

相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析

贾晓东 孙东松 舒志峰 张飞飞 夏海云

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026

摘要 利用脉冲能量为110 μJ 、重复频率为20 kHz及脉冲宽度为300 ns的光纤激光器设计了一套工作波长为1.55 μm 的相干测风激光雷达,给出了系统的性能参数。根据后向传播本振的原理计算出当望远镜对发射高斯光束的截断比为最优值0.823时,激光雷达的天线效率达到最大值0.422。在最优截断比条件下分析了望远镜口径对相干激光雷达载噪比的影响,优化了望远镜设计。从理论上计算出激光雷达的探测性能指标:探测距离大于3 km,风速测量范围为 ± 62 m/s,距离分辨率为84 m,风速测量精度优于0.1 m/s,时间分辨率为0.5 s。

关键词 遥感;相干激光雷达;天线效率

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0301001

Optimal Design of the Telescope in Coherent Lidar and Detection Performance Analysis

Jia Xiaodong Sun Dongsong Shu Zhifeng Zhang Feifei Xia Haiyun

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A fiber laser with pulse energy of 110 μJ , pulse repetition frequency of 20 kHz and pulse width of 300 ns is employed to develop the coherent lidar for wind sensing at 1.55 μm . The specifications of the main components employed to assemble the lidar are listed. By taking the advantage of the principle of back-propagated local oscillator (BPLO), the optimal truncation ratio of the telescope is calculated. The result shows that the optimal antenna efficiency of 0.422 is obtained when the truncation ratio arrives at 0.823. The effect of the aperture of the telescope on the carrier-to-noise ratio (CNR) of the coherent lidar is analyzed on the condition of the optimal truncation ratio. The design parameters of the telescope are optimized. The performance of the lidar is theoretically calculated and listed as follows: detection range is longer than 3 km; wind velocity range is ± 62 m/s; range resolution is 84 m; wind velocity accuracy is better than 0.1 m/s; time resolution is 0.5 s.

Key words remote sensing; coherent lidar; antenna efficiency

OCIS codes 010.0280; 010.3640

1 引 言

在区域大气风速的遥感中,脉冲相干激光雷达具有高精度、高时空分辨率的特点^[1],广泛应用于测量大气风廓线^[2]、风切变预警^[3-4]以及探测飞机尾流^[5-6]等,在天气预报、风能发电、航空航天、军事等领域有着重要的意义^[7-9]。

相干激光雷达理论的研究开始于20世纪60年代,是在美国国家航空航天局(NASA)和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的支持下由Thomson和其合作者建立^[10]。1968年,在NASA的资助下Jelalian等在美国雷神公司研制出了世界上第一台相干测风激光雷达——基于连续CO₂激光器的相干测风激光雷达系统^[11],

收稿日期:2014-09-28;收到修改稿日期:2014-10-21

基金项目:国家自然科学基金(41174130,41227804,41304123)

作者简介:贾晓东(1983—),男,博士研究生,主要从事相干激光雷达遥感方面的研究。E-mail: phydong@163.com

导师简介:孙东松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达遥感方面的研究。E-mail: sds@ustc.edu.cn

该系统是通过改变焦点深度获得距离分辨率,探测的距离一般为几百米。作为连续 CO₂激光雷达的一个应用,1970年,Huffaker等^[5,11]报道了利用气溶胶的后向散射信号测量机场跑道上空飞机的尾流。第一台脉冲相干激光雷达同样是由 NASA的资助下在美国雷神公司研制^[11],脉冲能量为 10 mJ,重复频率为 200 Hz,为商用航线提供晴空湍流的探测。该激光雷达于 1970年开始地面测试,1972年和 1973年安装在 NASA Convair 990飞机上做飞行测试,开始了机载相干测风激光雷达的应用。从 20世纪 80年代开始,美国相干技术公司先后研发了基于固体激光器的 1.06 μm相干测风激光雷达^[12]和基于 Tm, Ho:YAG激光器的 2.1 μm相干测风激光雷达^[3-4],分别用于测量大气风场和探测风切变。随着掺铒光纤放大器(EDFA)及光纤技术的发展,以及在 EDFA中使用大模场(LMA)光纤以避免光纤中的受激布里渊散射(SBS)等非线性效应,EDFA输出的激光脉冲能量和平均功率逐步提高^[13-15],工作于 1.55 μm的全光纤脉冲相干测风激光雷达受到学者的重视。其主要优点是:1)工作波长是人眼安全的,1.55 μm波段激光的最大允许曝光是 2.1 μm波段的 10倍,高出 1.06 μm波段 5个数量级^[16];2)光通信器件已发展很成熟,可以直接应用,降低成本^[17];3)全光纤结构,易于组装和集成,易于小型化、稳定化和商品化^[2,17]。日本 Mitsubishi公司从 2004年开始研发全光纤脉冲相干激光雷达的商用样机,2005年研制出商用化的 LR-05FC系列产品^[18]。法国 Leosphere公司于 2006年 12月发布了用于气象研究的 WINDCUBE系列产品。

国内方面也有 1.55 μm全光纤脉冲相干测风激光雷达的报道。中国电子科技集团第二十七研究所研发了一套全光纤相干多普勒激光测风雷达设备^[8],于 2012年 6月 5日进行外场实验。中国科学院上海光学精密机械研究所报道了用于边界层的全光纤相干测风激光雷达^[2],视向探测距离为 3 km,距离分辨率为 75 m,时间分辨率为 2 s,18000发激光脉冲累积时风速的测量精度为 0.22 m/s。然而,国内对波长为 1.55 μm全光纤脉冲相干测风激光雷达的报道,大多是集中于风场反演和算法处理方面,很少涉及到理论计算和参数优化。因而,从理论上进行数值计算、设计优化和性能分析,对研制激光雷达系统有着重要的实际意义。本文设计了一套 1.55 μm全光纤脉冲相干测风激光雷达,优化了望远镜设计,并给出了探测性能分析。

2 系统介绍

2.1 系统结构

全光纤脉冲相干激光雷达的结构如图 1所示,由种子脉冲激光器、脉冲光纤放大器、保偏光纤环行器、望远镜、保偏光纤耦合/分束器、平衡光电探测器、模/数(A/D)采集卡和工控机等组成。

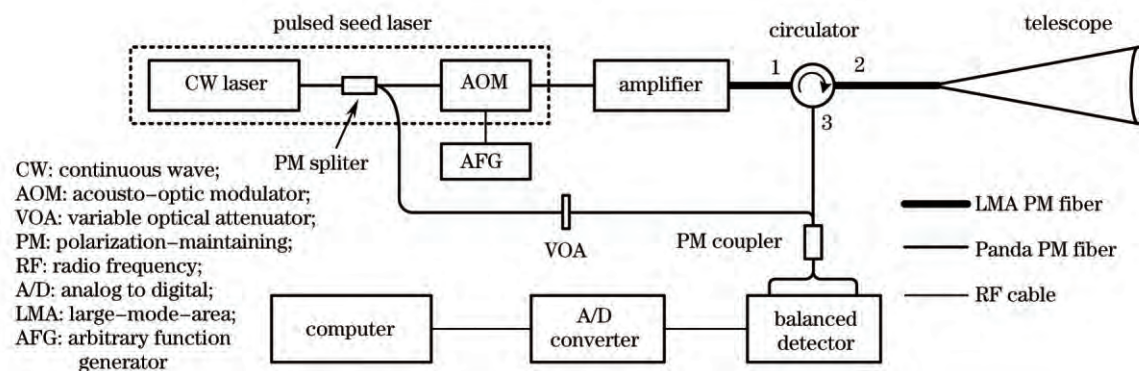


图 1 全光纤相干激光雷达原理图

Fig.1 Schematic diagram of all-fiber coherent lidar

2.2 工作原理

全光纤脉冲相干激光雷达工作时,连续种子激光器输出的线偏振连续激光经过保偏光纤分束器分成两部分,如图 1所示,一部分 CW 激光经过可调衰减器后作为本振光(LO)输入到保偏光纤耦合/分束器;另一部分 CW 激光经过声光调制器后被调制成激光脉冲并产生移频量 f_{AOM} 。激光脉冲经过脉冲光纤放大器功率放大后,经过保偏光纤环行器和望远镜发射到大气中。由于大气中气溶胶粒子的运动,激光脉冲与气溶胶粒子相互作用时,后向散射信号在望远镜的视向产生多普勒频移 f_D , $f_D = 2v_r/\lambda$,其中 λ 为激光脉冲的中心

波长, v_r 为视向风速, 当 v_r 的方向与望远镜的视向相反时 f_D 的符号为正, 反之为负。后向散射信号在保偏光纤耦合/分束器与本振光相干(又称拍频)。相干后的信号由平衡光电探测器转换成模拟射频信号, 用 A/D 采集卡把模拟信号转换成数字信号, 通过周期图和脉冲累积的方式计算出射频信号的频率 f_{RF} , $f_{RF} = f_{AOM} + f_D$ 。由于声光调制器的移频量 f_{AOM} 已知, 根据公式 $v_r = f_D \lambda / 2$ 和激光脉冲的飞行时间 Δt 可以计算出不同距离门 ΔR ($\Delta R = \Delta t c / 2$, 其中 c 为光在真空中的速度) 处的视向风速 v_r 。

3 系统参数

全光纤脉冲相干激光雷达使用的器件的参数如表 1 所示, 表中 CMRR 为共模抑制比。激光器采用主振荡功率放大器(MOPA)结构, 经过功率放大后激光脉冲的峰值功率为 367 W。对于高功率、窄线宽光纤激光器, 当峰值功率超过 SBS 的阈值时, 光纤中的 SBS 等非线性效应将限制激光功率的输出和损坏光纤器件^[6,13-14,18]。通过缩短光纤的长度和增加光纤模场直径等方法可以避免 SBS^[6,13]。因此, 为避免光纤中的 SBS 等非线性效应^[19-20], 采用长度为 30 cm、纤芯直径为 25 μm 的 LMA 保偏光纤输出。为了减小激光器与保偏光纤环行器(1 端和 2 端同样是 25 μm 的 LMA 保偏光纤)之间的连接损耗以及防止高功率的激光脉冲损伤光纤端面, 将激光器的输出光纤与保偏光纤环行器 1 端口的输入光纤直接熔接起来。

表 1 全光纤脉冲相干激光雷达的主要技术参数
Table 1 Main parameters of the all-fiber pulsed coherent lidar

	Parameter	Symbol	Value
Fiber laser	Wavelength /nm	λ	1550
	Energy / μJ	E_T	110
	Pulse repetition frequency /kHz	f_{PRF}	20
	Pulse width /ns	ΔT	300
	Peak power /W	P_{peak}	367
	Linewidth /kHz	Δf_{LW}	5
	AOM shifted frequency /MHz	f_{AOM}	80
PM fiber circulator	Insertion loss, port 1-2 /dB	L_{12}	1.5
	Insertion loss, port 2-3 /dB	L_{23}	1.5
	Directivity, port 1-3 /dB	D_{13}	50
Balanced photodetector	Responsivity at 1550 nm /(A/W)	\mathcal{R}	1.0
	3 dB bandwidth /MHz	f_{BW_D}	350
	CMRR /dB	R_R	25
	Transimpedance gain /(V/A)	G	1×10^4
A/D converter	Resolution /bit	N_{BIT}	16
	Sampling rate /MHz	f_s	500
	3 dB bandwidth /MHz	f_{BW_S}	250

4 望远镜的优化

脉冲相干激光雷达的风速测量精度由其接收机接收的射频信号的宽带载噪比(CNR)决定。在忽略湍流影响的条件下, 散粒噪声极限时收发同置的脉冲相干激光雷达的宽带载噪比的表达式为^[9,21]

$$L_{CNR}(R) = \eta_{\text{Total}} \eta_a(R) \frac{T^2 E_T c \beta_A \pi D_{\text{Tele}}^2}{h \nu B 8 R^2}, \quad (1)$$

式中 η_{Total} 为系统总的效率, T 为大气的透射率, E_T 为激光脉冲的能量, c 为光在真空中的速度, β_A 为气溶胶的后向散射系数, D_{Tele} 为望远镜的口径, h 为普朗克常量, ν 为激光脉冲的中心频率, B 为接收机的带宽, $\eta_a(R)$ 为距离 R 处的天线效率。

在计算天线效率时, 为了减少积分计算的复杂性, 一般利用后向传播本振(BPLO)的原理^[9-10,22], 即把本振

光按照气溶胶后向散射的路径反向传播到气溶胶平面,如图2所示,图中 D_0 为高斯光束的 e^{-2} 直径。发射的激光脉冲(聚焦于无穷远处)为高斯光束,在望远镜的出瞳平面内功率归一化的表达式为

$$u_T(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2)$$

式中 ω_0 为发射高斯光束的 e^{-2} 半径。由于高斯光速传播时遇到望远镜会截断,定义截断函数为

$$W(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1, & |\mathbf{r}| \leq D_{\text{Tele}}/2 \\ 0, & |\mathbf{r}| > D_{\text{Tele}}/2 \end{cases} \quad (3)$$

因此,在非涅耳衍射的近似条件下气溶胶平面内发射光束的场分布为

$$u_T(\boldsymbol{\rho}) = \int_{-\infty}^{\infty} u_T(\mathbf{r})W(\mathbf{r})G(\boldsymbol{\rho},\mathbf{r},R)d\mathbf{r}, \quad (4)$$

式中 $G(\boldsymbol{\rho},\mathbf{r},R)$ 为自由空间的格林函数,表示为

$$G(\boldsymbol{\rho},\mathbf{r},R) = \frac{k}{j2\pi R} \exp\left[j\frac{k}{2R}(\boldsymbol{\rho}-\mathbf{r})^2\right], \quad (5)$$

其中, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, \mathbf{r} 为望远镜出瞳平面的矢量坐标, $\boldsymbol{\rho}$ 为气溶胶平面的矢量坐标。本振光在望远镜的出瞳处功率归一化的表达式为

$$u_L(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1/\sqrt{\pi(D_{\text{Tele}}/2)^2}, & |\mathbf{r}| \leq D_{\text{Tele}}/2 \\ 0, & |\mathbf{r}| > D_{\text{Tele}}/2 \end{cases} \quad (6)$$

同理,气溶胶平面内本振光的场分布为

$$u_L(\boldsymbol{\rho}) = \int_{-\infty}^{\infty} u_L(\mathbf{r})G(\boldsymbol{\rho},\mathbf{r},R)d\mathbf{r}. \quad (7)$$

因此,在目标平面天线效率的表达式为^[22-24]

$$\eta_a(R) = \frac{(\lambda R)^2}{\pi(D_{\text{Tele}}/2)^2} \int_{-\infty}^{\infty} |u_T(\boldsymbol{\rho})|^2 |u_L(\boldsymbol{\rho})|^2 d\boldsymbol{\rho}^2 = \frac{16}{\rho_T^2} \int_0^1 J_1^2\left(\frac{2\rho}{r_n}\right) \int_0^1 \exp\left(-\frac{h^2}{\rho_T^2}\right) J_0\left(\frac{2\rho h}{r_n}\right) h dh \left| \frac{d\rho}{\rho} \right., \quad (8)$$

式中 $r_n = 2\lambda R/\pi D_{\text{Tele}}$, $J_0(x)$ 和 $J_1(x)$ 分别是第一类0阶和1阶贝塞尔函数, ρ 为目标平面内极坐标系的极径, ρ_T 为望远镜对高斯光束的截断比,表示为

$$\rho_T = \frac{D_0}{D_{\text{Tele}}}. \quad (9)$$

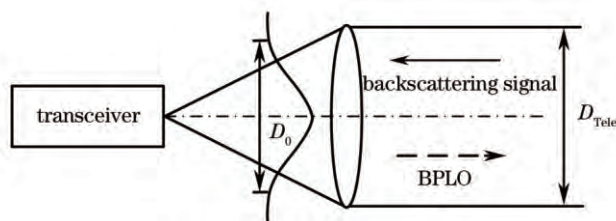


图2 望远镜的截断与BPLO

Fig.2 Truncation of the telescope and the BPLO

4.1 截断比对天线效率的影响

由(8)式可知,天线效率 $\eta_a(R)$ 是距离 R 和截断比 ρ_T 的函数。远场条件下对于某一固定的距离 R , 天线效率 η_a 随截断比 ρ_T 变化的曲线如图3所示,当截断比 ρ_T 为0.823时,天线效率取得最大值 $\eta_{a_{\text{max}}}$ 为0.422^[9]。由(1)式可知,系统的宽带载噪比正比于天线效率,最大化天线效率也就意味着最大化系统的载噪比。因此在设计望远镜的参数时,使望远镜对发射高斯激光光束的截断比为0.823。

4.2 望远镜口径对载噪比的影响

由(1)式可知,脉冲相干激光雷达的载噪比是望远镜口径 D_{Tele} 和距离 R 的函数,(1)式参数的数值如表2所示。由(1)式计算的载噪比随距离变化的曲线如图4所示。

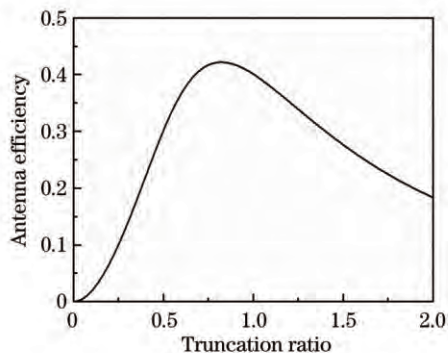


图3 天线效率随截断比变化的曲线

Fig.3 Curve of antenna efficiency versus truncation ratio

表2 截噪比公式中参数的数值

Table 2 Parameter value in CNR equation

Parameter	Symbol	Value
Total efficiency	η_{Total}	0.241
Atmospheric transmittance /(%/km)	T	96
Pulse energy / μJ	E_T	110
Speed of light /(m/s)	c	2.998×10^8
Aerosol backscatter coefficient /($\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)	β_A	2.5×10^{-7}
Planck's constant /(J·s)	h	6.626×10^{-34}
Laser frequency /THz	ν	193.55
Receiver bandwidth /MHz	B	100

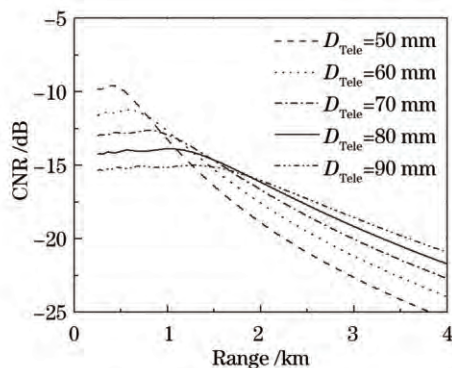


图4 载噪比随着距离变化的曲线

Fig.4 Curves of CNR versus range

由图4可知,在0.6 km的距离范围内载噪比曲线的变化比较平缓,载噪比随着望远镜的口径的增加而降低。超过0.6 km时,50 mm口径望远镜对应的载噪比开始迅速下降,在0.8 km处低于60 mm口径望远镜。同样,60 mm口径望远镜和70 mm口径望远镜对应的载噪比分别在1.1 km和1.5 km处开始低于80 mm口径望远镜。对于80 mm口径望远镜,虽然载噪比在1.9 km处开始低于90 mm口径望远镜,但之后两者之间的差别比较小,在3 km处为0.6 dB,并且在0.2~1.3 km距离范围内前者高出后者1.0 dB。因此,探测距离为3 km时,推荐选用80 mm口径的望远镜。在这种情况下,由(9)式可知,在望远镜的出瞳处发射激光脉冲的光斑直径 D_0 应为65.84 mm。

5 性能分析

脉冲相干测风激光雷达的主要性能参数包括探测距离、风速测量范围、距离分辨率、风速测量精度和时间分辨率等。根据第3节和第4节设计的全光纤脉冲相干测风激光雷达的参数,可以在理论上计算出激

光雷达的性能指标。

5.1 距离分辨率

脉冲相干激光雷达的距离分辨率为^[25]

$$\Delta R = \Delta r + \Delta p, \tag{10}$$

式中 $\Delta r = \Delta Tc/2, \Delta p = MT_s c/2, M$ 为采样点数, $T_s = 1/f_s$ 为采样间隔。当 $M = 128$ 时, $\Delta R = 45 \text{ m} + 38.4 \text{ m} = 83.4 \text{ m}$ 。因此,激光雷达的距离分辨率为 83 m。

5.2 风速测量精度、探测距离及时间分辨率

相干激光雷达中利用气溶胶的后向散射信号估计风速时一般使用最大似然比(ML)的离散谱峰值(DSP)估计^[26-28],即风速引起的多普勒频率的最大似然解就是周期图的最大值对应的频率。在一个探测距离门内 M 个采样点的周期图定义为^[21-29]

$$P(m) = \frac{T_s}{M} \left| \sum_{k=0}^{M-1} z_k \exp\left(-\frac{j2\pi km}{M}\right) \right|^2, m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \tag{11}$$

式中 z_k 为探测距离门内 A/D 采集卡输出的第 $k(k=0, 1, \dots, M-1)$ 个电压。根据在接收机端一个激光脉冲内风速的多普勒谱分布随从高斯线型并且统计独立,噪声为白噪声,则 N 发激光脉冲累积情况下的周期图为^[29]

$$P_A(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(m), \tag{12}$$

式中 $P_i(m)$ 为距离门内第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 发激光脉冲的周期图。

对于 ML DSP 估计,当 M 趋于无穷大时估计的性能接近 Cramer-Rao 下界^[30-31](CRLB)。因此,可以用 CRLB 近似地估计风速测量误差。风速估计标准差的 CRLB 为^[27-28, 30-31]

$$v_{\text{CRLB}} = \frac{\lambda f_s}{2} \frac{w}{\sqrt{NM}} \left\{ \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\left(\frac{f}{w}\right)^2}{\left\{ 1 + \left[\frac{L_{\text{CNR}}}{\sqrt{2\pi} w} \exp\left(-\frac{f^2}{2w^2}\right) \right]^2 \right\}^2} df \right\}^{-1/2}, \tag{13}$$

式中 f 为归一化频率, w 为发射激光脉冲的归一化谱宽, $w = \Delta w / f_s$, 其中 Δw 为发射激光脉冲的谱宽,

$$\Delta w = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2} \pi \Delta T}. \tag{14}$$

根据(13)式可以分别计算出在 $N=100, 1000, 10000$ 的条件下风速估计标准差的 CRLB,如图 5 所示。由图 4 可知,在 3.0 km 处激光雷达的宽带截噪比为 -19.15 dB,因此在 100、1000、10000 发激光脉冲累积的情况下风速的测量精度分别为 0.06、0.02、0.006 m/s。因而,在 3.0 km 以内脉冲累积的发数大于 100 发时风速测量精度小于 0.1 m/s,因此该激光雷达的探测距离大于 3 km。由于激光脉冲的重复频率 f_{PRF} 为 20 kHz,所以在累积激光脉冲为 100、1000、10000 发时测量风速的时间分辨率分别为 0.005、0.05、0.5 s。

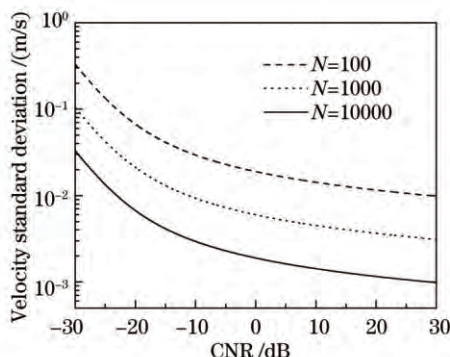


图 5 ML DSP 估计的 CRLB

Fig.5 CRLB of the ML DSP estimator

5.3 风速测量范围

根据多普勒频率与风速的关系 $f_D = 2v_r/\lambda$ 以及 AOM 的移频量 f_{AOM} 、探测器的 3 dB 带宽 f_{BW_D} 、A/D 采集的 3 dB 带宽 f_{BW_S} , 以及为了能够分辨出视向风速的方向, 要求 $|f_D| < f_{AOM}$, 所以有 $v_r = f_{AOM}\lambda/2$, 因此, 可以计算出风速的测量范围为 ± 62 m/s。

5.4 激光雷达的探测性能指标

根据以上对设计的脉冲相干激光雷达的计算和分析可得出, 该雷达的探测性能指标如表 3 所示。

表 3 激光雷达的探测性能指标

Table 3 Detection performance of the lidar

Parameter	Value
Range /km	3
Wind velocity range /(m/s)	± 62
Range resolution /m	84
Wind velocity accuracy /(m/s)	0.1
Time resolution /s	0.5

6 结 论

设计了一套 1.55 μm 全光纤脉冲相干测风激光雷达, 给出了使用器件的主要的技术参数。为了避免高功率激光脉冲引起的 SBS 等非线性效应, 发射端采用光纤芯径为 25 μm 的 LMA 保偏光纤, 并且与保偏光纤环形器直接熔接在一起。根据 BPLO 原理计算出了望远镜最优的截断比、天线效率和宽带载噪比, 优化了望远镜的参数。这些最优的参数是在忽略湍流的条件下计算得出的, 在实际过程中还应考虑湍流对天线效率和宽带载噪比的影响。由于相干探测对激光的波前比较敏感, 因此还应要求望远镜有较低的波前畸变。在设计参数的基础上, 从理论上计算和分析了激光雷达的技术指标。为设计和研发脉冲相干测风激光雷达提供理论依据和指导意义。所描述的测风激光雷达只做了视向(径向)的探测分析, 在这基础上, 增加二维扫描装置可实现上半天空矢量风场的探测。按照所设计的参数, 课题组正在准备搭建该脉冲相干测风激光雷达, 届时将激光雷达实测数据与理论计算对比。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, *et al.*. Development of Doppler wind lidar [J]. *Journal of 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.
- 2 Diao Weifeng, Zhang Xin, Liu Jiqiao, *et al.*. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(7): 072801.
- 3 Russell Targ, Michael J Kavaya, R Milton Huffaker, *et al.*. Coherent lidar airborne windshear sensor: performance evaluation [J]. *Appl Opt*, 1991, 30(15): 2013–2026.
- 4 Russell Targ, Bruce C Steakley, James G Hawley, *et al.*. Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 μm [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(36): 7117–7127.
- 5 R M Huffaker, A V Jelalian, J A L Thomson. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(3): 322–325.
- 6 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 J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 441–450.
- 7 Zhang Feifei, Xia Haiyun, Sun Dongsong. Speed detection of hard targets based on 1.55 μm coherent lidar systems [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 602–606.
张飞飞, 夏海云, 孙东松. 1.55 μm 相干激光雷达系统的硬目标速度探测[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 602–606.
- 8 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.

- 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.
- 9 T Fujii, T Fukuchi. Laser Remote Sensing [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2005. 472-523.
- 10 R G Frehlich, Michael J Kavaya. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence [J]. Appl Opt, 1991, 30(36): 5325-5352.
- 11 R M Huffaker, R M Hardesty. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO₂ coherent laser systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 181-204.
- 12 Michael J Kavaya, Sammy W Henderson, James R Magee, *et al.*. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system [J]. Opt Lett, 1989, 14(15): 776-778.
- 13 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): 63-92.
- 14 V Philippov, C Codemard, Y Jeong, *et al.*. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. Opt Lett, 2004, 29(22): 2590-2592.
- 15 Pu Lili, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Receiving characteristics of coherent lidar under partially coherent condition [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1228002.
濮莉莉, 周 煜, 孙剑锋, 等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1228002.
- 16 J P Cariou, B Augere, M Valla. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology [J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(2): 213-223.
- 17 S Kameyama, T Ando, K Asaka, *et al.*. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1953-1962.
- 18 T Ando, S Kameyama, Y Hirano. All-fiber coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental science, 2008, 1(1): 012011.
- 19 R Parvizi, S W Haruna, N M Ali, *et al.*. Investigation on threshold power of stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(13): 1149-1152.
- 20 C C Lee, S Chi. Measurement of stimulated-Brillouin-scattering threshold for various types of fibers using Brillouin optical-time-domain reflectometer [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(6): 672-674.
- 21 Liu Yuan, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. An all-fiber signal frequency laser for eye-safe coherent doppler wind lidar [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1857-1860.
刘 源, 刘继桥, 陈卫标. 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1857-1860.
- 22 Yanzeng Zhao, Madison J Post, R Michael Hardesty. Receiving efficiency of monostatic pulsed coherent lidars. 1: Theory [J]. Appl Opt, 1990, 29(28): 4111-4119.
- 23 Yanzeng Zhao, Madison J Post, R Michael Hardesty. Receiving efficiency of monostatic pulsed coherent lidars. 2: Applications [J]. Appl Opt, 1990, 29(28): 4120-4132.
- 24 B J Rye, R G Frehlich. Optimal truncation and optical efficiency of an apertured coherent lidar focused on an incoherent backscatter target [J]. Appl Opt, 1993, 31(15): 2891-2899.
- 25 R G Frehlich, M J Yadlowsky. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(5): 1217-1230.
- 26 R Michael Hardesty. Performance of a discrete spectral peak frequency estimator for Doppler wind velocity measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE-24(5): 777-783.
- 27 B J Rye, R Michael Hardesty. 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.
- 28 B J Rye, R Michael Hardesty. 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.
- 29 A V Oppenheim, R W Schaffer, J R Buck. Discrete-Time Signal Processing [M]. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 731-738.
- 30 M Joseph Levin. Power spectrum parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, 11(1): 100-107.
- 31 Rod Frehlich. Cramer-Rao bound for Gaussian random processes and applications to radar processing of atmospheric signals [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(6): 1123-1131.