

# 飞机尾涡相干激光探测系统设计与性能分析

徐世龙<sup>1,2</sup> 胡以华<sup>1,2</sup> 郭力仁<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037

<sup>2</sup>电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 为保证飞行安全,并尽可能地提高机场跑道容量,对飞机尾涡相干激光探测系统进行了设计。从飞机尾涡激光探测的总体要求出发,提出相干激光探测系统结构,同时针对激光光源参数以及平衡探测光路结构进行设计,给出整个系统的设计参数。通过对所设计系统的探测信噪比以及测速精度的仿真分析表明,所设计的飞机尾涡相干激光探测系统能够满足尾涡探测的需求,当脉冲能量达到25 mJ以上时,雷达在探测距离7 km内的探测信噪比大于3 dB;在2 km内测速精度优于0.2 m/s。

**关键词** 飞机尾涡;激光雷达;相干探测;飞行安全;跑道容量

中图分类号 V328.3 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081202

## Design and Performance Analysis of Aircraft Wake Vortex Coherent Laser Detection System

Xu Shilong<sup>1,2</sup> Hu Yihua<sup>1,2</sup> Guo Liren<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),  
Hefei, Anhui 230037, China

<sup>2</sup>Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** In order to ensure flight safety and to improve the capability of the airport runway as far as possible, an aircraft wake vortex coherent laser detection system is designed. Begin with the requirements of wake vortex laser detection, the structure of the system is proposed. The parameters of the laser source and the optical path of the double balance detection are designed at the same time. The performance simulation proves that this detection system can meet the detection requirements. When the output energy is higher than 25 mJ, the detection signal-to-noise-ratio (SNR) can be up to 3 dB at the distance of 7 km and the detection accuracy is better than 0.2 m/s within 2 km.

**Key words** aircraft wake vortex; laser detection and ranging (lidar); coherent detection; flight safety; runway capacity

**OCIS codes** 120.1880; 040.1880

## 1 引言

众所周知,飞行中的飞机会对周围大气环境产生扰动。机翼产生升力的同时会在飞机翼尖产生两个强烈涡旋流动场,这两个涡旋流动场的叠加会形成飞机尾涡。飞机飞行时如果穿越尾涡区域,将会出现机身抖动、下沉、飞行状态改变甚至翻转等现象,严重威胁飞行安全<sup>[1]</sup>。飞机越靠近跑道,飞行密度越大,遭遇尾涡的可能性也就越大。因而,为保证飞机飞行安全,尽可能提高飞行控制效率,航管部门需对飞机尾涡实时探测,获得尾涡的位置、强度变化信息,为飞行控制提供决策数据支持<sup>[2-6]</sup>。

国外较早开展了尾涡探测技术研究且较为先进,而激光尾涡探测由于其高探测精度,已凸显出较为明显的优势。其中,CTI公司研制的WindTracer已在香港国际机场和圣路易斯国际机场得到了广泛应用,尾

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-25; 网络出版日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(60672154)、安徽省自然科学基金(10040606Q61)

作者简介: 徐世龙(1988—),男,博士研究生,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: xushi1988@yeah.net

导师简介: 胡以华(1962—),男,博士,教授,主要从事光电信息处理方面的研究。

E-mail: skl\_hyh@163.com(通信联系人)

涡探测效果明显<sup>[7,8]</sup>。法国航空航天研究院(Onera)在2006年首先研制了第一个1.5 μm 光纤脉冲激光测风系统用于尾涡监测,并于2007年3月进行了CREDOS(横风减小起降间隔)实验,雷达位于距飞机下航滑道200 m处,以15°/s的快速扫描以“冻结”尾涡<sup>[9]</sup>。Leosphere基于1.5 μm 光纤脉冲激光技术,研制出商业化的WindCube系列测风激光雷达,作用距离能够达到几公里<sup>[10]</sup>。

国内国防科学技术大学王雪松等对飞机尾涡的微波雷达探测技术进行了卓有成效的研究探讨<sup>[11-13]</sup>,而目前对激光雷达飞机尾涡探测系统的构建还没有开展系统的研究工作。由于激光雷达在大气风速探测中具有明显优势<sup>[14-16]</sup>,因此为了进一步开展飞机尾涡的激光探测研究,本文从飞机尾涡激光探测的总体要求出发,设计了尾涡相干激光探测系统的系统结构与参数,并分别讨论了系统信噪比与测速精度等性能参数,从而证明所设计系统能够满足尾涡探测需求。

## 2 飞机尾涡相干激光探测系统设计

### 2.1 飞机尾涡激光探测的总体要求

飞机尾涡激光探测雷达的主要任务是在飞行控制中对机场跑道附近起降空域中的飞机尾涡场进行探测。开展飞机尾涡激光探测系统研究的主要目的是依照飞行控制中对飞机尾涡实施高精度、密集、实时探测的需求,建立一套相应的飞机尾涡探测实验系统,为后续开发实用型尾涡激光探测系统奠定基础。

在飞行控制中,飞机尾涡激光探测的总体要求可概括为:1) 机场跑道长度一般在3 km左右,为了使雷达对上述扫描方式均具有适用性,其探测半径应达到5 km以上;2) 激光雷达系统应具有较高的空间分辨率,即较小的脉冲宽度,以达到密集探测的需求;3) 激光雷达的测速范围应覆盖尾涡所诱导的最大径向风速,同时测速精度能够捕捉足够精细的风场速度信息,以达到飞机尾涡高精度探测的要求;4) 为了满足实时性,激光雷达的扫描周期要短,结合机场的预报要求,一般在15 s之内提供一次风场数据。表1给出了飞机尾涡激光探测的总体要求。

表1 飞行控制中尾涡激光探测的总体要求

Tabel 1 Wake vortex laser detection requirements of flight control

Performance index	Parameters
Radius of investigation	5 km
Range resolution	30~80 m
Speed range	±30 m/s
Speed resolution	<1 m/s
Scanning angle	>45°
Scanning cycle	<15 s

### 2.2 飞机尾涡相干激光探测系统参数设计

#### 2.2.1 探测系统结构

基于1节所描述的飞机尾涡探测总体要求,飞机尾涡激光探测实验系统结构图设计如图1所示。采用主控振荡器的功率放大器(MOPA)结构,使用单台激光器作为频率基准振荡器,使用声光调制器件(AOM)对其输出进行频移后发射,同时通过光纤耦合器直接从激光器抽出少部分功率作为本振信号。通过望远镜发出的光束经过飞机尾涡中空气分子与气溶胶的后向散射,再次被望远镜接收。回波信号通过窄带滤光片滤光后在平衡探测器与经过长光纤到达探测器的本振光混频,经过中频放大后进入数据采集系统。所采集数据经过后续处理最终得到飞机尾涡的相关信息。

#### 2.2.2 激光光源的参数设计

选取NewFocus 6330激光器作为本探测系统的激光光源。在飞机尾涡探测中,必须尽量减小大气对激光的吸收衰减,因此考虑在NewFocus 6330的波长调谐范围内,选取1.55 μm作为光源输出,这样既保证了人眼安全及窄线宽的优点,又能够避开大气中CO<sub>2</sub>的吸收峰,提高探测性能。

为了实现飞机尾涡的高精度、密集探测,需要对光源的脉冲宽度进行优化。激光雷达的测速精度取决于激光回波的多普勒频率分辨率,而脉宽越长则频率分辨率越高;同时,脉冲宽度的增加会导致雷达探测的距离分辨率降低,在设计中需要对脉冲宽度进行折中的选择。因此在声光移频器中加入控制信号,使得放

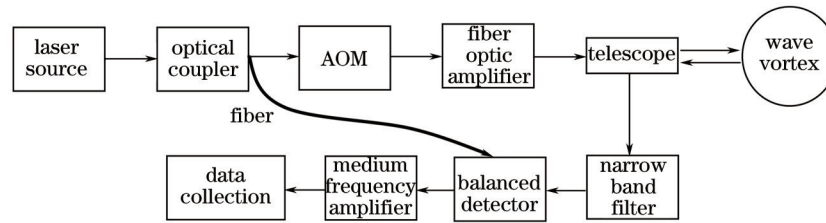


图1 飞机尾涡相干激光探测系统结构图

Fig.1 Structure of aircraft wake vortex coherence laser detection system

大器输出的连续光信号经过调制所得到的脉冲信号宽度为 400 ns。

横向探测距离分辨率,即系统在扫描过程中的角度分辨率  $\Delta\theta$ ,取决于扫描速率  $\omega_s$ 、激光发射的脉冲重复频率  $P$  与探测脉冲积累数  $N$ ,具体算式如下:

$$\Delta\theta = \frac{\omega_s}{P/N}, \quad (1)$$

为了满足探测的实时性,要求  $\omega_s$  一般不小于  $2^\circ/\text{s}$ 。此时脉冲重复频率越高、脉冲积累数越低则角度分辨率就越大,提高光源发射的脉冲重复频率能够有效提高雷达探测的横向距离分辨率,此处设计为 500 Hz。

### 2.2.3 双平衡相干探测参数设计

在探测实验系统设计中,对于微弱的大气激光回波信号的探测是一个技术难点。同时为了在更小的输出能量与脉冲宽度条件下提高测速精度与探测距离,所以有效提高探测系统信噪比是最为有效的一种方法。因此,探测实验系统采用双平衡相干探测,其优点是可以极大地提高系统信噪比,抑制背景噪声,提高对飞机尾涡风速场的反演精度。

相干探测中本振信号与回波信号具有相同波长,此时输出信号是由这两个信号的相位差所确定的直流信号,不便与直接探测信号分离。在实际应用中多采用外差相干探测,即探测信号与本振信号具有一固定的频差,以此频差作为接收系统的中频,以便于信号处理。对于飞机尾涡的激光探测而言,要求对  $\pm 30 \text{ m/s}$  范围内的风速都能够有效探测,在选择中频频率时必须保证正向与负向多普勒频移都不产生负频率信号。为此,系统中采用声光调制器作为移频器,并选取 55 MHz 作为固定频差。同时,为了消除回波不定的偏振方向对相干度的影响,采用偏振方向分离的双平衡探测方式(如图 2 所示),即使用偏振分束器先将回波与本振信号按两个偏振方向分离,然后按两个偏振方向分别在平衡探测器上完成混频。

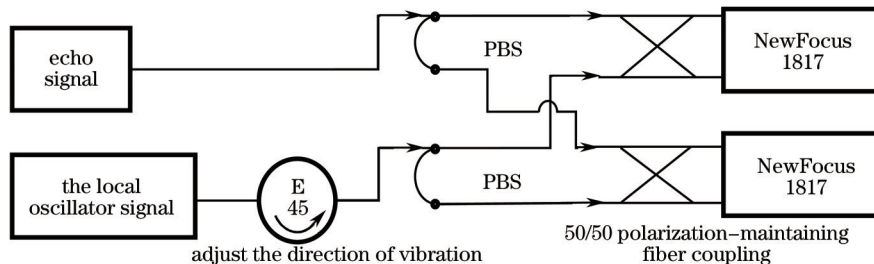


图2 双平衡探测的光纤光路

Fig.2 Fiber optical path of double balanced detection

最终所设计的飞机尾涡相干激光探测系统参数如表 2 所示。

## 3 飞机尾涡相干激光探测系统性能分析

### 3.1 系统信噪比分析

在相干探测时,光电探测器的噪声来源主要是散弹噪声和器件的热噪声,其中本振光信号对探测器的作用使得探测器中的本振散弹噪声远超过器件的热噪声和其他散弹噪声<sup>[17]</sup>。系统信噪比可以表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\sqrt{M} k}{qB} \cdot \frac{P_r}{1 + \sqrt{P_b/P_L}}, \quad (2)$$

式中  $k = q\xi/h\nu_L$ ,  $q$  是电子电量(eV),  $B$  为系统带宽(Hz),  $\xi$  是探测系统的量子效率,  $M$  为脉冲积累数,  $P_r$ 、 $P_b$ 、

$P_L$  分别为信号光、背景光与本振光功率(W)。

表2 飞机尾涡相干激光探测系统参数

Tabel 2 Parameters of aircraft wake vortex coherence laser detection system

Parameters	Units	Parameters selection	Parameters	Units	Parameters selection
Wavelength	$\lambda$ /nm	1550	Optical collection efficiency	$\eta$	0.20
Output energy	$P_0$ /mJ	0~50	Receiving caliber	$D$ /cm	30
Pulse width	$\tau$ /ns	400	Sampling interval	$T$ /ns	2
Detection bandwidth	$B$ /MHz	80	Scanning speed	$\omega$ /[(°)/s]	4
PRF	$f_p$ /Hz	500	Filter bandwidth	$\Delta\lambda$ /nm	0.1
Accumulation number	$M$	25	Spectral radiant exitance	$S_0(\lambda)$ /( $W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ )	1
Quantum efficiency	$\xi$ /( $A \cdot W^{-1}$ )	0.2	Field of view	$\theta$ /mrad	0.5

由激光雷达方程,探测系统所发射的光束经过后向散射回到探测器的光功率表示为:

$$P_r = \frac{P_L K_t A_r K_r \eta \sigma T_a^2}{4\pi \Omega_i R^4} \quad (3)$$

式中  $P_L$  是发射功率(W),  $K_t$  是发射光学系统透射率,  $K_r$  是接收光学系统透射率,  $A_r$  为接收系统的有效接收面积( $m^2$ );  $T_a$  是单程大气透射率, 且有  $T_a = \exp(-\mu R)$ ,  $\mu$  是大气衰减系数( $m^{-1}$ );  $\eta$  是光学收集效率;  $\Omega_i$  是激光束发散立体角, 一般用光束发散角  $\theta_i$  表示, 即  $\Omega_i = \pi\theta_i^2/4$  ( $\theta_i \ll 1$ );  $\sigma$  是气溶胶的激光雷达散射截面( $m^2$ )。由于大部分情况下, 本振光功率远大于背景光功率 ( $P_L \gg P_b$ ), 所以(2)式可以表示为:

$$R_{SN} = \frac{\sqrt{M} k P_r}{qB} = \frac{\sqrt{M} \xi P_r}{h\nu_L B} \quad (4)$$

根据所设计的飞机尾涡探测实验系统参数, 结合上述计算方法可以得到该系统的信噪比与系统输出脉冲能量及作用距离之间的关系, 如图 3 所示。

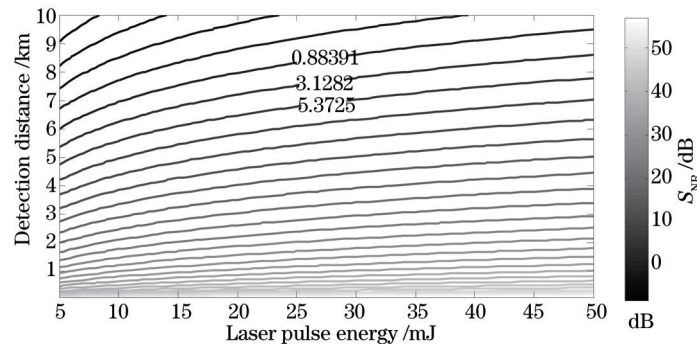


图3 不同激光脉冲能量条件下的接收等信噪比曲线

Fig.3 Received  $S_{NR}$  curves under the condition of different laser pulse energies

图 3 给出了系统探测距离为 1~10 km, 输出能量在 5~50 mJ 范围内变化时, 信噪比变化的等高图, 颜色由深至浅表示信噪比依次增高。图中标示出了 3 dB 左右等高线的数值。可以看出, 当脉冲能量在 25 mJ 以上, 雷达探测距离在 7 km 以内时, 可以保证系统探测信噪比大于 3 dB。

如果考虑对目标空域飞机尾涡全部气流扰动的频移信号进行接收, 而设定测量上限, 则系统接收带宽可以降低, 接收信噪比可以进一步提高。图 4 给出了当激光脉冲能量为 25 mJ, 系统带宽从最小值 30 MHz (对应测量扰动气流最大值为 30 m/s) 到 100 MHz 变化时, 系统相干探测信噪比变化关系。

由图 4 可以看出, 随着探测带宽的降低, 系统探测信噪比逐渐增加。当系统带宽为 30 MHz 时, 即使脉冲能量为 25 mJ, 系统在 8.7 km 的探测距离仍能够保证信噪比高于 3 dB, 与 100 MHz 带宽相比有显著提高。但为了确保回波信号能够包含探测区域的风速变化范围内的所有多普勒频移信息, 探测带宽不能过小。本文



所设计的探测系统,选取的探测带宽为 80 MHz,相应的风速探测范围是-30~30 m/s。

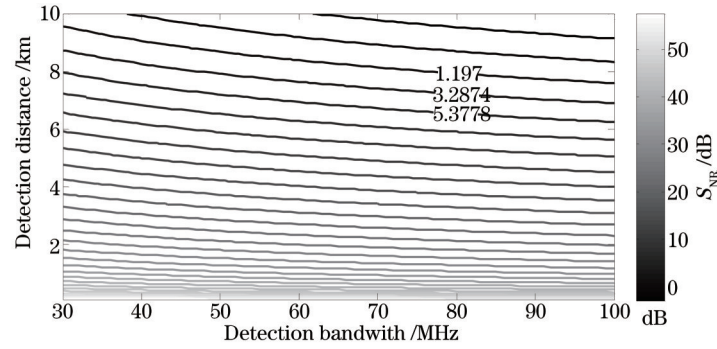


图4 不同系统带宽条件下的接收等信噪比曲线

Fig.4 Received  $S_{NR}$  curves under the condition of different detection bandwidths

### 3.2 测速精度分析

对于脉冲对的自相关运算,激光雷达扫描的测速精度可表示为<sup>[18]</sup>

$$\delta V = \frac{\lambda}{4\pi} \left[ \frac{f}{2MLt} \right]^{1/2} \left[ 2\pi^{3/2} W + \frac{16\pi^2 W^2}{R_{SN}} + \frac{1}{R_{SN}^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中  $f=2V_{max}/\lambda$  为最高采样频率,  $L$  为门采样间隔与脉宽之比,  $t$  为气溶胶与波长的关系系数,一般取 1,  $W$  为回波信号频率展宽。可见,信噪比与多普勒回波信号展宽对测速精度影响较大。信噪比越高,测速误差越小,精度越高。多普勒展宽越宽,探测误差越大。

仿真中,作用距离为 0~10 km,脉冲能量为 5~50 mJ,参数参见表 2。根据上述条件,得到系统对飞机尾涡测速精度计算结果如图 5 所示。可以看出,依据上述条件,在脉冲能量约 25 mJ 时,系统对探测距离 9 km 处的风速探测仍然可以达到约 1 m/s 的精度,在 2 km 内测速精度优于 0.2 m/s,当脉冲能量更大,脉冲积累数更高时,探测精度还可以进一步提高。

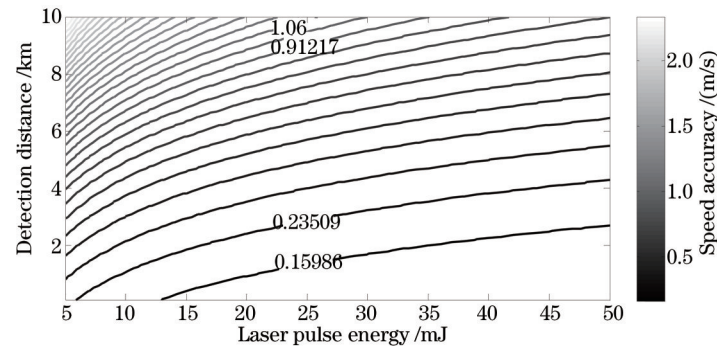


图5 不同脉冲能量条件下的飞机尾涡场的测速精度等高曲线

Fig.5 Speed accuracy curves under the condition of different laser pulse energies

## 4 结 论

从飞机尾涡激光探测的总体要求出发,对飞机尾涡相干激光探测系统进行了设计,并对其性能进行了仿真与实验分析。主要得到以下结论:飞机尾涡激光探测实验系统适合采用脉冲相干探测体制。经过优化设计后的飞机尾涡激光探测实验系统能够满足尾涡探测的需求,当脉冲能量在 25 mJ 以上时,雷达在探测距离 7 km 内的探测信噪比可以保证大于 3 dB;在 2 km 内测速精度优于 0.2 m/s。

### 参 考 文 献

- 1 Shen Chun. Radar Scattering Characteristic and Simulation Platform Construction of the Aircraft Wake Vortex[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 1-2.  
沈 淳. 飞机尾流的电磁散射特性分析及仿真平台构建研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 1-2.
- 2 Keane M, Buckton D, Redfern M, *et al.* Axial detection of aircraft wake vortices using Doppler lidar[J]. Journal of

- Aircraft, 2002, 39(5): 850–861.
- 3 Patrick R Veillette. Data show that U.S wake-turbulence accidents are most frequent at low altitude and during approach and landing[J]. Flight Safety Digest, 2002, 21(3-4): 1-47.
- 4 Barbaresco F, Juge P, Klein M, *et al.*. Optimising runway throughput through wake vortex detection, prediction and decision support tools[C]. Digital Communications- Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV), 2011 Tyrrhenian International Workshop on IEEE, 2011. 27-32.
- 5 Darracq D, Corjon A, Fré, *et al.*. Simulation of wake vortex detection with airborne Doppler lidar[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(6): 984-993.
- 6 Fiduccia P C, Bryant W, Lang S. Wake turbulence research program[J]. Journal of Air Traffic Control, 2004, 46(1): 17-21.
- 7 Hannon S M, Barr K S, Jacob D K, *et al.*. Application of pulsed Doppler lidar in the airport terminal area [C]. Fourth International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium 2004: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space: International Society for Optics and Photonics, 2005. 186-197.
- 8 Köpp F, Rahm S, Smalikho I. Characterization of aircraft wake vortices by 2-  $\mu\text{m}$  pulsed Doppler lidar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(2): 194-206.
- 9 Leosphere. Pulsed 1.5 micron Lidar for wake vortex measurements and monitoring: CREDOS trials on Frankfurt Airport[R] Paris: Thales Research & Technology, 2010.
- 10 Jean-Pierre Cariou, Laurent Sauvage, Matthieu Boquet. New long range lidar for airport wind profiling [R] Paris: Thales Research&Technology, 2010.
- 11 Zhou Bin, Wang Xuesong, Wang Tao, *et al.*. A radar reflectivity model of aircraft wake vortices in clear air [J]. Computer Simulation, 2009, 26(6): 78-81.  
周彬, 王雪松, 王涛, 等. 晴空状态下飞机尾流的雷达反射模型[J]. 计算机仿真, 2009, 26(6): 78-81.
- 12 Li Jun, Zhou bin, Wang Xuesong, *et al.*. Radar detection performance of aircraft wake vortices in clear air [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2853-2857.  
李军, 周彬, 王雪松, 等. 晴空飞机尾流的雷达探测性能分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2853-2857.
- 13 Li Jun, Wang Tao, Li Wenchen, *et al.*. Experimental study of X-band radar scattering characteristics of aircraft wake vortices[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(6): 406-410.  
李军, 王涛, 李文臣, 等. 飞机尾流 X 波段雷达散射特性的实验研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(6): 406-410.
- 14 Shen Fahua, Sun Dongsong, Wang Zhongchun, *et al.*. Beam scanning and wind inversion technique of a mobile doppler lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312004.  
沈法华, 孙东松, 王忠纯, 等. 移动式多普勒激光雷达光束扫描及风场反演技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0312004.
- 15 Wang Hong, Liu Xuebin, Feng Yutao, *et al.*. A new reduction technique for thermospheric wind and temperature measurement with Fabry-Perot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130003.  
王宏, 刘学斌, 冯玉涛, 等. 基于法布里珀罗干涉仪反演大气风速和温度的简化算法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130003.
- 16 Ma Xin, Lin Hong, Ma Yingying, *et al.*. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric CO<sub>2</sub> lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1101003.  
马昕, 林宏, 马盈盈, 等. 差分吸收大气 CO<sub>2</sub> 激光雷达的大气压力增宽修正算法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1101003.
- 17 Li Dongmei, Zheng Yongchao, Pan Jingyan, *et al.*. Index system of coherence doppler wind lidar[J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 880-884.  
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880-884.
- 18 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environmental Monitoring Laser Radar [M]. Beijing: Science Press, 2001.  
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001.