 射频肖特基二极管构成的倍压检波电路(如图 7 所示), 由于二极管检波电路输入阻抗大, 需要加入阻抗匹配电路以减小回波损耗, 选用的匹配方式为并联 27 nH 电感后再串联 5.6 pF 电容。

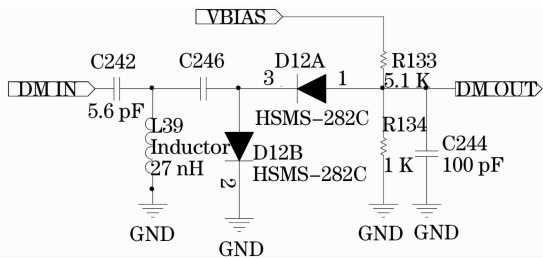


图 7 倍压检波电路

Fig. 7 Voltage doubling detection circuits

经过直接检波就得到了回波延时对应的信号  $V_x$ , 为了提取其频率  $f_x$ , 系统使用 NI 的 PXI-5105 采集卡对  $V_x$  信号进行采集, 采样频率 10 MHz, 采样点数为  $10^5$  对应采样时间为 10 ms。使用快速傅里叶变换(FFT)分析得出  $f_x$ , 频谱分辨率为 100 Hz。回波延时就可由  $\tau = f_x T / B$  得出。

### 4 系统实验测试

实验系统中使用光纤延迟线来产生回波的延迟, 使用可调光纤衰减器来调节回波功率的大小, 对实验系统的时间分辨力与最小可探测功率进行了测试。

#### 4.1 距离分辨率测试

测试中采用了一组不同长度的光纤来组合得到不同的延时值, 对系统的时间分辨力进行了测试。测试时调节激光器与衰减器, 控制激光本振信号为 0.4 mW, 回波信号为 3 nW。对采集的解调信号进行 FFT 后寻找峰值点, 其对应的频率就为信号频率  $f_x$ 。测试的光纤长度与对应的  $f_x$  频率如图 8 所示。测试时光纤的基准长度为 1040 m, 然后以增加 1~8 m 不同长度的光纤, 实验结果表明, 系统基本可以分辨出 1 m 的光纤长度变化。但在总长度为 1042 m 与 1043 m 以及 1047 m 与 1048 m 出现无法分辨的情况。比较 1042 m 与 1043 m 光纤延迟对应  $V_x$  信号的频谱, 发现如图 9 的现象, 在频谱最高峰间隔 1 kHz 左右的频率都出现了峰值。

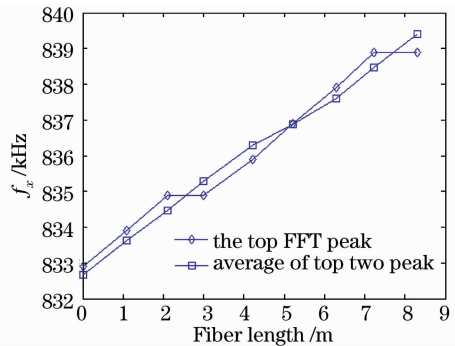


图 8 对 1~8 m 光纤延迟的测试

Fig. 8 Measurement of delay with fiber length from 1 m to 8 m

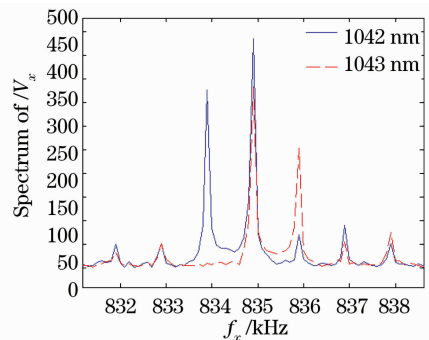


图 9  $V_x$  频谱细节

Fig. 9 Detail of  $V_x$  spectrum

这样现象的原因在于进行 FFT 频谱分析时, 为

为了提高频谱分辨率,分析了 10 ms 的  $V_x$  信号,其中包含 10 个啁啾信号解调周期(如图 10 所示),十个周期波形基本相同,可以近似等效为 1 ms 周期的冲击函数序列与单个周期解调信号的卷积。10 ms 的  $V_x$  信号频谱就为两信号的频谱的乘积。1 ms 周期冲击函数序列的频谱为间隔 1 kHz 的冲击函数序列,两者的乘积冲击函数序列对单个周期的  $V_x$  信号频谱的采样。因此 10 ms 信号 FFT 的结果为对  $V_x$  信号频谱以 1 kHz 间隔采样的结果,即如图 9 的现象。观察 FFT 结果发现 1042 m 与 1043 m 的频谱虽最高峰位置相同,但第二峰的位置有明显差异。

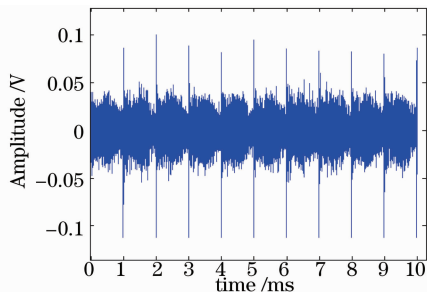


图 10  $V_x$  时域波形

Fig. 10 Waveform of  $V_x$  in temporal domain

因此改进频谱峰值的计算办法,选取频谱最高两点,由这两点的位置按频谱能量加权平均估计真实的频谱峰值位置。按此方法,得到的光纤长度与距离的关系如图 8 所示。从图 8 可以看出改进的方法可以区分所有的光纤长度。

改用同轴电缆对平衡探测器输出的电信号实行延迟,进行更细的分辨力测试。对同轴电缆的测试结果如图 11 所示,测试时依然使用了 1040 m 的光纤作为起始基准,加入的同轴电缆长度为 0.35~3 m。实验结果表明,使用了按能量加权求频谱峰值后,可以分辨 0.15 m 的同轴电缆产生的延迟,对应的时间分辨力为 0.819 ns,但信号频率与延迟

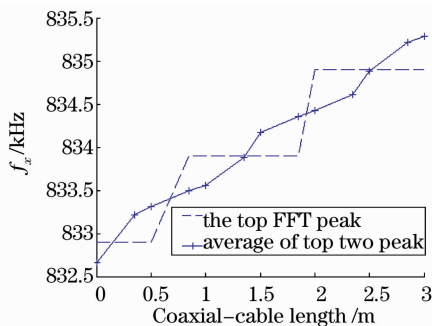


图 11 对 0.35~3 m 同轴电缆延迟的测试

Fig. 11 Measurement of coaxial cable with length from 0.35 m to 3 m

存在一定的非线性。

## 4.2 最小可探测功率测试

实验对系统最小可探测功率进行了简单测试。调节本振光功率为 1 mW,同时使用光纤衰减器调节回波功率到 0.1 nW,此时采集  $f_x$  信号的频谱如图 12 所示。可见此时  $V_x$  信号在频谱上依然可见,且高于噪声 10 dB。因此,在本振功率为 1 mW 时,系统的最小探测灵敏度优于 0.1 nW。

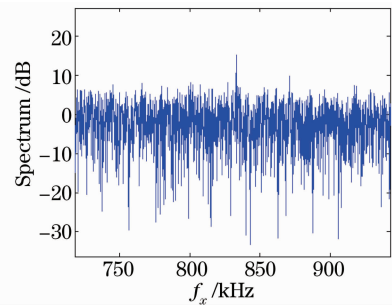


图 12 回波 0.1 nW 时  $V_x$  信号频谱

Fig. 12 Signal spectrum of  $V_x$  when  $P_{in}$  is 0.1 nW

## 5 结 论

基于啁啾调幅的相干探测激光雷达实验系统实现了优于 0.1 nW 的最小可探测功率,在经过简单的信号频谱运算处理后,可以实现小于 1 ns 的时间分辨力。但系统仍然存在一些问题,如对回波延时测量中存在的非线性,调制器与检波器非线性导致  $V_x$  信号中  $f_x$  二次谐波较大的问题。需要对系统进行进一步的测试与优化。

## 参 考 文 献

- Dai Yongjiang. The Principle of Lidar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
- 戴永江. 激光雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- A. Christopher, C. Yanki, K. C. Skeen *et al.*. Development of a 1310-nm, coherent laser radar with RF pulse compression [C]. Proc. 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '00), Honolulu, Hawaii 1784~1786
- Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Chunhui *et al.*. Study on ranging signal of pulse coherent laser radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1081~1083
- 田兆硕, 王 骥, 王春晖 等. 脉冲相干激光雷达测距信号研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1081~1083
- Cai Xiping, Zhao Yuan, Sun Dongsong *et al.*. Research on signal processing for the pulse compressed CO<sub>2</sub> coherent laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(11): 976~980
- 蔡喜平, 赵 远, 孙东松 等. 脉冲压缩 CO<sub>2</sub> 相干激光雷达信号处理的研究 [J]. *中国激光*, 1997, **24**(11): 976~980
- 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

- 6 Wang Chunhui, Wang Qi. Analysis of 1st statistic specialty of CO<sub>2</sub> laser pulse heterodyne detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 276~280  
王春晖, 王 骐. CO<sub>2</sub> 激光脉冲外差探测一阶统计特性分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 276~280
- 7 Wang Chunhui, Wang Qi, Zhao Shumin. Polarization matching on pulsed laser heterodyne signal [J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(2): 80~82  
王春晖, 王 骐, 赵树民. CO<sub>2</sub> 激光脉冲外差信号偏振匹配研究 [J]. 激光与红外, 2002, **32**(2): 80~82
- 8 Nan Jingda, Pi Mingjia, Fan Liming *et al.*. Sensitivity study of the CO<sub>2</sub> laser heterodyne detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(8): 714~720  
南京达, 皮名嘉, 樊立明 等. CO<sub>2</sub> 激光外差探测系统灵敏度的研究 [J]. 光学学报, 1990, **10**(8): 714~720