

相干测风激光雷达中多核 DSP 并行风速反演算法的实现

贾晓东¹, 孙东松¹, 谢绍亮², 吴小锋²

- (1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
2. 江西省智成测控技术研究所有限责任公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 针对高重复频率相干测风激光雷达中风速反演时数据量大、计算量大、实时性要求高等问题提出了基于多核数字信号处理器(DSP)的并行风速反演算法。该算法的核心思想是,利用高速数据处理板卡 DSPC-8681 上的 4 颗 8 核 DSP 处理器采用单指令多数据流的方式进行并行计算和同步,使用最大似然离散谱峰值计算出视向风速。在激光脉冲重复频率为 10 kHz 的条件下实现了相干测风激光雷达中实时的风速反演。通过实验验证,激光雷达的视向探测距离达到 3 600 m,距离分辨率为 60 m,风速测量范围为 ± 30 m/s,时间分辨率为 1 s,转动圆盘校准的速度测量精度优于 0.48 m/s。

关键词: 相干测风激光雷达; 并行风速反演算法; 多核 DSP; 最大似然离散谱峰值

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0906007

Implement of parallel retrieval algorithm for wind velocity based on multicore DSP in coherent wind lidar

Jia Xiaodong¹, Sun Dongsong¹, Xie Shaoliang², Wu Xiaofeng²

- (1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Jiangxi Zhicheng Test & Control Technology Institute Co. Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to solve the problems of huge volume backscattering signal data and time-consuming calculations when retrieving wind velocity in high repetition frequency coherent lidar, a parallel retrieval algorithm based on multicore Digital Signal Processor (DSP) was proposed. In this algorithm, a high performance DSPC-8681 card integrating four Texas Instruments (TI) TMS320C6678 processor with eight cores in each processor was employed. The digital data from Analog-to-Digital Convertor (ADC) was allocated equally to each core in each processor and processed in Single Instruction Multiply Data(SIMD) way. The wind velocity was retrieved by maximum likelihood discrete spectrum peak estimation. On the condition of 10 000 pulses accumulation, the time resolution of 1 s was realized. The performances of the developed coherent wind lidar are demonstrated by experiments, which are listed as follow: detection range in line of sight is 3 600 m; range resolution is 60 m; velocity range is ± 30 m/s; time resolution is 1 s; velocity accuracy by rotating hard target is better than 0.48 m/s.

Key words: coherent wind lidar; parallel retrieval algorithm for wind velocity; multicore DSP; maximum likelihood discrete spectrum peak

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(41174130, 41227804)

作者简介: 贾晓东(1983-), 男, 博士后, 主要从事相干探测方面的研究。Email: phydong@163.com

0 引言

由于脉冲相干测风激光雷达具有高精度、高时空分辨率的特点,在边界层大气风廓线测量^[1]、风切变预警^[2-3]、飞机尾流探测^[4-5]和风能资源利用^[6]方面起着重要的应用。日本 Mitsubshi、法国 Leosphere、美国 CTI 等公司已开发出商用的相干测风激光雷达产品^[7-9]。国内的一些科研单位,如中国科学院上海光学精密机械研究所、中国电子科技集团第二十七研究所、中国海洋大学和中国科学技术大学等,也有相干测风激光雷达系统的报道^[1,6,10-11]。

在相干测风激光雷达中,从气溶胶粒子的后向散射回波信号中实时反演出风速是一个关键的问题。常用的风速反演方法是最大似然离散谱峰值算法^[12-13],即风速引起的多普勒频率的最大似然解就是回波信号频谱系数的最大值对应的频率。这需要把回波信号数据按照距离门分段并在每个距离门内计算频谱。频谱的计算方法一般是使用周期图法,利用离散傅里叶变换的快速算法(FFT)计算。当发射高重复频率的激光脉冲时,回波信号的数据量和反演风速的计算量是研制相干测风激光雷达系统的一个难点,也是实现实时风速反演的一个重要因素。目前相干测风激光雷达中实现实时风速反演的手段有:使用专用集成电路——现场可编程门阵列(FPGA)^[7,14]和多颗单核数字信号处理器(DSP)^[15]。随着半导体技

术的发展,将多个 DSP 处理内核通过集成的方式提升芯片的处理性能,成为高性能 DSP 器件发展的趋势。ADI、Freescale 和 TI 等公司分别推出了多核 DSP 芯片。在相干测风激光雷达中,使用多核 DSP 芯片计算周期图反演风速不仅可以达到实时计算的目的,同时还可以降低成本、功耗和尺寸,提高激光雷达系统的集成度。因此,文中提出了基于多核 DSP 的并行风速反演方法,实现了实时的风速测量。

1 系统介绍

1.1 系统组成

研制的相干测风激光雷达的系统组成如图 1 所示。由光纤激光器、偏振分束器和 $\lambda/4$ 波片构成的光学收发开关、扩束望远镜、耦合透镜、保偏光纤耦合/分束器、平衡光电探测器、高速模/数转换数据采集卡、高速数据处理卡、工业控制计算机(简称“工控机”)以及信号发生器等构成。在信号发生器的驱动下,光纤激光器发射出的激光脉冲经过光学收/发开关和扩束望远镜后发射到大气中。气溶胶粒子的后向散射信号通过扩束望远镜和光学收/发开关后到达耦合透镜处耦合进入光纤,与光纤激光器输出的本振光拍频后按 50/50 分束后,进入平衡光电探测器进行光电转换,产生的射频电信号由 A/D 采集卡进行数字化,然后传输到多核 DSP 内进行并行的风速反演计算出风速。

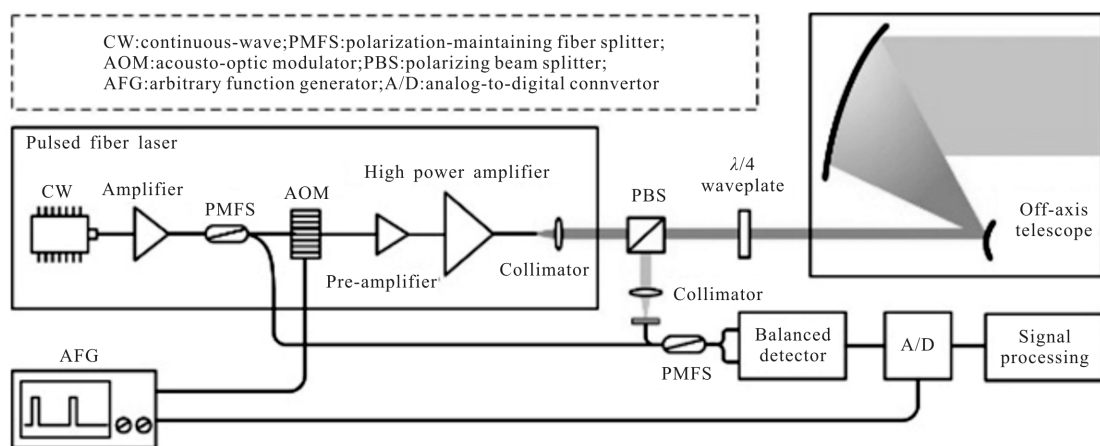


图 1 相干测风激光雷达系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the developed coherent wind lidar system

1.2 系统参数

相干测风激光雷达中使用器件的参数如表 1 所示,表中 CMRR 为共模抑制比。激光器为全光纤结构,采用主振荡器功率放大器(MOPA)结构,经过功率放大后激光脉冲的峰值功率达到 300 W。为了避免光纤中的受激布里渊散射(SBS)^[4,16]等非线性效应限制激光功率的输出和损坏光纤器件,输出光纤采用模场直径为 25 μm 大模场(LMA)保偏光纤,并且使用准直器将激光脉冲输出。

表 1 相干测风激光雷达的主要技术参数

Tab.1 Parameters in coherent wind lidar

Item	Parameter	Value	
Pulsed fiber laser	Wavelength/nm	1 547	
	Energy/μJ	120	
	Pulse repetition frequency/kHz	10	
	Pulse width/ns	400	
	Peak power/W	300	
	Linewidth/kHz	5	
	Beam diameter/mm	3.78	
	Responsivity at 1547nm/A·W ⁻¹	1.0	
	Balanced photodetector	3 dB bandwidth/MHz	350
		CMRR/dB	25
Transimpedance gain/V·A ⁻¹		10 ⁴	
Telescope	Expanding ratio	14	
	Effective aperture/mm	64.3	
	Truncation ratio	0.823	
	Resolution/bit	12	
A/D converter	Sampling rate/MS·s ⁻¹	500	
	3 dB bandwidth/MHz	250	
	DSP number	4	
DSP card	Core number per DSP	8	
	DSP type	TMS320C6678	

2 并行风速反演算法

2.1 DSP 板卡介绍

为了达到实时风速测量的目的,研制的相干测风激光雷达中使用了研华公司生产的半长结构、PCIe 接口、型号为 DSPC-8681 高速数据处理 DSP 板卡。DSP 板卡的结构和外观分别如图 2(a)、2(b)所示

示,板上载有 4 颗德州仪器公司(TI)的 8 核 DSP 处理 TMS320C6678 (以下简称 C6678),单颗 C6678 处理器计算 1024 点单精度浮点 FFT 的时间为 0.86 μs,如果使用 4 颗 C6678 同时计算,则计算时间会下降为原来的 1/4,即 0.22 μs。每颗 DSP 芯片通过 2 信道的 PCIe (即 PCIe ×2) 接口使得数据的吞吐量可达 10 Gbps。在激光脉冲重复频率为 10 kHz 和探测距离分辨率为 60 m 的条件下,通过周期图法实时风速反演时探测距离可以达到 6 km。

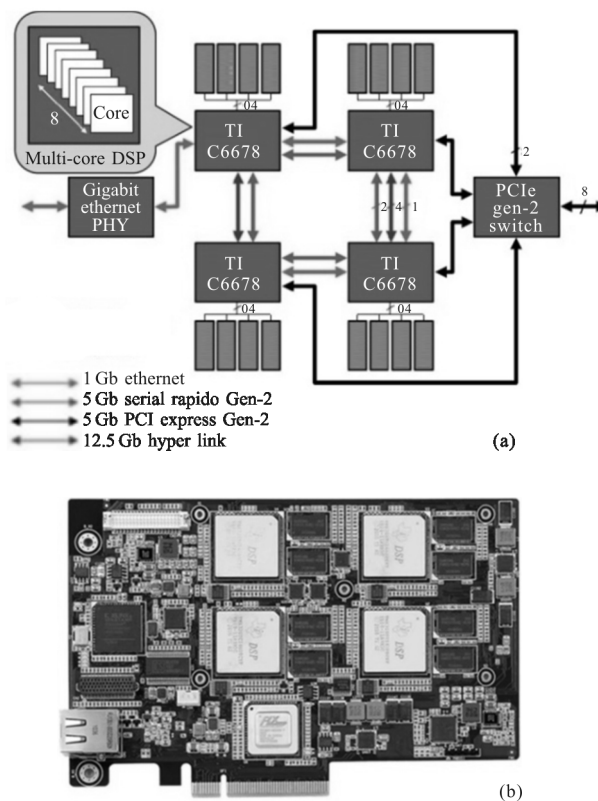


图 2 DSP 板卡

Fig.2 DSP Card

2.2 风速反演算法

从气溶胶粒子后向散射信号的频谱中反演风速使用的算法是最大似然离散谱峰值,频谱的计算是使用周期图法。在一个探测距离门内 M 个采样点数据的周期图定义为^[17-18]:

$$P(m) = \frac{T_s}{M} \left| \sum_{k=0}^{M-1} z_k \exp\left(-\frac{j2\pi km}{M}\right) \right|^2, m=0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$; T_s 为采样间隔; z_k 为数据采样卡输出的数据序列; k 为数据的序号。为了提高相干测风激

光雷达系统的信噪比, 通常使用多发激光脉冲回波信号的非相干累积。 N 发激光脉冲累积时周期图的平均为:

$$P_A(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(m) \quad (2)$$

因此, 风速引起的多普勒频移的最大似然离散谱峰值估计 \hat{f}_d 应为:

$$\hat{f}_d = (\operatorname{argmax}_{m=0,1,\dots,M-1} P_A(m)) \cdot \Delta f \quad (3)$$

式中: $\Delta f = 1/MT_s$ 为频率分辨率。因此, 径向风速的最大似然离散谱峰值估计应为:

$$\hat{v} = \lambda \hat{f}_d / 2 \quad (4)$$

式中: λ 为激光的中心波长。

2.3 并行风速反演算法的实现

由于 DSPC-8681 载有 4 颗 C6678 DSP, 这 4 颗 DSP 的 ID 是通过通用输入输出(GPIO)引脚 1 和 2 标识出, 如表 2 所示, 分别为 DSP[0]、DSP[1]、DSP[2] 和 DSP[3]。每颗 DSP 内部的 8 个内核分别标识为 CORE[0], CORE[1], …, CORE[7]。

表 2 DSP 的 ID 标识

Tab.2 IDs of DSP

	GPIO 1	GPIO 2
DSP[0]	0	0
DSP[1]	0	1
DSP[2]	1	0
DSP[3]	1	1

为了在相干测风激光雷达中实现实时的风速反演, 设计了基于 DSPC-8681 板卡的并行风速反演算法, 该算法的流程图如图 3 所示。计算机主机根据数据采集卡输出的射频信号电压数据的序号(record_index) 依次将数据分别发送给不同 ID 的 DSP(dsp_id)——DSP[0]、DSP[1]、DSP[2] 和 DSP[3]。DSP 接收到电压数据后, 首先按照距离门对电压数据分段。对每个距离门内的电压数据进行周期图计算和累积。对于每颗 DSP 内的 8 个内核分配不同距离门内的电压数据, 执行相同的频谱计算代码并进行累积。频谱累积达到预先设计的激光脉冲累积发数(N_PULSE_ACC)后, 每颗 DSP 将周期图累积的结

果再返回到计算机主机。计算机主机将 4 颗 DSP 返回的周期图累加, 使用最大似然离散谱峰值算法反演出各个距离门内的风速。

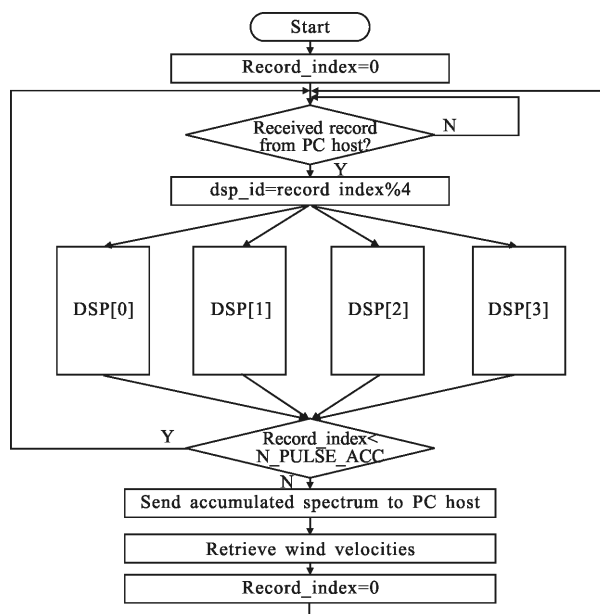


图 3 并行风速反演算法的流程图

Fig.3 Flow chart of parallel wind retrieval algorithm

每颗 DSP 内的 8 个内核计算周期图的详细流程如图 4 所示, 由于 8 个内核从内存中读取的数据不同而执行的代码完全相同, 因此这里只给出一个内核的计算流程。当一发激光脉冲的回波信号的电压数据到达 DSP 之后, DSP 的每个核在计算周期图之前, 首先对该发激光脉冲数据的循环序号(round_index)和距离门号(range_gate)初始化为零, 执行周期图法计算的距离门号为循环序号与 DSP 的内核 ID 号(core_id)之和。通过对数据循环序号的循环累加完成各个距离门内周期图的计算和累积。高速采集卡采集的数据分为 100 个距离门, 但在计算周期图和累积时是由每颗 DSP 处理器的 8 个内核完成。为了简化程序设计, 计算周期图和累积的距离门设定为 8 倍数。因此, 在实际计算时距离门设定为 96 个, 对应的最大探测距离为 5.76 km。

由上文论述可知, 并行风速反演算法在 DSPC-8681 上的实现归结为以下两层含义: (1) 计算机主机将回波信号的电压数据依次分别分配给 DSPC-8681 上载有的 4 颗 DSP, 由这 4 颗 DSP 独立处理; (2) 对于每颗 DSP, 每发激光脉冲的回波信号的电压数据按

照距离门顺序分配给 DPS 的 8 个内核进行周期图的计算和累积,这 8 个内核执行相同的代码但处理不同的数据,这种实现方式被称为单指令多数据流 (SIMD),是并行计算中常用的一种方式。

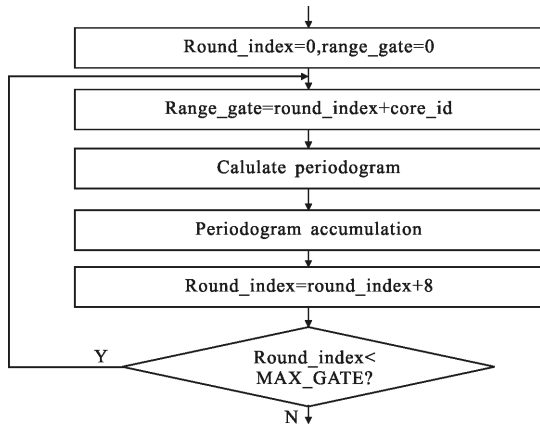


图 4 DSP 的 8 个内核计算周期图和累积的流程图

Fig.4 Flow chart of periodogram calculation and accumulation of 8 cores in each DSP

3 实验结果

3.1 单个距离门

在 10 000 发激光脉冲累积、距离分辨率为 60 m 的条件下,单个距离门内气溶胶粒子的后向散射信号的归一化频谱如图 5 所示。从图中可以看出,随着距离的增加回波信号的强度逐渐减弱。在 3 600 m 处,系统的宽带载噪比为 -28 dB,根据理想计算和仿真,风速测量的精度优于 0.22 m/s。在 ±30 m/s 的风速测量范围内,激光雷达系统的转动圆盘实验测量的精度优于 0.48 m/s。

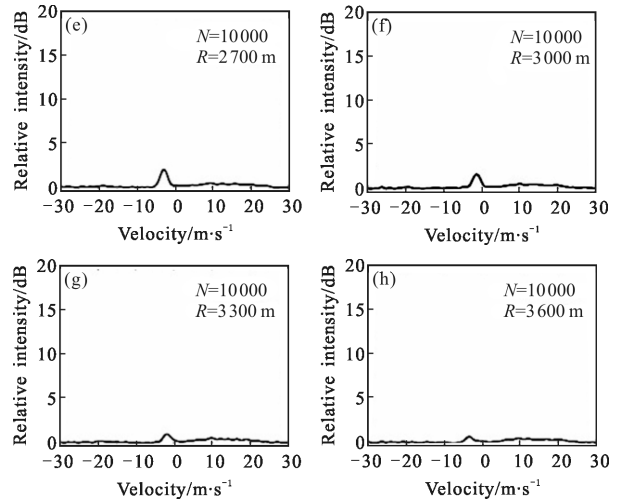
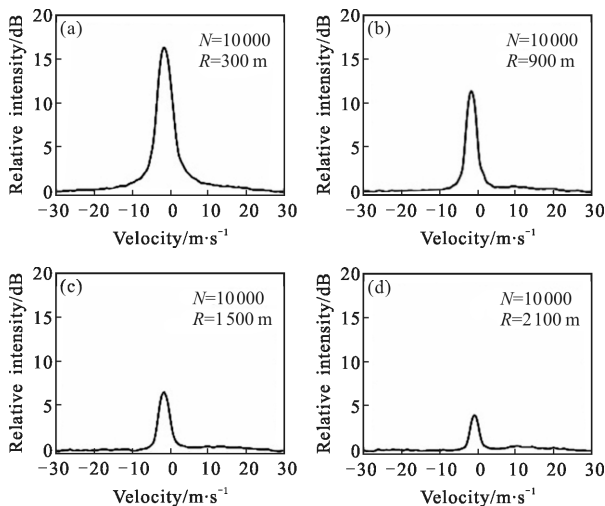


图 5 回波信号的归一化频谱

Fig.5 Normalized spectrums of backscattering signals

3.2 实时连续观测

在 DSPC-8681 板卡上应用并行的风速反演算法,应用于相干测风激光雷达系统中实现了实时的风速观测,并在计算机上开发了图形用户界面程序显示实时测量风速数据。在 10 000 发激光脉冲累积、距离分辨率为 60 m 的条件下,用户界面实时显示出探测范围内的视向风速如图 6 所示。风速数据更新

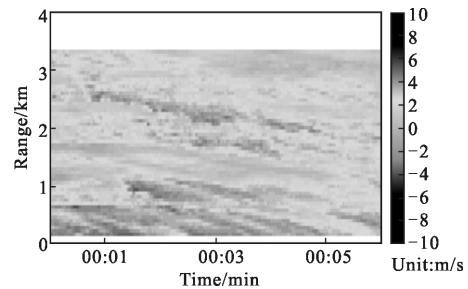


图 6 实时风速观测

Fig.6 Wind measurement in real time

时间为 1 s,界面上只显示出 120~3 360 m 内的风速数据。图形界面上显示出最新的 0~6 min 内的测量风速数据,在显示时若测量风速数据小于 6 min 则显示代表测量风速数据的伪彩色图向右连续推进,当测量风速数据大于 6 min 时则代表测量风速数据的伪彩色图显示满屏,伪彩色图向左移动,最新的测量风速数据显示在最右侧。

4 结论

针对相干测风激光雷达中风速反演的数据量和

计算量大等问题,文中提出了基于多核 DSP 的并行风速反演算法,并在相干测风激光中实现了实时的风速观测。具体的实施方案为,利用 DSPC-8681 板卡上的 4 颗 8 核 DSP 并行协作的方法,完成相干测风激光雷达的风速反演算法。算法执行时,计算机主机依次将气溶胶粒子回波信号的电压数据分别分配给每个处理器。同时,对于每个处理器,回波信号的电压数据按照距离门分成若干段平均分配给处理器内的每个处理内核,利用周期图计算频谱和数据同步。等待所有处理器的所有处理内核完成频谱计算和频谱累积后,将数据返回到计算机主机。计算机主机完成所有处理器的频谱的后累积,并且使用最大似然离散谱峰值算法计算出风速,完成视向风速的反演。将该并行风速反演算法应用于研制的相干测风激光雷达。通过实验验证,激光雷达的视向探测距离达到 3 600 m,距离分辨率为 60 m,风速测量范围为 ± 30 m/s,时间分辨率为 1 s,转动圆盘校准的速度测量精度优于 0.48 m/s。

参考文献:

- [1] Diao Weifeng, Zhang Xin, Liu Jiqiao, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [2] Targ R, Kavaya M J, Huffaker R M, et al. Coherent lidar airborne windshear sensor: performance evaluation [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 2013-2026.
- [3] Targ R, Steakley B C, Hawley J G, et al. Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 μm [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(36): 7117-7127.
- [4] Agnes Dolfi-Bouteyre, Guillaume Canat, Matthieu Valla, et al. Pulsed 1.5- μm LiDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 441-450.
- [5] Huffaker R M, Jelalian A V, Thomson J A L. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(3): 322-325.
- [6] Wu Songhua, Yin Jiaping, Liu Bingyi, et al. Characterization of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar [C]//SPIE, 2014, 9262: 2069566.
- [7] Kameyama S, Ando T, Asaka K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [8] Cariou J P, Boquet M, Lolli S, et al. Validation of the new long range 1.5 μm wind lidar WLS70 for atmospheric dynamics studies[C]//SPIE, 2009, 7479: 830292.
- [9] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state laser [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 4-15.
- [10] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720-1724. (in Chinese)
- [11] Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, et al. Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301001. (in Chinese)
- [12] Rye B J, Michael Hardesty R. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I: spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 16-27.
- [13] Rye B J, Michael Hardesty R. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. II: correlogram accumulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 28-35.
- [14] Ando T, Kameyama S, Hirano Y. All-fiber coherent Doppler LiDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation [C]//14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing, 2008, 1(1): 012011.
- [15] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, et al. High-energy 2 μm Doppler lidar for wind measurements [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 116201.
- [16] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): 63-92.
- [17] Jia Xiaodong, Sun Dongsong. Maximum likelihood discrete spectral peak estimation in coherent wind lidar and Monte Carlo simulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061013. (in Chinese)
- [18] Oppenheim A V, Schafer R W, Buck J R. Discrete-time Signal Processing 2nd Edition [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998: 731-738.