

## 相干测风激光雷达的数值建模和仿真分析

金效梅<sup>1,2</sup>, 朱文越<sup>1,2</sup>, 刘庆<sup>1,2,3\*</sup>, 陈业慧<sup>1,2,3,4</sup><sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>2</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;<sup>3</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;<sup>4</sup>安徽新华学院电子通信工程学院, 安徽 合肥 230088

**摘要** 根据相干测风激光雷达实际探测光路的传输过程和大气分层理论,建立了相干测风激光雷达的全流程系统仿真模型。基于现有系统参数,分别在常风速模型和美国宇航局(NASA)阵风模型下仿真模拟了高脉冲能量-低脉冲重复率(HPE-LPRF)和低脉冲能量-高脉冲重复率(LPE-HPRF)两种系统的探测过程。通过对比反演风速值的均方误差,分析两种系统的探测性能。仿真结果表明:仿真模型给出的系统信噪比与理论值一致;信号的非相干累加平均处理提高了风速测量精度;非相干累加时间为 0.1 s 时,在常风速模型和 NASA 阵风模型下,LPE-HPRF 探测系统风速的均方误差分别为 0.75 m/s 和 1.03 m/s,均优于 HPE-LPRF 探测系统(0.93 m/s 和 1.25 m/s)。

**关键词** 大气光学;相干测风激光雷达;系统仿真;气溶胶;风速反演

**中图分类号** TN247; TN958.98

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202141.0601003

## Numerical Modeling and Simulation Analysis of Coherent Wind Lidar

Jin Xiaomei<sup>1,2</sup>, Zhu Wenyue<sup>1,2</sup>, Liu Qing<sup>1,2,3\*</sup>, Chen Yehui<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>3</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>4</sup>Electronic Communications Engineering College, Anhui Xinhua University, Hefei, Anhui 230088, China

**Abstract** This study establishes a whole-process simulation model of a coherent wind lidar considering the transmission process of the lidar's optical detection path and atmospheric stratification theory. Using the existing system parameters, we simulate the detection process under two models: a constant wind speed model and the typical wind shear model of NASA. We also consider two systems: a high-pulse energy low-pulse repetition frequency (HPE-LPRF) system and a low-pulse energy high-pulse repetition frequency (LPE-HPRF) system. The detection performances of both systems are compared by computing the mean square error of their inversed wind speeds. The simulated signal-to-noise ratios of both systems well agree with the theoretical values. The accuracy of the measured wind speed is improved by incoherent accumulation average process. At an incoherent accumulative time of 0.1 s, the mean square error of the wind speeds detected under the constant wind speed model and NASA shear model is lower in the LPE-HPRF system (0.75 and 1.03 m/s, respectively) than in the HPE-LPRF system (0.93 and 1.25 m/s, respectively).

**Key words** atmospheric optics; coherent wind lidar; system simulation; aerosol; velocity inversion

**OCIS codes** 010.0280; 070.1170; 010.1110; 280.3340

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-09-27; 录用日期: 2020-11-09

基金项目: 中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-19S028)

\* E-mail: liuqing@aiofm.ac.cn

# 1 引言

基于外差探测技术的相干测风激光雷达在作用距离、测量精度、时空分辨率及体积功耗等方面具有显著的技术优势<sup>[1]</sup>, 目前已在边界层大气风场监测及其相关应用领域受到日益广泛的关注。早在 1970 年, Huffaker<sup>[2]</sup> 利用波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光器实现了短距离内空气流动的激光相干探测, 此后, 相干测风激光雷达随着激光技术相关器件的发展而不断趋向成熟<sup>[3-9]</sup>。以  $1.5 \mu\text{m}$  波段的全光纤相干测风激光雷达为例, 1998 年三菱电机公司采用单脉冲能量为  $2.5 \text{ mJ}$ 、脉冲重复频率为  $20 \text{ Hz}$  的光源, 实现超过  $800 \text{ m}$  的水平探测距离。2001 年利用脉冲能量为  $10.9 \text{ mJ}$ 、脉冲重复频率为  $15 \text{ Hz}$  的探测系统, 实现了  $5 \text{ km}$  距离的风场探测<sup>[5]</sup>。2015 年, 法国航空航天中心 (ONERA) 利用脉冲能量为  $500 \mu\text{J}$ 、脉冲重复频率为  $10 \text{ kHz}$  的相干测风激光雷达实现了  $16 \text{ km}$  的风场探测距离<sup>[6-7]</sup>。相对于国外, 国内的研究机构关于相干测风激光雷达的研究起步较晚<sup>[8-9]</sup>。2012 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所报道了脉冲能量为  $43 \mu\text{J}$ 、脉冲重复频率为  $10 \text{ kHz}$  的相干多普勒测风激光雷达, 实现水平方向  $3 \text{ km}$ 、垂直方向  $1.9 \text{ km}$  的探测距离。2015 年, 中国海洋大学报道了用于风电场的风场观测的全光纤相干多普勒测风激光雷达系统, 其中脉冲能量为  $50 \mu\text{J}$ 、脉冲重复频率为  $10 \text{ kHz}$ 。2019 年, 中国科学技术大学报道了脉冲能量为  $100 \mu\text{J}$ 、重复频率

为  $15 \text{ kHz}$  的多功能相干测风激光雷达, 实现  $6 \text{ km}$  的水平探测距离<sup>[9]</sup>。尽管国内外诸多科研机构均开展了关于相干测风激光雷达的理论和实验研究, 但相关报道主要集中在风场反演算法处理、器件研制及系统集成方面, 较少涉及到系统仿真建模分析<sup>[10-16]</sup>。而相干测风激光雷达系统较为复杂, 对设备搭建要求高, 因此建立全流程系统仿真模型, 利用计算机进行仿真模拟对调整系统参数和节约成本具有重要意义。

本文基于相干测风激光雷达的工作原理, 对系统组成进行模块化, 利用 Simulink 工具建立了相干测风激光雷达的数学仿真模型。通过比对国内外研制的相干测风激光雷达, 划分了高脉冲能量-低脉冲重复率 (HPE-LPRF) 和低脉冲能量-高脉冲重复率 (LPE-HPRF) 两类相干测风激光雷达系统<sup>[5, 12]</sup>。目前, 关于这两类相干测风激光雷达系统的探测性能对比未见详细报道, 因此在相同大气环境下, 采用所建立的模型对 HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 相干测风系统进行风速反演的对比分析和验证, 以更好地为相干测风激光雷达系统的搭建提供理论支撑。

## 2 相干测风激光雷达系统介绍

### 2.1 系统结构

相干测风激光雷达系统的结构如图 1 所示, 由光纤激光器 (包括种子激光器、声光调制器、光纤放大器及环形器)、望远镜、保偏光纤耦合/分束器、平衡探测器、数据采集卡及工控机等组成。

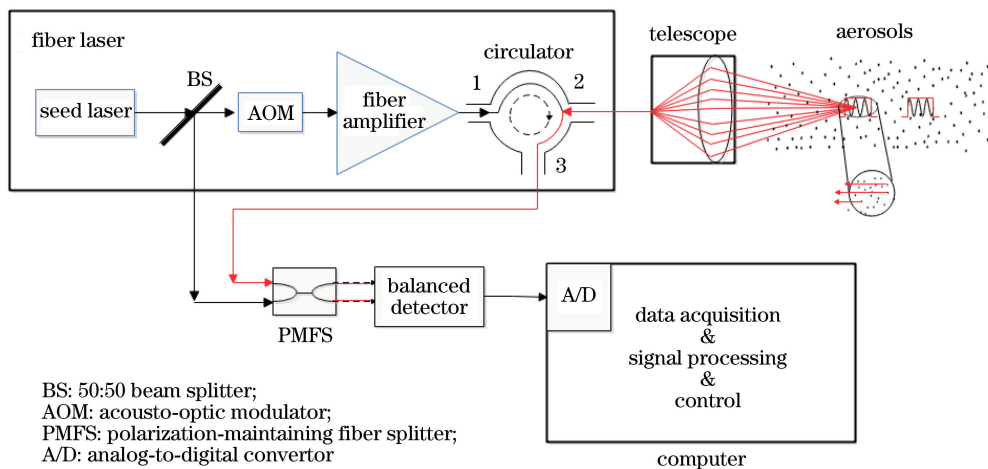


图 1 相干测风激光雷达系统的框图

Fig. 1 Block diagram of coherent wind lidar system

### 2.2 工作原理

相干测风激光雷达选取的光纤激光器中含有声光调制器 (AOM) 和环形器。其中种子激光器发射

的连续本振激光经分束器分成两束激光, 一束经 AOM 调制到光纤放大器, 得到频移量为  $f_{\text{AOM}}$  的脉冲激光。脉冲激光通过环形器、望远镜、光学扫描反

射镜等发射到大气中,当大气中粒子以相对于探测激光的径向速度  $v$  运动时,激光光束与气溶胶粒子相互作用,产生多普勒频移量为  $f_d$  的回波信号,回波信号经望远镜接收到环形器中。由种子激光器产生的另一束本振光与回波信号一起进入保偏光纤耦合/分束器进行混频,经平衡探测器进行光电转换后得到中频信号,频移量为  $f_{RF}$  ( $f_{RF} = f_{AOM} + f_d$ )。最后利用信号处理模块进行处理来获取频率信息,得到多普勒频移量,计算出相应的风速信息。

当大气中粒子以相对探测激光的径向速度  $v$  运动时,由于多普勒效应,建立的径向风速与频移量

之间的关系为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为发射激光波长;径向风速的方向与望远镜视向相反时,取“+”,反之取“-”。

### 3 基于 Simulink 的系统仿真模型

根据图 1 系统框图和各模块的工作原理,建立基于 Simulink 的仿真模型,如图 2 所示,将系统划分为激光发射模块、大气传输模块、光电转换模块及数据采集和处理模块。

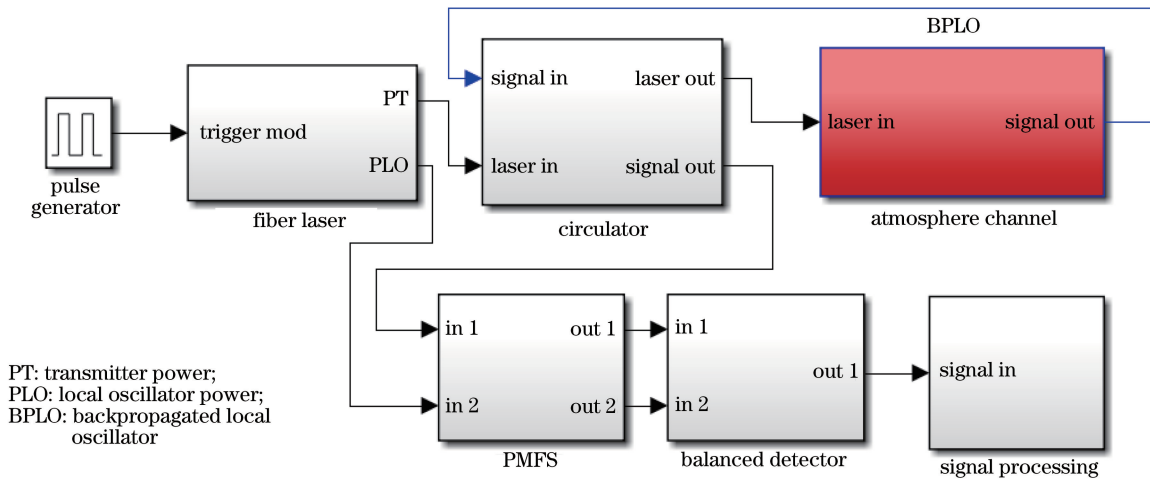


图 2 相干测风激光雷达系统的仿真框图

Fig. 2 Simulation block diagram of coherent wind lidar system

#### 3.1 激光发射模块

相干测风激光雷达系统中的激光器采用脉冲工作模式,脉冲激光在空间传输的空间强度分布  $I(x, y, z)^{[15]}$  可以表示为

$$I(x, y, z) = I(x, y) \times P(z) = P_0 \times I(x, y) \times P(t), \quad (2)$$

式中: $x, y$  分别为空间横截面的水平和垂直方向; $z$  为光束传输的方向(与时域变量  $t$  对应); $I(x, y)$  为空间横截面内归一化的光强分布; $P_0$  为发射脉冲激

光的初始功率; $P(t)$  为激光在传输方向上的归一化功率分布。

图 3 为激光器发射模块的结构图,假设归一化的光强分布  $I(x, y)$  在空间横截面内是均匀的。发射的连续激光经分束器(BS)产生本振光(PLO),同时 AOM 对种子激光器发射的连续激光进行调制,得到发射脉冲光(PT)。该模块中可以调整的参数:种子激光器的初始功率、AOM 的消光比和频率偏移量、光纤放大器的放大增益、发射脉冲的脉宽、重

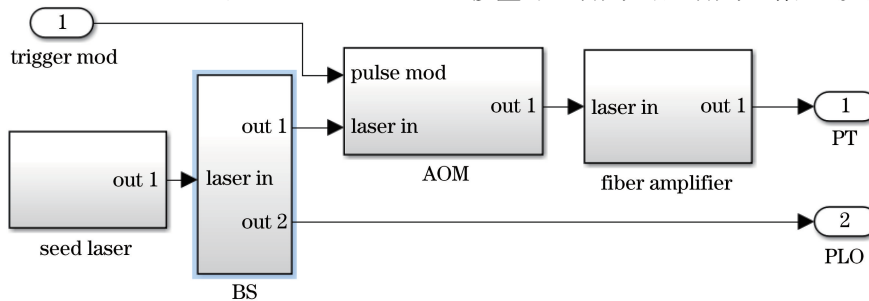


图 3 光纤激光器模型结构图

Fig. 3 Diagram of fiber laser model structure

复频率。其中,触发信号的波形决定了脉冲调制的波形(选取的脉冲波形为矩形波)。

AOM 的主要参数为消光比和频率偏移量,其中消光比<sup>[17]</sup>可以表示为

$$R_{EXT} = -10\log(P_{on}/P_{off}), \quad (3)$$

式中: $P_{on}$ 、 $P_{off}$  分别为一级衍射光方向上器件处于“开”状态的光功率和“关”状态下的杂散光功率。基

于消光比建立的 AOM 结构图如图 4(a) 所示,“ON”表示通过的直流光功率,“OFF”表示泄露的光功率。同时通过“f\_AOM”设定频率偏移量,实现对连续激光的脉冲调制和频率偏移。图 4(b)为光纤放大器简化的仿真结构,通过“gain”对脉冲光进行放大,使得输出的光功率为探测系统发射的脉冲光的峰值功率。

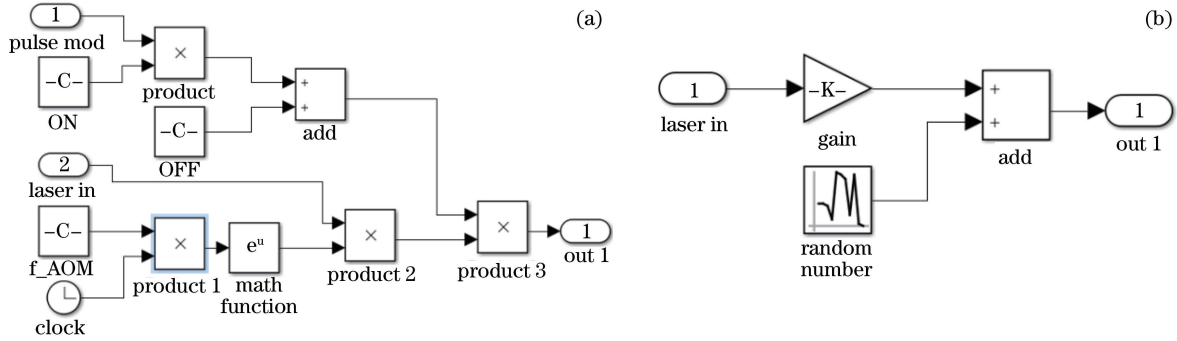


图 4 主要器件的仿真结构图。(a) AOM;(b) 光纤放大器

Fig. 4 Simulation structure diagram of major devices. (a) AOM; (b) fiber amplifier

### 3.2 大气传输模块

基于大气分层模型建立的大气传输模块<sup>[18]</sup>对沿光束路径传输的大气进行分层,假设探测脉冲宽度范围内每层气溶胶粒子的运动状态相同,根据后向传播本振(BPLO)原理<sup>[5,19]</sup>,对探测目标平面上每一层的后向散射信号进行叠加,得到回波信号的仿真模型,具体表达式为

$$S(t) = 2(P_{LO})^{1/2} \exp(i2\pi f_{AOM}t) \sum_M \left[ P_T \left( t - \frac{2z_m}{c} \right) \right]^{1/2} \times \exp \left[ i\varphi \left( t - \frac{2z_m}{c} \right) \right] \tilde{\kappa}_m \exp(-i2kv_m t), \quad (4)$$

式中: $\tilde{\kappa}_m$  为零均值的圆随机变量,且  $\langle |\tilde{\kappa}_m|^2 \rangle =$

$T^2(z_m)\beta(z_m)\frac{A_r}{z_m^2}\eta_m\Delta z$ ,  $\beta(z_m)$  为与探测距离有关的

气溶胶后向散射系数,望远镜的有效接收面积  $A_r = \pi D^2/4$ ,  $D$  为望远镜的有效口径; $m$  为探测脉冲宽度范围内大气分层的序号; $P_{LO}$  为激光器的本振光功率; $P_T$  为激光器发射的脉冲功率; $\varphi$  为发射激光的相位函数; $z_m$  为第  $m$  层的探测距离;与探测距离有关的单程大气透过率  $T(z_m) = \exp \left[ -\int_0^{z_m} \alpha(r) dr \right]$ ,  $\alpha(r)$  为大气消光系数; $k$  为波数, $v_m$  为第  $m$  层的气溶胶粒子的径向风速; $\eta_m$  为在  $z_m$  处的系统效率;分层厚度  $\Delta z = c/2F_s$ ,  $F_s$  为系统采样频率;分层数  $M = c\Delta T/2\Delta z$ 。

经激光发射模块的激光脉冲通过环形器模块输出到大气传输模块的输入端。根据回波信号仿真模型,建立大气传输模块,如图 5 所示,其中延迟模块实现发射激光在时间域上的延迟

$\left[ P_T \left( t - \frac{2z_m}{c} \right) \right]^{1/2} \times$

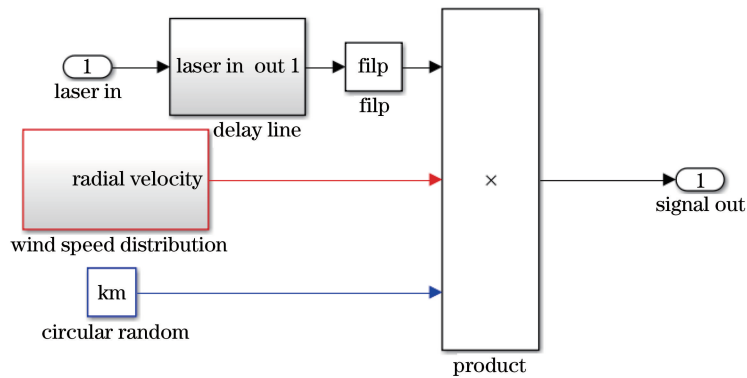


图 5 大气传输模块的仿真结构图

Fig. 5 Simulation structure diagram of atmospheric transmission module



$\exp\left[i\varphi\left(t-\frac{2z_m}{c}\right)\right]$ ; 风速模型 (wind speed distribution) 给出在整个探测范围内  $M$  层气溶胶粒子的径向风速  $v_m$  分布, 实现径向风速带来的多普勒频移项  $\exp(-i2kv_m t)$ ; 利用  $\langle |\tilde{\kappa}_m|^2 \rangle$  计算公式, 采用 1976 年美国标准大气模型中后向散射系数及消光系数与距离之间的关系<sup>[14]</sup>, 得到在探测距离  $z_m$  处的圆随机变量。对三个部分相乘, 得到发射激光在大气传输过程中产生后向散射光场的分布。该模块可调整的参数: 系统效率、望远镜口径、大气气溶胶后向散射系数、大气消光系数、大气分层数、风速分布。

### 3.3 光电转换模块

相干测风激光雷达中的回波信号光与本振光进行混频的过程主要发生在光电探测器的探测面上。假设回波信号光与本振光的光场<sup>[6]</sup>分别为

$$U_s(x, y, t) = A_s(x, y) \exp[-i(2\pi f_s t + \varphi_s)], \quad (5)$$

$$U_{LO}(x, y, t) = A_{LO}(x, y) \exp[-i(2\pi f_{LO} t + \varphi_{LO})], \quad (6)$$

式中:  $A_s(x, y)$ 、 $A_{LO}(x, y)$  分别为回波信号光和本振光的振幅;  $f_s$ 、 $f_{LO}$  分别为回波信号光和本振光的频率;  $\varphi_s$ 、 $\varphi_{LO}$  分别为回波信号光和本振光的相位。

在光电探测器上, 混频后的光场及光强可以表示为

$$U_d(x, y, t) = U_s(x, y, t) + U_{LO}(x, y, t), \quad (7)$$

$$I_d(x, y, t) = |U_d(x, y, t)|^2. \quad (8)$$

相干测风激光雷达的主要噪声包括散粒噪声、热噪声、相对强度噪声。散粒噪声、热噪声均属于零均值白噪声, 相对强度噪声主要与探测器的信号源有关, 根据文献[20], 在采用平衡探测器进行光电转换时可以不考虑相对强度噪声的影响, 因此, 对应模型中建立的噪声功率<sup>[20]</sup>表示为

$$\langle i_n^2 \rangle = 2e\mathfrak{R}P_{LO}B + 4KTB/R_L, \quad (9)$$

式中:  $e$  为电荷常量;  $\mathfrak{R}$  为光电转换系数;  $B$  为探测器的带宽;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度;  $R_L$  为探测器负载电阻。

根据(7)~(9)式建立的光电转换模块如图 6 所示。根据平衡探测器的探测原理, 在该模块中设置 2 个输入通道, 其中求和模块(sum of elements)实现大气分层模型中脉冲宽度内每一层后向散射信号的非相干累加, 随机数模块(random number)利用(9)式计算的噪声电流均方值作为方差来产生系统的随机噪声, 数学函数模块(math function)实现探测信号的光场到光强的转换。探测到的气溶胶后向散射光经环形器模块到光纤分束器模块(PMFS), 与 PLO 一起接入到平衡探测器的两输入端进行混频, 经光电转换(gain)得到回波信号电流分布。其中可调整的参数: 光电转换增益、探测器带宽、探测器负载电阻。

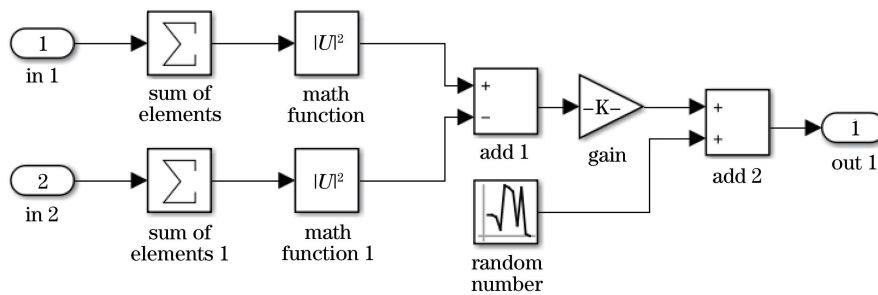


图 6 光电转换模块的仿真结构图

Fig. 6 Simulation structure diagram of photoelectric conversion module

### 3.4 数据采集和处理模块

最大似然离散谱峰值估计(ML-DSP)算法主要基于快速傅里叶变换, 利用回波信号的功率谱求解对应最大周期图的频率, 进而估计径向风速, 计算效率高, 是相干测风激光雷达常用的风速估计算法<sup>[21-22]</sup>。该算法的频率估计结果决定了径向风速估计值与真实值的偏差, 这里将有效测量距离上径向风速估计值与真实值的均方误差(MSE)定义为风速估计精度。

图 7 为数据采集和处理模块的结构图, 数据采集模块对回波信号进行采集, 利用缓冲的方式将采集到的数据实时传输到风速估计模块。结合风速估计模块和 ML-DSP 算法编写风速反演程序, 计算得到单脉冲、多脉冲累加方式下不同距离的风速信息, 并给出多脉冲累加方式计算的频谱信息, 最后通过数据存储模块对采集的回波信号和对应的风速信息进行保存。其中, 采用缓冲方式对采集的数据进行处理时会有一个脉冲周期的延

迟,而在实际探测过程中,系统对采集到的风速估计的实时处理存在一定的延迟,符合实际情况。

通过更改风速反演程序,可实现对风速估计模块的调整,提高风速估计精度。

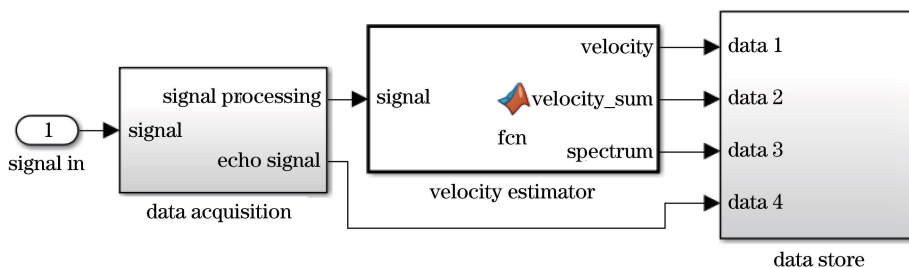


图 7 数据采集和处理模块的仿真结构图

Fig. 7 Simulation structure diagram of data acquisition and processing module

## 4 基于 Simulink 的系统仿真分析

### 4.1 仿真参数

目前 1.5 μm 波段的光纤和光器件生产工艺成熟,且该波段的大气窗口透过率高,满足人眼安全的要求<sup>[22]</sup>,因此选择 1.5 μm 波段的发射激光源,具体系统仿真参数如表 1 所示<sup>[20,23-25]</sup>。将相干测风激光雷达分成两类:HPE-LPRF 系统和 LPE-HPRF 系

统。为了对比两种不同系统参数下的探测性能,假设两者在相同探测距离处具有相同系统效率,设为 18.6%<sup>[5]</sup>,同时设置相同的探测平均功率。该仿真模型输出的数据包括原始时域信号、频谱数据及反演的风速信息。通过仿真模拟的原始时域信号分布,分别计算出两探测系统的信噪比,再利用反演的风速数据与设定风速值的均方误差,完成系统仿真模型的验证和两类系统探测性能的对比。

表 1 系统仿真的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of system simulation

| Category           | Parameter                  | HPE-LPRF | LPE-HPRF |
|--------------------|----------------------------|----------|----------|
| Fiber laser        | Wavelength                 | 1550 nm  | 1550 nm  |
|                    | Mean power                 | 1 W      | 1 W      |
|                    | Pulse energy               | 2 mJ     | 100 μJ   |
|                    | Pulse duration             | 300 ns   | 300 ns   |
|                    | Pulse repetition frequency | 500 Hz   | 10 kHz   |
|                    | Relative intensity         | -160 dB  | -160 dB  |
| Telescope          | Aperture                   | 150 mm   |          |
| Balanced detector  | 3 dB bandwidth             | 200 MHz  |          |
|                    | Responsivity               | 1.0 A/W  |          |
| Simulation setting | Sampling rate              | 400 MHz  |          |
|                    | Detection distance         | 3 km     |          |

### 4.2 回波信号仿真分析

首先分析系统仿真模型在常风速情况下的回波

信号,常风速是一种特殊的线性风速情况,在探测范围内各层风速为恒定值<sup>[16]</sup>。图 8 为 20 m/s 的常风

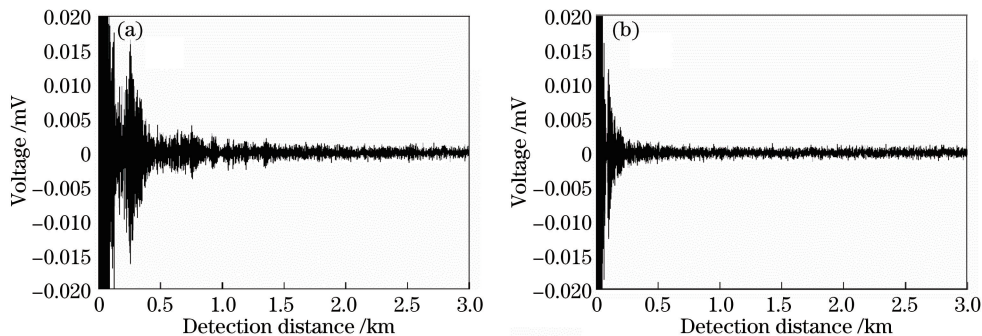


图 8 单个脉冲下模拟仿真的回波信号分布。(a) HPE-LPRF;(b) LPE-HPRF

Fig. 8 Simulated results of echo signal distribution under a single pulse. (a) HPE-LPRF; (b) LPE-HPRF

速情况下,0.1 s 的探测时间内单个脉冲的回波信号分布。HPE-LPRF 的单脉冲回波信号的电压幅值相对 LPE-HPRF 的幅值较大,同时 HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 分别保存了 50 组和 1000 组的回波信号数据,模拟结果符合 HPE-LPRF 的大脉冲能量和 LPE-HPRF 的高重复频率设置。计算出两种探测系统模拟仿真回波信号时的信噪比,图 9 为计

算的结果与理论信噪比<sup>[5,20]</sup>的对比,显示在探测范围内信噪比的变化趋势基本相同。为符合实际探测过程,在模型中加入散斑噪声等影响,对 LPE-HPRF 系统仿真参数进行实际测量,得到的单脉冲回波信号分布如图 10 所示,从仿真结果的数值分布与实验结果的对比如验证了系统仿真模型的准确性。

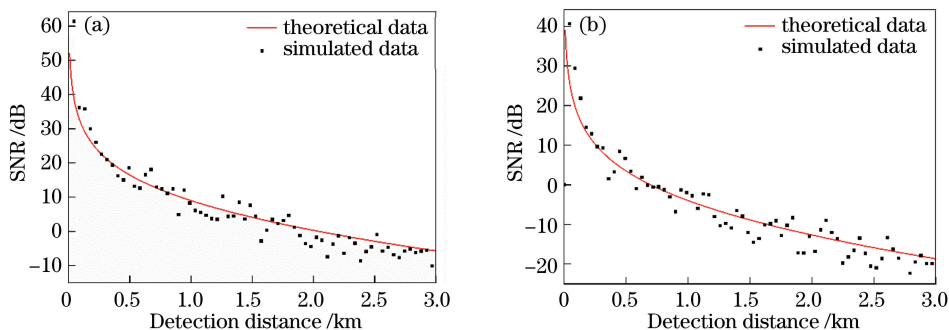


图 9 回波信号的信噪比(SNR)与理论信噪比的对比。(a) HPE-LPRF;(b) LPE-HPRF

Fig. 9 Comparison between SNR of echo signal and theoretical SNR. (a) HPE-LPRF; (b) LPE-HPRF

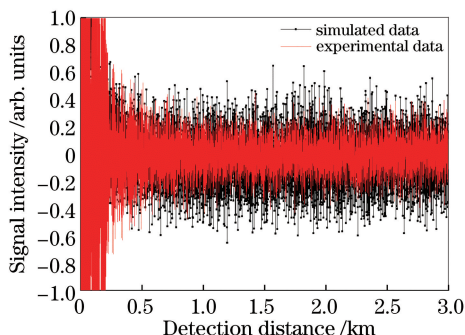


图 10 回波信号的归一化强度分布

Fig. 10 Normalized intensity distribution of echo signal

### 4.3 非相干累加过程的仿真分析

利用表 1 设定的仿真参数,模拟 HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 两探测系统分别在常风速和美国宇航局(NASA)阵风模型<sup>[16]</sup>下 0~3 km 距离范围的探测过程。从上述信噪比的计算结果可以看出,HPE-

LPRF 系统较 LPE-HPRF 高了 2 个数量级,HPE-LPRF 探测系统在单脉冲下的风速估计结果整体与设定的常风速值有较好的一致性,如图 11(a)所示。对 0.1 s 探测时间内的回波信号功率谱进行非相干累加平均后,HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 探测系统风速估计的结果与设定值的偏差均降低了,如图 11(b)所示。为更直观地观察功率谱非相干累加对风速估计的影响,图 12 给出 900 m 探测距离处归一化功率谱非相干累加前后的曲线,得到 HPE-LPRF 系统的功率谱峰值对应的频率均为 53.91 MHz,LPE-HPRF 系统的功率谱峰值对应的频率分别为 171.88 MHz 和 54.69 MHz。而实际气溶胶运动产生的频率为 54.19 MHz,LPE-HPRF 系统的风速估计精度明显提高了。其中 LPE-HPRF 系统的回波信号信噪比较低,使得其归一化功率谱的基底噪声明显高于 HPE-LPRF 系统。

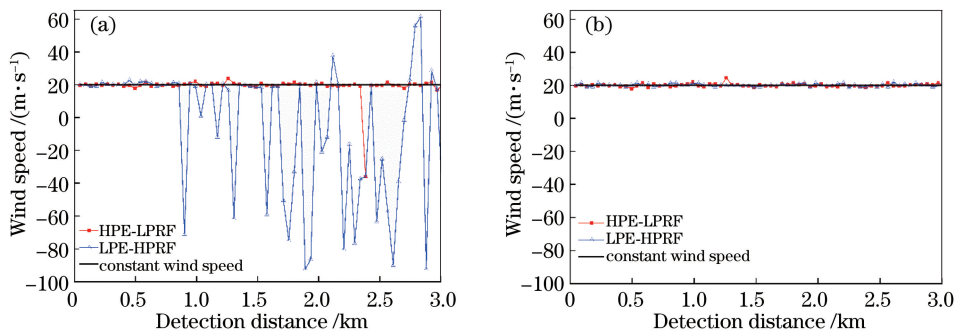


图 11 常风速情况下的风速反演结果。(a)单个脉冲;(b) 0.1 s 时间内多脉冲累加平均

Fig. 11 Velocity inversion estimation in constant wind speed. (a) Single pulse; (b) multi-pulse accumulation average in 0.1 s

在常风速探测环境条件下,表 2 给了在相同探测时间内、脉冲累加平均的脉冲数不同的情况下,估计风速值与设定值均方误差的大小。可以看出,随着脉冲数的增加,获取风速值的更新时间越来越长,径向风速估计的误差减小;在相同探测时间内、脉冲累加发数较少时,HPE-LPRF 探测系统的风速估计

精度较高;当累加脉冲发数增加时,HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 探测系统的风速估计精度均有所提高,其中 LPE-HPRF 探测系统较为显著;在探测时间为 0.1 s 时,LPE-HPRF 探测系统的风速估计精度达 0.75 m/s,而 HPE-LPRF 探测系统的风速估计精度为 0.93 m/s。

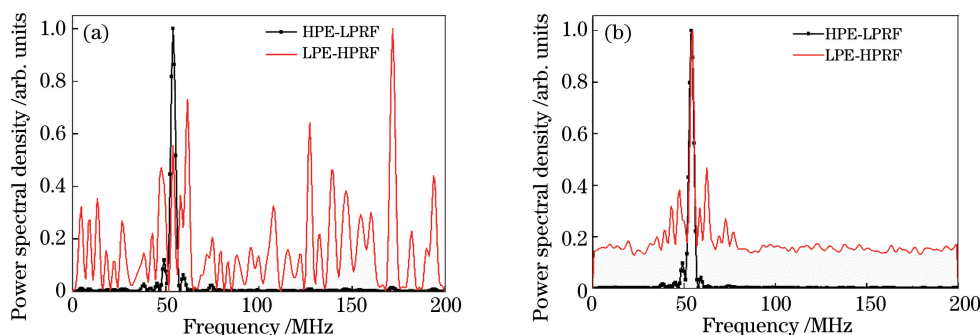


图 12 900 m 处的归一化功率谱分布。(a)单个脉冲;(b) 0.1 s 时间内多脉冲累加平均

Fig. 12 Normalized power spectral distribution at 900 m. (a) Single pulse; (b) multi-pulse accumulation average in 0.1 s

表 2 常风速情况下仿真实验结果

Table 2 Results of simulation experiment in constant wind speed

| Simulation time / s  | Number of pulses in incoherent accumulation |          | MSE between estimated wind speed and specified wind speed / (m · s <sup>-1</sup> ) |          |
|----------------------|---|----------|--|----------|
|                      | HPE-LPRF                                    | LPE-HPRF | HPE-LPRF   | LPE-HPRF |
| 2 × 10 <sup>-3</sup> | 1   | 20       | 47.97  | 612.79   |
| 1 × 10 <sup>-2</sup> | 5   | 100      | 1.01   | 13.81    |
| 0.1                  | 50  | 1000     | 0.93   | 0.75     |

接着将 NASA 阵风模型代入到相干测风激光雷达的系统仿真模型中进行定量分析。图 13 为在阵风模型下,两探测系统的风速反演结果。与常风速情况相似,在单脉冲下,相对 HPE-LPRF, LPE-

HPRF 探测系统的风速估计结果更精确,如图 13 (a)所示。对信号功率谱进行非相干累加平均后,两系统的风速估计结果与阵风模型的风速设定值的一致性得到了明显的改善,如图 13(b)所示。

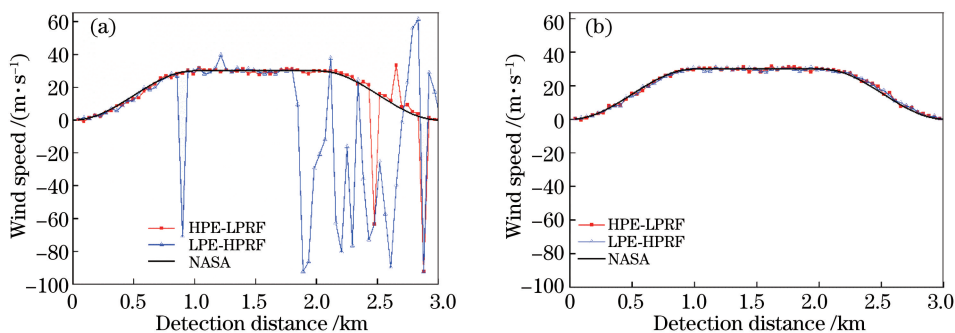


图 13 NASA 阵风模型下的风速反演结果。(a)单个脉冲;(b) 0.1 s 时间内多脉冲累加平均

Fig. 13 Velocity inversion estimation in NASA model. (a) Single pulse; (b) multi-pulse accumulation average in 0.1 s

进一步计算在阵风模型探测环境条件下风速估计值与设定值的均方误差,结果如表 3 所示。可以看出:当 LPE-HPRF 探测系统的累加脉冲发数增加至 1000 时,其风速估计精度达 1.03 m/s,此时 HPE-LPRF 探测系统累加脉冲发数为 50,对应风速

估计精度为 1.25 m/s;另外增加探测时间至 0.2 s 时,LPE-HPRF 和 HPE-LPRF 系统的风速估计误差分别为 1.06 m/s 和 1.24 m/s,相比 0.1 s 探测时间,反演风速的误差变化较小。由此可以看出,累加脉冲的发数越多,风速估计的误差并不是越小。



表 3 NASA 阵风模型下仿真实验结果

Table 3 Results of simulation experiment in NASA model

| Simulation time /s | Number of pulses in incoherent accumulation |          | MSE between estimated wind speed and specified wind speed / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |          |
|--------------------|---|----------|--|----------|
|                    | HPE-LPRF                                    | LPE-HPRF | HPE-LPRF   | LPE-HPRF |
| $2 \times 10^{-3}$ | 1   | 20       | 238.22   | 903.42   |
| $1 \times 10^{-2}$ | 5   | 100      | 1.47   | 12.82    |
| 0.1                | 50  | 1000     | 1.25   | 1.03     |
| 0.2                | 100   | 2000     | 1.24   | 1.06     |

## 5 结 论

结合相干测风激光雷达的工作原理,基于激光在大气中传输的大气分层理论,建立了全系统仿真模型。该模型不仅提供了系统器件参数优化选取的验证平台,也为风速反演算法的改进节约了成本。

利用所建立的系统仿真模型分析了在相同平均功率和探测条件情况下 HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 两种系统探测的差异。仿真结果表明:模拟仿真的回波信号信噪比与理论值有相同的变化趋势,验证了相干测风激光雷达的系统数值仿真模型的可靠性;在探测环境分别为常风速和 NASA 阵风模型下,虽然 HPE-LPRF 探测系统的回波信号信噪比较 LPE-HPRF 高了 2 个数量级,单脉冲下的风速估计误差较小,但远不能满足实际测量精度的要求;采用信号非相干累加方式对多发脉冲的回波信号功率谱进行累加平均处理后,HPE-LPRF 和 LPE-HPRF 探测系统反演的风速值与设定值的一致性均得到了明显的改善;在探测时间调整为 0.1 s 时,LPE-HPRF 探测系统在两种风速下的风速估计精度分别为 0.75 m/s 和 1.03 m/s,均高于 HPE-LPRF 探测系统的风速估计精度。

从以上分析结果可以看出,相干测风激光雷达为获得较高精度的风速反演结果,需要增加系统数据处理的时间,该最优化数据处理时间可通过所提仿真模型来确定。针对目前用于相干测风激光雷达中的高脉冲能量激光器并不成熟、成本较高等问题,在系统时间分辨率允许情况下,采用 LPE-HPRF 相干测风激光雷达系统能够保证较高的风速估计精度。由于大气传输模块中参与计算的气溶胶后向散射系数和透过率数据资料有限,因此所建立的系统仿真模型可以通过气溶胶相关参数的实测数据进行优化。同时,将该模型和相干测风激光雷达二维扫描方式相结合,对多个方位的径向风速分析结果进行矢量合成,可以进一步实现对不同系统三维风场探测性能的评估。

## 参 考 文 献

- [1] An Y Y, Zeng X D. Photoelectric detection principle [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 8.  
安毓英, 曾晓东. 光电探测原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 8.
- [2] Huffaker R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement[J]. Applied Optics, 1970, 9(5): 1026-1039.
- [3] Henderson S W, Ota K. Recent improvements in eyesafe, solid-state and coherent laser radar technology [J]. The Review of Laser Engineering, 1997, 25(1): 19-24.
- [4] Kavaya M J, Henderson S W, Magee J R, et al. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system [J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 776-778.
- [5] Fujii T, Fukuchi T. Laser remote sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [6] Lombard L, Dolfi-Bouteyre A, Besson C, et al. Long range wind lidars based on novel high spectral brilliance all-fibered sources [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9645: 96450B.
- [7] Jia X D. Development of 1.55  $\mu\text{m}$  coherent lidar for wind sensing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.  
贾晓东. 1.55  $\mu\text{m}$  相干测风激光雷达样机的研制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [8] Ma F M, Chen Y, Yang Z H, et al. Latest development of laser Doppler wind measurement technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180003.  
马福民, 陈涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180003.
- [9] Zhou Y Z, Wang C, Liu Y P, et al. Research progress and application of coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 020001.  
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56

- (2): 020001.
- [10] Yuan L C, Liu H, Liu J Q, et al. Wind vector estimation of coherent Doppler wind lidar based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810004.  
原禄城, 刘恒, 刘继桥, 等. 基于遗传算法的相干多普勒测风激光雷达风场反演方法 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0810004.
- [11] Wang P C, Chen T D, Zhou A R, et al. Wind velocity estimation algorithm based on Gaussian fitting in coherent lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 123006.  
王平春, 陈廷娣, 周安然, 等. 基于高斯拟合的相干激光雷达风速估计算法 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 123006.
- [12] Wang K X, Gao C Q, Lin Z F, et al. 1645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er:YAG laser [J]. Optical Express, 2020, 28(10): 14694-14704.
- [13] 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.
- [14] Pan J Y, Wu S Y, Liu G, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720-1724.  
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720-1724.
- [15] Bu Z C. Study on the system design and data processing algorithm for coherent Doppler wind lidar [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.  
步志超. 相干测风激光雷达系统设计及数据处理算法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [16] Bai X, Guo P, Chen S Y, et al. Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent Doppler wind lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0114003.  
白雪, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干多普勒测风激光雷达时域信号仿真及时频分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114003.
- [17] Li Y C. Research for 1.55  $\mu\text{m}$  acousto-optic frequency shifter characteristic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.  
李彦超. 1.55  $\mu\text{m}$  声光移频器特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [18] Salamitou P, Dabas A, Flamant P H. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar [J]. Applied Optics, 1995, 34(3): 499-506.
- [19] Siegman A E. The antenna properties of optical heterodyne receivers [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(10): 1350-1356.
- [20] Bu Z C, Zhang Y C, Chen S Y, et al. Noise modeling by the trend of each range gate for coherent Doppler LIDAR [J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 063109.
- [21] Rye B J, Hardesty R M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I. spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1993, 31(1): 16-27.
- [22] Rye B J, Hardesty R M. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. II. correlogram accumulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1993, 31(1): 28-35.
- [23] Wang C, Xia H Y, Liu Y P, et al. Spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar using joint time-frequency analysis [J]. Optics Communications, 2018, 424: 48-53.
- [24] Cariou J P, Sauvage L, Thobois L, et al. Long range scanning pulsed coherent lidar for real time wind monitoring in the planetary boundary layer [C] // Proceedings of 16th Coherent Laser Radar Conference, June 20-24, 2011, Long Beach, California, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [25] Jia X D, Sun D S, Shu Z F, et al. Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0301001.  
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301001.