

# 基于激光后向散射的多激光光束风场位移测量系统

周立敏<sup>1</sup> 蒋亚东<sup>1</sup> 章正宇<sup>2</sup> 陆晓林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>电子科技大学光电信息学院电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)  
<sup>2</sup>中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

**摘要** 针对多激光光束风场位移测量系统中对激光后向散射信号的采集和处理, 设计了具有高速数据采集的多激光光束风场位移测量系统, 并集成了大动态范围内快速变化的低信噪比(SNR)信号的实时接收提取、空间滤波、精密延时和精确波门控制等技术。系统主要由脉冲 YAG 激光器、雪崩光电二极管(APD)探测器、级联增益放大器、模数转换电路、现场可编程门阵列(FPGA)处理芯片及其外围电路、单片机控制系统和数据传输电路等组成, 其中 FPGA 芯片成功地通过仿真, 达到了设计要求。最后进行了实地风场测量实验, 结果表明系统能够有效地检测出风场中不同距离处的散射回波信号, 从而计算出风场的速度并通过分析得到风向。

**关键词** 测量; 风场测量; 激光后向散射; 多激光光束; 高速数据采集; 现场可编程门阵列

中图分类号 O436

OCIS 010.1350 290.5820

文献标识码 A

## Multi-Laser Beam Measuring System for Detection of Wind Field Displacement Based on Backscatter Signals

Zhou Limin<sup>1</sup> Jiang Yadong<sup>1</sup> Zhang Zhengyu<sup>2</sup> Sui Xiaolin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Thin Solid Film and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)  
<sup>2</sup> North China Research Institute of Electric & Optic, Beijing 100015, China)

**Abstract** A high-speed data acquisition and processing system with integrated transceivers is designed to measure and monitor the wind fields at real time, which plays an important role in the multi-laser beam displacement measurement of wind field system. It can also realize the real-time extraction of low signal noise ratio (SNR) signals, which transforms rapidly in a wide dynamic range, spatial filtering, precision delay and accurate gate control technology. This system is mainly composed of YAG pulsed laser, avalanche photo diode (APD) detector, cascaded gain amplifiers, analog-to-digital conversion circuitry, field programmable gate array(FPGA) processing chip and its peripheral circuits, single-chip control systems and data transmission circuit. The experimental verification is also carried out, and the results show that multi-beam displacement measuring system can effectively detect the backscatter signals in various distances, by which we can calculate the wind speed and get the wind direction from data analysis.

**Key words** measurement; wind field measurement; laser backscatter; multi-laser beam; high-speed data acquisition; field programmable gate array

## 1 引言

近年来激光技术在大气测量、环境检测、航天事业、国防建设等领域得到了广泛的应用。其中, 基于激光后向散射的大气风场测量更是受到越来越多的关注<sup>[1~5]</sup>。传统的激光测风雷达是基于激光后向散射光的多

收稿日期: 2010-01-05; 收到修改稿日期: 2010-02-05

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(60721001)和国家自然科学基金重点项目(60736005)资助课题。

作者简介: 周立敏(1969—), 男, 博士研究生, 主要从事多光速激光风速测量技术方面的研究。

E-mail: liminzhou2008@163.com

导师简介: 蒋亚东(1964—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事光电探测器件及其技术方面的研究。

E-mail: jiangyd@uesct.edu.cn(通信联系人)

普勒效应,其测量的物理量是激光频率的变化<sup>[6,7]</sup>,因此对激光器的单色性和频率稳定度有很高的要求<sup>[8,9]</sup>,也对整个光机系统的准直和稳定性提出了较高的要求<sup>[10]</sup>,从而限制了体积小、技术成熟的固体激光器在测风方面的应用。同时,激光后向散射回波的方向和相位是随机变化,使得激光相干性严重退化,降低了系统灵敏度。为克服多普勒激光测风仪中反射回波相位畸变,对激光器的波长、工作模式和频率稳定度要求高等不足,本文基于小扰动理论<sup>[11]</sup>,提出并研制了一种基于激光后向散射的多光束风场位移测量法的激光测风仪。利用激光在大气中传输时气溶胶粒子产生的激光后向散射信号的光学闪烁,通过对采集到的回波信号进行相关计算得到风速。多光束位移激光测风仪测量的是回波信号的强度信息,这样不仅降低了对激光光源和系统的要求,也提高了系统的可靠性。另外,它采用脉冲直接探测方式,单元技术比较成熟,具有很好的实用性和可靠性。

多激光光束风场位移测量系统中所测量的是激光后向散射回波信号,该信号具有短时间内大气风场回波动态范围大,变化速度快,且信号信噪比较低的特点。因此,我们针对性地设计了高速数据采集系统,并集成了大动态范围内快速变化的低信噪比信号的实时接收提取、空间滤波、精密延时和精确波门控制等技术。

## 2 系统设计

多光束风场位移测风仪是通过测量气溶胶粒子的运动对激光后向散射强度产生的扰动来测量风速。激光光源为脉冲 YAG 激光器,工作波长为 1064 nm,输出能量为 200 mJ,激光脉宽为 10 ns,重复频率稳定在 20 Hz。激光器向大气垂直发射激光,经分束器后分成等间距约为 1 m 的多束激光分别在大气中传输,且激光的发散角约为 2 mrad。接收器 1 和 2 分别接收多束激光在大气中后向散射产生的回波信号。接收器之间的间距约为 1 m。由于风场使得气溶胶粒子随之运动,激光束的后向散射回波信号强度也产生扰动<sup>[12,13]</sup>,因此,接收器在不同时刻接收到的信号就反映了在某一时刻微粒的空间分布情况<sup>[14,15]</sup>。

### 2.1 回波信号预处理

由于经过大气散射的激光回波信号强度较弱,所以探测到的回波信号首先要经过信号放大电路。本系统采用低噪声、宽带宽、可变增益放大器芯片和雪崩光电二极管(APD)探测器 C30590E,构成弱信号可编程放大电路。在 90 M 带宽条件下,经精心设计调试,放大器增益最高变化速度可达 42.14 dB/s,输入噪声谱密度仅为 1.3 nV/Hz<sup>1/2</sup>,可同时实现对近处强大气后向散射回波和远场低信噪比的弱大气后向散射回波的有效放大。系统研制中采用了对数增益放大器的级联方案,如图 1(a)所示。图中 A1 和 A2 为 AD603 放大器,其内部主要由被动式精密衰减器和固定增益放大器两部分组成。被动式精密衰减器主要包括增益控制界面、AD603 和 R-2R 梯形网络。可变衰减器的衰减范围为 -42.14~0 dB,并由电压控制端口 GPOS 和 GNEG 之间的电压差  $V_G$  决定。单个对数放大器的增益计算公式为

$$G = 40 V_G + 11.07, \quad -0.5 \text{ V} \leq V_G \leq 0.5 \text{ V}. \quad (1)$$

总的级联增益与控制电压  $V_C$  的关系可参见图 1(b)。当  $V_C = 1.0 \text{ V}$  时,两级放大器的级联增益为 20 dB;当  $V_C = 2 \text{ V}$  时最大的级联增益为 62.14 dB。

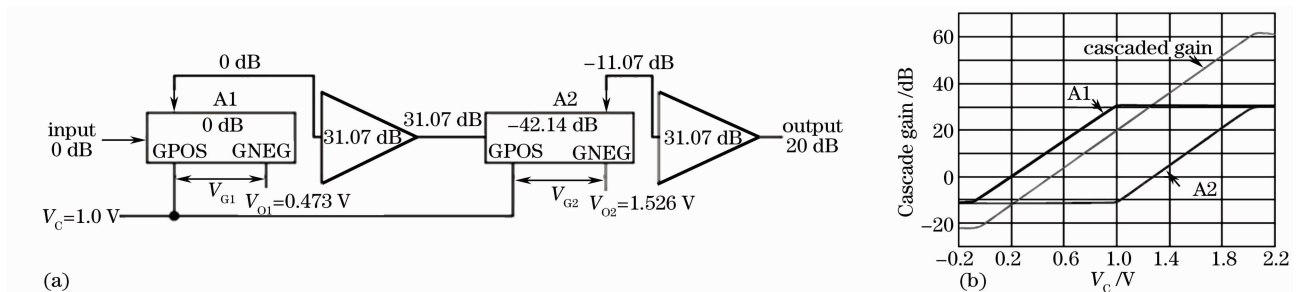


图 1 (a)AD603 对数增益放大器的级联电路原理图; (b)级联增益与控制电压  $V_C$  的关系

Fig.1 (a)Serried circuit based on AD603 logarithmic gain amplifier; (b)cascaded gain versus control voltage  $V_C$

### 2.2 高速数据采集系统

高速数据采集系统主要由模数(A/D)转换芯片 ADC08200,现场可编程门阵列(FPGA)芯片

EP2C8Q208C8 及其外围电路和 C8051F120 单片机系统控制、数据传输电路等组成,如图 2 所示。当大气后向散射信号被 APD 探测器接收后,经过放大和滤波后输入到 FPGA 中,进行数据读写和缓存,再通过模数转换芯片,将模拟信号转换为数字信号。同时,由于模数转换芯片是由激光脉冲触发,还负责分离不同距离上的数据。最后,数据通过单片机串口转发给计算机进行数据处理和波形显示,并接收计算机命令来实现对数据采集系统的控制。图 2 中激光主波触发信号(trig)由前端激光发射系统产生,在脉冲激光发射的同时,由光电二极管采样激光主波,将该信号送给 FPGA 作为数据采集触发。FPGA 在收到触发脉冲信号后,产生 FIFO 写使能信号,前级两个 FIFO 开始写入数据,同时后级双口 RAM 开始转存 FIFO 中的数据。达到一定数目时,向外部单片机发出中断请求,单片机响应中断后把采样数据读出并转发给上位机 ADC08200 负责把模拟信号快速转换成后续电路能够处理的数字信号。工作时其采样时钟由 FPGA 内部锁相环通过对外部有源晶振产生的 100 MHz 时钟进行 2 倍频后得到<sup>[16]</sup>。为提高模块的可移植性,将锁相环、前级 FIFO 和后级双口 RAM 及读写控制电路等分散电路模块利用 FPGA 技术集中起来,作为一个独立的功能模块,如图 2 虚线框所示进行系统设计和仿真调试。

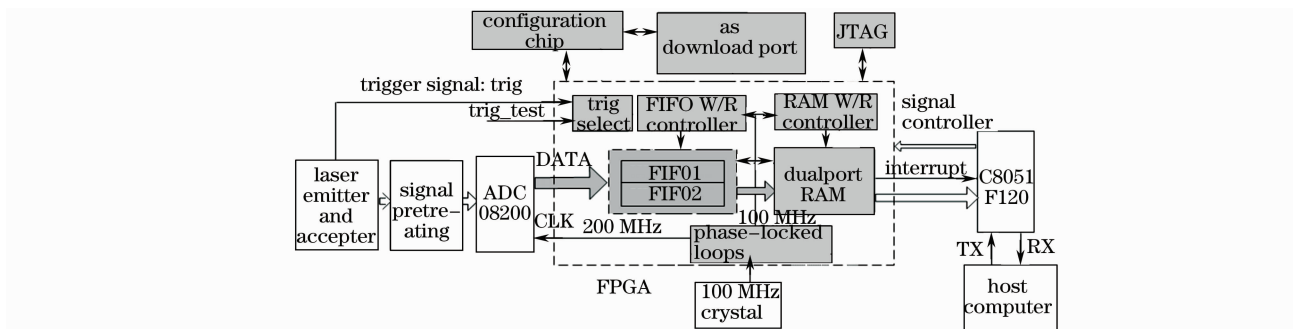


图 2 高速数据采集系统总体设计方案

Fig. 2 Design program of high-speed data acquisition system

首先 A/D 转换电路作为高速数据采集系统中的关键组成部分,对信号进行 A/D 转换;同时,由于 A/D 转换电路由激光脉冲触发,因此负责分离不同距离上的数据。根据激光测风装置的工作参数确定数据采集系统的采样频率为 200 MHz,采样数据量为 200 点,因此选用了采样率高达 200 Ms/s 的模数转换器件 ADC08200。其次,对于基于 FPGA 的缓存及控制电路而言,本系统采用了 Altera 公司的 Cyclone-II 系列 FPGA“EP2C8Q208C8”,开发环境为 Quartus II 6.1。本设计中 FPGA 主要包括 PLL(锁相环)时钟管理模块、前级 FIFO 缓存模块、后级双口 RAM 存储模块以及 FIFO 和 RAM 的读写控制模块。其中,PLL 时钟管理模块可以很方便地通过 MegaWizard 调用 ALTPLL 模块生成。对高速数据流,如果直接采用 FIFO 或 RAM 进行缓存,将对时序电路的实现造成很大困难。因此,采用了分时采集的方法,通过分别给两个前级 FIFO 提供相位相反的 100 MHz 写时钟,分时写入 A/D 转换的数据,从而达到高速缓存的目的。前级 FIFO 控制模块由触发选择模块、写数据控制和读数据控制 3 个子模块组成。触发选择模块相当于选通开关,可用单片机控制系统模拟产生的触发脉冲信号,来测试前期数据采集系统是否正常工作。读数据控制模块基本与写数据控制模块相同,当 FIFO 中有数据时使 FIFO 读使能信号有效,这样对 FIFO 的写数和读数可以同时进行。后级双口 RAM 的作用是实时存储从 FIFO 中读出的数据,以方便外部的控制器(单片机)异步读取数据。

### 2.3 单片机电路

单片机电路是高速数据采集系统的控制核心。设计中选用的微控制器是 Silicon Laboratories 公司生产的 C8051Fxxx 系列单片机的 C8051F120 芯片。C8051F120 采用 3.3 V 电压供电,系统时钟 88.4376 MHz。信号线用于对 FPGA 内部模块工作状态的控制,数据总线接口完成数据从 FPGA 读出到单片机。接插件 JTAG2 为单片机的 JTAG 接口,通过仿真适配器 M-EC5 与计算机连接,用于下载编译好的程序和进行系统调试。数据的传输主要通过单片机串口来完成。

### 2.4 综合仿真

在 Altera 公司的开发环境 Quartus II 6.1 中成功地对高速数据采集系统中的 FPGA 进行了综合和仿真,其

时序仿真如图 3 所示。图中 CLKA 和 CLKB 为 FPGA 内部 PLL 模块产生的两个相位相反的 100 MHz 时钟信号,作为两个 FIFO 模块的写时钟信号。CLKA 还是两个 FIFO 的读时钟信号。ADC\_DATA 表示 A/D 转换器的输出,其总线数据速率为 200 MHz。ALLCLR 为两个 FIFO 的异步清零输入信号以及全局清零信号,高电平有效。TRIG 为 FIFO 写控制触发信号,仿真时采用单片机控制系统模拟产生。OUTINT 为高电平时通知外部控制单元读取 RAM 中数据。OUTDATA 表示后级双口 RAM 的输出数据。从图 3 中可以看出,在外部使能信号 EXRDEN 和读数时钟仿真信号 EXRDCLK 下,双口 RAM 中的输出数据与预设结果完全吻合,表明 FPGA 达到了设计要求,实现了对高速数据流的缓存和传输控制。

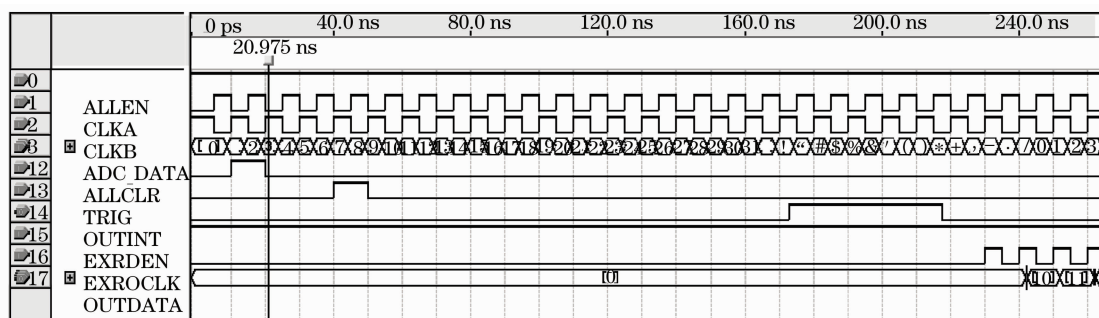


图 3 FPGA 缓存时序仿真图

Fig. 3 Timing simulation diagram of FPGA cache

### 3 风场检测与风速计算

为检测系统的可行性,对风场位移测量系统进行实地风场测量。经多次采集后,探测器 1 得到的多次回波信号电压和激光脉冲数、采样点数的三维图,如图 4 所示。激光脉冲数代表了不同时刻,采样点数与测量距离成正比,回波信号强度也与回波信号电压成正比。该回波信号的空间分布包含大气成分水平运动速度的信息。通过数字采样电路可以提取出不同距离下的散射回波信号。另外,使用光学互相关法<sup>[17]</sup>可以计算探测器 1 和 2 的合成波形的自协方差和互协方差值,并使用峰值延时法可以很好地计算和识别一定高度处的风速和风向。由此,我们给出了距离光源 100 m 处的散射回波信号的自相关和互相关函数曲线,如图 5 所示。根据峰值延时法可以得到 100 m 处的风速  $v_p = D/\tau_p$ ,其中  $\tau_p$  为自相关和互相关曲线的延时量, $D$  为探测器 1 和 2 之间的间距 1 m。图 5 中延时为 1.05 s,因此风速为 0.96 m/s。同时,风由探测器 1 向探测器 2 运动。另外,还使用风速计测量了实际的风速,并将其作为风场位移测量系统的计算风速的参照,标定风速为 0.92 m/s。实验结果表明,本系统能够有效地采集不同距离处的风场的后向散射回波信号,通过计算机软件分析后得到风速和风向。

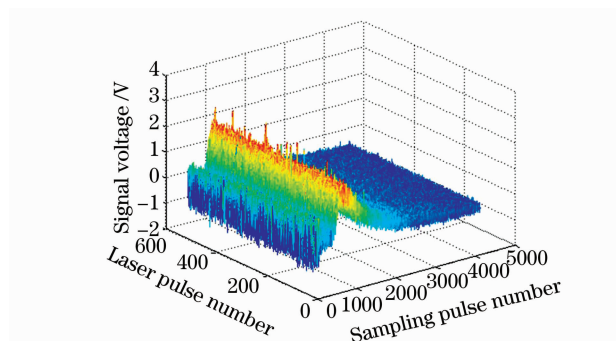


图 4 不同距离和激光脉冲的散射回波信号图

Fig. 4 Received backscatter signal density versus distance and laser pulses of detector

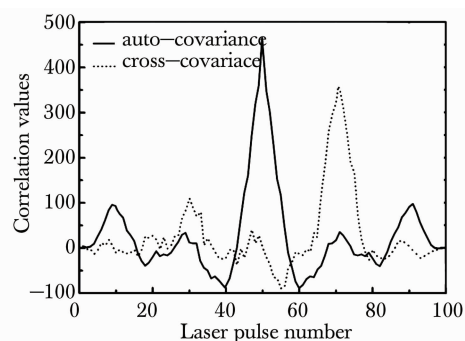


图 5 100 m 处自协方差和互协方差曲线

Fig. 5 Auto-covariance and cross-covariance curves from 100 m away

## 4 结 论

基于小扰动理论,设计并实现了基于激光后向散射的多光束风场位移测风仪,通过两个探测器对短时间内气溶胶粒子后向散射产生的回波信号进行测量,并对回波信号进行采集和相关分析得到风速和风向。该系统主要由脉冲 YAG 激光器,APD 探测器 C30590E,AD603 级联增益放大器、模数转换芯片 ADC08200, FPGA 芯片 EP2C8Q208C8 和 C8051F120 单片机系统控制等组成。由于该系统探测的是激光后向散射强度的变化,对激光源要求较低,同时系统结构简单,具有很好的实用性和可靠性,适于工程应用。同时实地风场测量的结果表明多光束风场位移测风仪成功地实现了对不同距离的风速和风向的准确测量。

## 参 考 文 献

- 1 R. M. Hardesty, C. J. Senff, R. M. Banta *et al.*. Lidar applications in regional air quality studies[J]. *IEEE*, 2001, **3**: 1029~1031
- 2 Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Development of Doppler wind lidar[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 161~168  
周小林, 孙东松, 钟志庆 等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(3): 161~168
- 3 R. Milton, R. M. Huffaker, R. Michael *et al.*. Remote sensing velocities using coherent laser of atmospheric wind solid-state and CO<sub>2</sub> systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, **84**(2): 81~204
- 4 Sun Dongsong, Yang Zhao, Fang Jiangxing. Technique of wind velocity measurement with a fizeau interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 943~946  
孙东松, 杨 昭, 方建兴. 基于 Fizeau 干涉仪的激光风速测量技术[J]. 中国激光, 2003, **30**(10): 943~946
- 5 Jack A. McKay, David J. Rees. Design of a direct-detection Doppler wind lidar for spaceflight[C]. *SPIE*, 1998, **3494**: 250~258
- 6 Hu Shaoxing, Zhang Aiwu, Liu Haiyun *et al.*. Designing and developing a 360° continuous scanning portable 3D lidar system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 168~171  
胡少兴, 张爱武, 刘海云 等. 360°连续扫描的便携式三维激光雷达设计与开发[J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 168~171
- 7 Jin Chenfei, Zhao Yuan, Zhang Yong *et al.*. Experimental research on a scannerless 3D imaging laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1383~1387  
靳辰飞, 赵 远, 张 勇 等. 一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1383~1387
- 8 J. M. Matthew, R. S. Wilbert, D. I. Todd. Incoherent Doppler lidar for continuous measurement of wind and aerosol profiles[J]. *IEEE*, 1994, **2**: 934~936
- 9 K. D. Deepak, S. Veerabuthiran, J. P. Dudeja *et al.*. Optimization of Doppler lidar system parameters for the measurement of atmospheric wind speed[J]. *SPIE*, 2006, 6409: 640901
- 10 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568  
周 煜, 许 楠, 栾 竹 等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 566~568
- 11 R. S. Lawrence, G. R. Ochs, S. F. Clifford. Use of scintillations to measure average wind across a light beam[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(2): 239~243
- 12 M. J. Post. Experimental measurements of atmospheric aerosol inhomogeneities[J]. *Opt. Lett.*, 1978, **6**(2): 166~168
- 13 Liu Kexiang, Xu Rongguo, Wu Zhensng *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
- 14 Yang Rui, Zheng Jie, Wan Min *et al.*. Measurement method of laser scattering[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s): 353~356  
杨 锐, 郑 捷, 万 敏 等. 激光散射特性测量[J]. 中国激光, 2006, **33**(s): 353~356
- 15 Wu Jian, Yang Chunping, Liu Jianbin. Theory of Optical Transmission in The Atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005  
吴 健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005
- 16 Yu Xuan, Zhao Yunbo. High speed data acquisition based on FPGA[J]. *Modern Electronics Technique*, 2007, **30**(5): 145~151  
于 暄, 肇云波. 基于 FPGA 高速数据采集的解的解决方案[J]. 现代电子技术, 2007, **30**(5): 145~151
- 17 Ting-i Wang, G. R. Ochs, R. S. Lawrence. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(23): 4073~4081