

相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计

张楠楠^{1,2}, 韩於利^{1,2}, 陈廷娣^{1,2}, 孙东松^{1,2}, 周安然^{1,2}, 韩飞^{1,2}

¹中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 提出了一种能在高海拔区域工作的相干光路的直接探测多普勒激光雷达系统。系统设计借鉴了相干测风激光雷达系统的光路,利用大气分子散射光进行风速测量,采用偏振分光棱镜和 1/4 波片组成光开关,配合收发合置的望远镜,简化了直接探测系统的光路,提高了光路稳定性;采用腔长固定式的标准具,脉冲激光器波长为可调谐,经优化,调谐范围约 10 GHz,完成了系统的仿真设计和设备选型工作。

关键词 遥感; 激光雷达; 可调谐激光器; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1010005

Design of Direct Detection Doppler Lidar with Coherent Light Path

Zhang Nannan^{1,2}, Han Yuli^{1,2}, Chen Tingdi^{1,2}, Sun Dongsong^{1,2}, Zhou Anran^{1,2}, Han Fei^{1,2}

¹School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A direct detection Doppler lidar system with coherent light path which can work in high altitude area is proposed. Design of the optical path system is improved on the basis of coherent lidar system, the atmospheric molecular scattering light is used for wind speed measurement. The optical path of direct detection system is simplified by photoswitch and monostatic telescope. The photoswitch is composed of polarization splitting prism and 1/4 wave plate. The stability of optical path is improved. The etalon with fixed cavity length is adopted. The wavelength of pulse laser is tunable. The tuning range is about 10 GHz after optimization. The simulation design and equipment selection of the system are completed.

Key words remote sensing; lidar; tunable laser; Fabry-Perot interferometer

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 010.3640

1 引言

多普勒测风激光雷达因具有高分辨率、高精度、大探测范围,能提供三维风场信息能力等优点,在气候研究和天气预报等方面有着重要的应用^[1],引起了多个国家的关注和重视,并投入了大量的人力、物力进行研究。为了实现大气的全球观测,需要针对不同的大气环境采用不同的探测手段,目前多普勒测风激光雷达技术按探测方式主要分两种:利用气溶胶后向散射信号的相干测量技术^[2-4]和利用大气分子后向散射信号的非相干(直接探测^[5])技术。目前地基及地面移动平台多普勒测风雷达已经有很多成熟产品,然而对于高空飞行的对风速变化敏感的设备(如无人机和飞艇等)也有装载激光雷达的需求,许多国家已在开展这方面的研究。

多中心机载大气风场相干测量传感器(MACAWS)系统^[6]由美国国家航空航天局(NASA)全球水文气

收稿日期: 2017-03-11; **收到修改稿日期:** 2017-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(41227804, 41374156)

作者简介: 张楠楠(1989—),男,硕士研究生,主要从事测风激光雷达及光电探测方面的研究。

E-mail: znn0626@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测、激光雷达遥感等方面的研究。

E-mail: sds@ustc.edu.cn

候研究中心的大气遥感工作组、NASA 马歇尔空间飞行中心(MSFC)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)环境技术实验室(ETL)以及 NASA 喷气动力实验室(JPL)合作研制,该系统装载于飞机上,工作方式为脉冲多普勒激光雷达,可测量对流层和同温层的三维风场及气溶胶散射分布。该系统为气候研究和水文模型以及对未来的星载测风激光雷达进行功能预演,并积累研制经验。系统的仪器和设计大部分是源于原有的实验测量系统和车载多普勒激光雷达 Windvan,因而可以说高空平台搭载是星载必须经历的一个过程;德法合作开发的多普勒激光雷达用于测量中尺度大气风场,该项目同时也是为欧洲航天局(ESA)的大气动力任务(ADM)计划中的星载测风激光雷达 ALADIN 系统作预研。该激光雷达系统采用 $10.64 \mu\text{m}$ 波长激光器,激光的发射和接收在飞机底部,可以在与天底角夹角 30° 范围内扫描,测得飞机飞行高度以下的三维风场;将改装后的高光谱分辨率多普勒雷达(HRDL)系统^[7]安装在德国航空航天研究中心(DLR)的 Falcon 飞机上,一同与差分吸收雷达(DLR-DIAL)的水汽雷达系统进行了飞行测量实验,目的在于测量边界层的水平和垂直风速结构,以及测量水汽通量剖面。该系统采用波长为 $2.0218 \mu\text{m}$ 的激光,脉冲能量为 1.5 mJ ,激光的重复频率为 200 Hz 。

可见,目前国际上机载测风激光雷达大都采用相干多普勒测量技术,即测量气溶胶粒子散射信号,然而在海拔空间已经基本无气溶胶粒子,故只能利用大气分子散射光进行风速测量(即直接探测)。基于本实验室多年相干和直接测风激光雷达研发经验,本文介绍了一种相干光路的直接探测多普勒激光雷达,该系统结合了相干^[8]和非相干激光雷达系统各自的优势,具有光学效率高、光路稳定性好以及可对无气溶胶的高海拔空间进行探测等优点。考虑到平台搭载甚至将来卫星搭载的要求,对系统光路及测量设备进行了针对性的优化设计。

2 测量原理

2.1 大气散射

2.1.1 分子后向散射系数

大气中气体分子直径在 10^{-10} m 量级上,激光波长为 $3.547 \times 10^{-7} \text{ m}$,可见气体分子尺度远小于激光波长,因而两者相互作用会发生瑞利散射。在 20 km 高度处,干净的大气中激光雷达能探测到的只有大气中的空气分子,瑞利散射的强度与探测区域的分子数量、激光波长、大气温度和压强等有关。依据美国标准大气模型^[9],分子的后向散射系数可由下式决定:

$$\beta(z, \lambda) = 1.1706 \times 10^{-23} \times \frac{273}{T(z)} \cdot \frac{P(z)}{1013} \cdot \left(\frac{10^7}{\lambda}\right)^{4.0117}, \quad (1)$$

式中 z 为海拔高度(m), $T(z)$ 为 z 高度处的大气温度(K), $P(z)$ 为 z 高度处的大气压力(hPa), λ 为激光波长(nm)。

大气的温度和压力廓线可由大气模型得到,根据(1)式可得到不同激光波长的分子后向散射系数曲线,图1所示为 354.7 nm 激光的大气后向散射系数。从(1)式中可以看出,后向散射的强度与激光波长 λ 的 4.0117 次方成反比,波长短的激光散射要强很多,激光雷达一般工作在紫外和可见波段。同时,海拔高度越

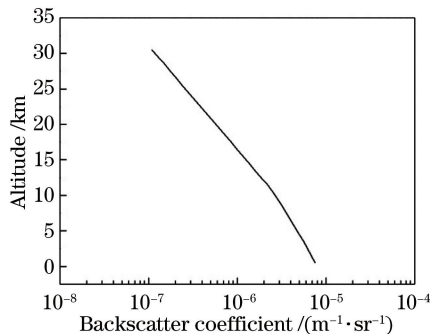


图1 激光波长为 354.7 nm 时的大气分子后向散射系数

Fig. 1 Atmospheric molecular backscatter coefficient with the laser wavelength of 354.7 nm

高,大气分子越稀疏,后向散射系数也越低。本系统工作波长为 354.7 nm,装在海拔 20 km 的工作设备平台上,进行水平风速测量,因此视场范围内分子后向散射可由(1)式求得,为一常量。

2.1.2 分子散射谱

出射激光具有很窄的谱线宽度,由于大气分子具有无规则热运动的特性,被大气分子后向散射的激光频谱会产生多普勒增宽,接收到的激光谱线为高斯型,其半峰全宽(FWHM)可用下式表示^[10]:

$$\delta_{\nu_{\text{ray}}}(T) = \sqrt{\frac{32 \cdot \ln 2 \cdot k \cdot T}{\lambda^2 \cdot m}}, \quad (2)$$

式中 λ 为出射激光中心波长, m 为分子质量, T 为大气分子温度, k 为玻尔兹曼常数。考虑出射激光的谱宽度 $\delta_{\nu_{\text{laser}}}$ 的影响,系统接收到的气体分子散射激光谱为

$$S(\nu) = \sqrt{\frac{4 \cdot \ln 2}{\pi \cdot [\delta_{\nu_{\text{laser}}}^2 + \delta_{\nu_{\text{ray}}}(T_0)]^2}} \cdot \exp\left[\frac{-4 \cdot \ln 2 \cdot \nu^2}{\delta_{\nu_{\text{laser}}}^2 + \delta_{\nu_{\text{ray}}}(T_0)}\right], \quad (3)$$

式中 ν 为散射光的频率。通过查美国标准大气模型可得 20 km 高度处温度为 216.6 K,出射激光频谱宽度为 150 MHz,可计算得到分子后向散射信号的谱分布如图 2 所示。

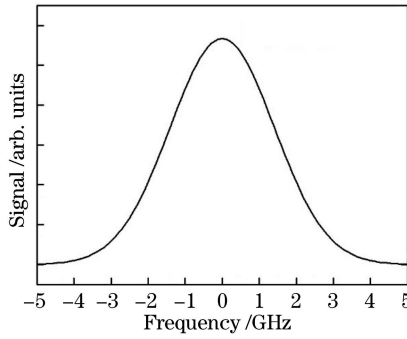


图 2 大气分子后向散射谱分布

Fig. 2 Backscatter spectrum distribution of atmospheric molecular

2.2 标准具方程

大气分子的散射光各个方向均有,然而只有后向散射的光子可以最终到达接收装置,接收机为法布里-珀罗(F-P)标准具,主要由两块平行放置的石英板组成,板的内表面镀有反射膜,光入射到标准具上,在两个平板之间产生多光束干涉。

设计采用固定式标准具,即两平行板相对位置固定,通过调节激光器的频率扫描得到标准具的透射率曲线。根据不同频率的光通过标准具的透射率不同,标准具透射率随入射光频率的变化用标准具方程表示^[10]:

$$h(\nu) = \frac{T_P}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \times \sin\left[\pi \times \frac{\nu}{R_{FS}} \times \cos(\delta_\theta)\right]^2}, \quad (4)$$

式中 T_P 为标准具峰值透射率, F 为标准具的有效精细度, R_{FS} 为自由谱间距, δ_θ 为入射光束发散角。系统采用三通道标准具,含两个信号通道和一个锁定用通道^[10]。

2.3 透射率曲线

标准具的透射率不仅与标准具参数有关,还与进入到标准具的信号光有关,信号光谱由分子散射谱、出射激光谱线及标准具方程三者卷积得到,标准具的透射率函数^[10-11]如下:

$$T_R(\nu) = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \otimes S(\nu), \quad (5)$$

式中 $h(\nu)$ 为标准具方程, $f_L(\nu)$ 为激光发射谱线; $S(\nu)$ 为分子后向散射谱[(3)式]。

2.4 风速反演方法

如图 3 所示,利用频谱分布相同而中心频率分开的两个 F-P 标准具(etalon 1 和 etalon 2)作为边缘滤波器,两个标准具的透射率位于瑞利散射谱的两翼。另外,由于 etalon 1 和 etalon 2 的透射率分得很开,交点

处的速度灵敏度较低,为了提高测量精度,采用第三个 F-P 标准具(etalon L)作为单边缘滤波器测量并锁定发射激光频率。该标准具的频谱分布与其他两个相同,而半峰全宽的位置正好位于其他两个标准具频谱的交叉点处。实际测量时将发射激光频率锁定在 etalon L 透射率的半峰全宽处,即 etalon 1 和 etalon 2 透射率的交叉点附近,并准确测出发射激光频率。假定输入光强相同并且发射激光频率严格位于透射率的交点处,若大气后向散射信号没有发生多普勒频移,则 etalon 1 和 etalon 2 的输出光强相同,如图 3(a)中阴影部分的面积所示;若大气后向散射信号由于风场作用产生了多普勒频移,则 etalon 1 和 etalon 2 的输出光强中一个减小,另一个增大,如图 3(b)中阴影部分的面积所示。通过这两个边缘通道(EDGE)信号的比值,可以反演出后向散射光的频率,而多普勒频移为后向散射光的频率与发射激光频率的差值。

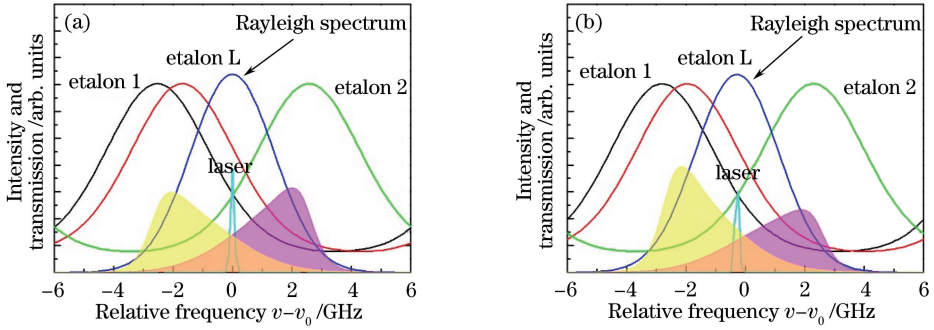


图 3 基于 F-P 标准具的瑞利多普勒测量原理。(a)无多普勒频移时;(b)有多普勒频移时

Fig. 3 Rayleigh Doppler measurement principle based on F-P etalon. (a) Without Doppler frequency shift; (b) with Doppler frequency shift

假定望远镜接收到的分子后向散射光强度为 I_R , 标准具两个通道分光能量比分别为 a_1 和 a_2 , 则两个通道的能量(即图 3 中阴影部分的面积)可由下式求得^[12-13]:

$$\begin{cases} I_{R1} = a_1 I_R T_{R1} (v_0 + v_d) \\ I_{R2} = a_2 I_R T_{R2} (v_0 + v_d) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 v_d 为多普勒频移, v_0 为出射激光中心波长; I_{R1} 和 I_{R2} 分别为两信号通道接收到的光能量, T_{R1} 和 T_{R2} 分别为标准具两信号通道透射率。

定义频率响应函数如下:

$$R(v) = \frac{I_{R1} - I_{R2}}{I_{R1} + I_{R2}}, \quad (7)$$

则 $R(v)$ 的频率灵敏度可表示为

$$\Theta_v = \frac{1}{R_v} \frac{dR(v)}{dv}, \quad (8)$$

式中 R_v 为频率响应函数。从而:

$$v_d = \frac{R(v_0 + v_d) - R(v_0)}{R(v_0)\Theta_v |_{v=v_0}}, \quad (9)$$

最终可得径向风速为

$$V_r = \frac{\lambda}{2} v_d = \frac{\lambda}{2} \frac{R(v_0 + v_d) - R(v_0)}{R(v_0)\Theta_v |_{v=v_0}}. \quad (10)$$

从(10)式可看出,只需探测得到标准具两个通道的能量,即可反演出径向风速。

假定参考信号很强,对激光发射频率 v_0 可准确测量,从而忽略仪器本身造成的误差,则径向风速的测量误差可表示为

$$\epsilon_v = (\Theta_v \cdot R_{SN})^{-1}, \quad (11)$$

式中 R_{SN} 为测量频率响应函数的信噪比,可表示为

$$R_{SN} = (R_{SN1}^{-2} + R_{SN2}^{-2})^{-1/2}, \quad (12)$$

式中 R_{SN1} 和 R_{SN2} 分别为 1 通道和 2 通道的信噪比。

3 系统设计

3.1 探测指标

系统搭载于工作在高度为 20 km 左右的平流层空间的设备上,风场的变化影响平台工作的稳定性,因而需要获得设备周围的实时风场数据,平台可利用风场数据调整设备状态,从而保证其稳定性。20 km 高的空间已基本无气溶胶粒子,本系统采用直接探测的手段,且不考虑气溶胶,为了使设备小型化,系统借鉴相干探测的光路;根据应用需求,系统探测指标如表 1 所示。

表 1 系统探测指标
Table 1 System detect indices

Parameter	Value
Wavelength /nm	354.7
Detection range /km	0.5-5
Working height /km	20
Velocity range / $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	-100-100
Velocity error / $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	$\leq 2@5 \text{ km}$
Range resolution /m	30
Time resolution /s	10

3.2 激光雷达方程

激光雷达发射的窄线宽的激光脉冲由于大气分子的热运动而被展宽的过程称为瑞利布里渊散射。展宽后的脉冲不仅包含了大气分子热运动的信息,还会因大气风速造成中心波长偏离出射激光中心波长,这种偏离即多普勒频移。激光雷达系统接收的是散射角为 180° (后向散射)的散射信号,接收到信号的强弱与雷达系统望远镜面积、大气分子密度、探测距离等参数有关,这些参数之间的关系可用直接探测激光雷达方程^[10]表示,系统探测到的距离 x 处的光子数为

$$N_{\text{Ray}}(x) = \frac{E_0 \cos^2 \alpha}{h_{\text{plank}} \nu_0} Y \frac{A_r}{x^2} \Delta x \beta T_{\text{atm}}(x)^2 \eta_0 \eta_q, \quad (13)$$

$$T_{\text{atm}}(x) = \exp[-\sigma(20000, 354.7)x], \quad (14)$$

式中 E_0 为单发激光脉冲能量; α 为发射光束与竖直方向夹角, ν_0 为发射激光中心频率, Y 为标准具两通道分光比; A_r/x^2 为接收光学系统的接收立体角, A_r 为接收光学系统望远镜的接收面积; β 为 20 km 高度处大气后向散射系数,由于系统为水平探测,故其值为常量; Δx 为距离分辨率, σ 为 20 km 高度处大气消光系数, η_0 为光学系统效率, η_q 是单光子探测器量子效率, h_{plank} 为普朗克常量。

3.3 光路设计

本系统工作于海拔 20 km 高度,搭载于高海拔区域工作设备的平台上,考虑到系统工作环境,鉴频器采用腔长固定式 F-P 标准具,激光器波长可调谐;与传统直接探测系统相比,该系统偏振分光棱镜(PBS)和 1/4 波片组成光开关,光路更加简单高效;收发同轴因而无需调同轴;光纤采用多模光纤,芯径较大具有较高的耦合效率。图 4 为本系统光路图,其工作过程如下所述。

激光器发出的线偏振光脉冲经扩束准直器压缩发散角,而后大部分(约 97%)光透射经过偏振分光棱镜,很少一部分的光被反射,反射光经光纤导入标准具锁定通道,用于激光波长检测。透射光经 1/4 波片后变为圆偏振光,照射到收发合置的离轴反射式望远镜次镜上,然后被主镜反射,扩束后的光路发散角进一步被压缩照射到大气中,光子被大气分子散射并产生多普勒频移,只有沿后向散射的光子才被望远镜接收,返回光经 1/4 波片后又变回线偏振光,由于偏振方向的改变,信号光被偏振分光棱镜反射进入接收光路,先经过窄带滤光片(IF)过滤掉一部分背景光,过滤后的信号光子被分光棱镜分为两部分,分别进入 F-P 标准具的两个信号通道,通过能量探测(EM)得到两个通道出射光能量的关系,据此可提取出光信号中包含的多普勒频移,进而获得风速信息。

3.4 系统参数选取

3.4.1 主要设备参数

直接探测激光雷达系统主要设备有激光器、F-P 标准具、望远镜及探测器等,为了达到表 1 所要求的探

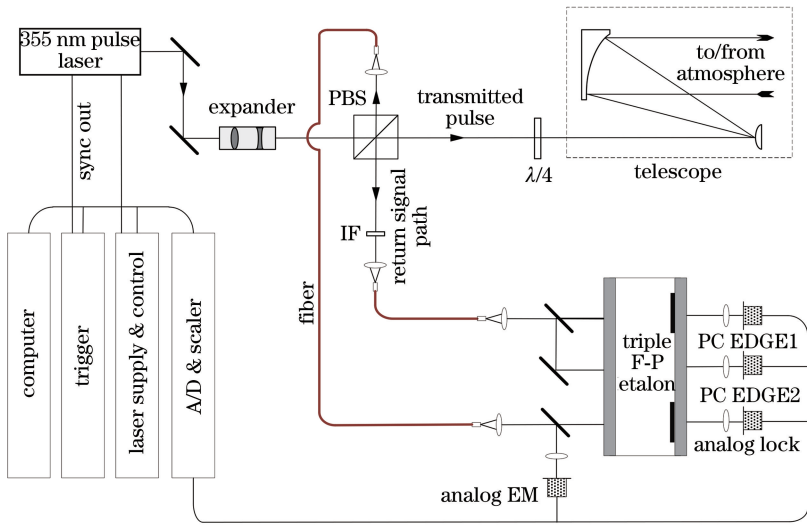


图 4 系统光路图

Fig. 4 Light path diagram of the system

测指标,同时又控制系统的建造成本,需要对系统性能进行仿真,得到最优化的设备参数组合。系统仿真所采用的大气参数取自美国标准大气模型^[8],经仿真运算,系统主要设备参数选择如表 2 所示。

表 2 系统主要设备参数

Table 2 Parameters of main devices of the system

Device	Parameter	Value
Tunable laser	Wavelength /nm	354.7
	Pulse energy /mJ	20
	Pulse duration /ns	6-8
	Repetition /Hz	100
	Frequency tunable range /GHz	10
	Divergence angle /mrad	≤1
Telescope	Diameter /mm	200
	Magnification	40
	R_{FS} /GHz	12
F-P interferometer	FWHM of the edge /GHz	1.7
	Edge separation /GHz	4.3
	Locking separation /GHz	1.3
	Peak transmission @355 nm	60%
PMT	Quantum efficiency	35%

3.4.2 标准具参数选取

标准具由两块精细加工的平面玻璃板平行放置组成,两板内侧镀 355 nm 反射膜,光垂直照射到标准具上会产生多光束干涉,标准具透射率可用艾里函数表示:

$$T = T_p \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi n d \cos \theta}{c} \nu \right) \right]^{-1}, \quad (15)$$

式中,标准具透射率最大值 $T_p = [1 - A / (1 - R)]^2$, A 为标准具吸收(或散射)损耗, R 为平板内表面镀膜反射率, n 为标准具腔内物质折射率, d 为标准具腔长, θ 为平板内的入射光与法线夹角。透射率谱线半峰全宽 $f_{FWHM} = R_{FS} (1 - R) / (\pi R^{1/2})$, 自由谱间距 $R_{FS} = c / (2nd)$, 反射精细度 $F = \pi R^{1/2} / (1 - R)$ 。

由(15)式可以得出,标准具透射率为一周期性函数,其周期为自由谱间距 R_{FS} , 半峰全宽 f_{FWHM} ; 故 R_{FS} 和 f_{FWHM} 的比值便可反映标准具透射率谱线精细程度,用反射精细度 F 来表示。从 T_p 和 F 的表达式可以看出:标准具透射率 T_p 会随着镀膜反射率 R 的增大而减小,意味着更多的能量没有从标准具透射而被损失掉,不利于测量;反射精细度 F 随着 R 的增大而增加,即标准具对频率变化的响应更加灵敏,有利于测量,因

此需要对标准具的参数进行优化,从而确定最佳的 R_{FS} 、 f_{FWHM} 和两通道峰值谱间距 $\Delta\nu$ 值。

1) 自由谱间距 R_{FS} 的选取

由于大气分子的热运动,分子散射信号频率谱宽会远大于发射激光的谱宽,为了防止展宽后信号进入临级,要求标准具自由谱间距要足够大。海拔 20 km 的模式温度为 216.6 K,工作波长 354.7 nm 的瑞利散射谱线可用一正态分布函数描述,信号谱的均方根宽度 $\delta \approx 1.4$ GHz,由正态分布性质可知,99.73% 的信号集中在 6δ 范围内,综合考虑风速测量动态范围及两通道谱间距(由下文可知为 4.3 GHz),以及激光器频率调节范围限制,标准具 R_{FS} 取值为 12 GHz。

2) f_{FWHM} 和 $\Delta\nu$ 的选取

望远镜接收到的光子(数量为 N_R)被光纤分束器分成相等的两部分分别进入两个信号通道, $a_1 = a_2 = 50\%$,在海拔 20 km 高度处光散射信号 N_M 很小可以忽略。在无多普勒频移时,发射激光频率 ν_0 严格锁定在两边缘通道透射率交点处,探测器探测到的光子数 $N_1 = N_2 = N_R T_R(\nu_0)$ 。在信号散粒噪声极限下,系统总信噪比 $R_{SN} = [N_R T_R(\nu_0)/2]^{1/2}$,则风速的误差可用下式表示:

$$\epsilon_\nu = \frac{1}{R_{SN}\Theta_\nu} = \left\{ \left[\frac{a_1 N_R T_R(\nu_0)}{2} \right]^{1/2} \frac{4}{\lambda} \frac{1}{R(\nu)} \frac{\partial R(\nu)}{\partial \nu} \right\} \quad (16)$$

图 5 给出了不同标准具两边缘通道峰值间距下,风速误差随标准具谱宽的变化关系,从图 5 中可以看出,当两边缘通道峰值间距 $\Delta\nu$ 从 3900 MHz 增大到 4600 MHz 时,风速误差均在 f_{FWHM} 为 1450 MHz 左右取得最小值, $\Delta\nu = 4300$ MHz 为曲线的最低点;然而, f_{FWHM} 越小,意味着标准具反射率越高,能量损失越大,而标准具的平行度和表面平整度缺陷会造成标准具谱线被展宽,综合考虑以上因素,标准具谱宽 f_{FWHM} 选定为 1700 MHz。

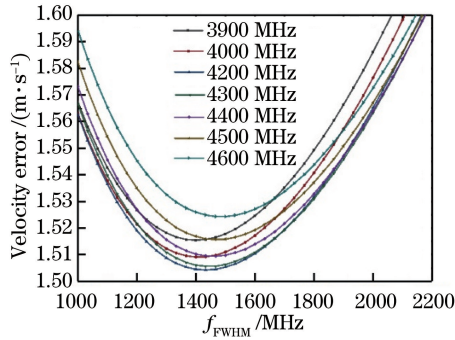


图 5 不同边缘通道峰值间隔下,风速误差随标准具谱宽的变化

Fig. 5 Wind velocity error varies with spectral width of etalon with different $\Delta\nu$

3.5 系统性能分析

3.5.1 系统回波信号仿真

单发激光脉冲的能量为 20 mJ,脉冲重复频率为 100 Hz,经计算收发光学系统效率约为 35%,收发合置望远镜口径为 20 cm,系统测量距离区间为距离系统 500~5000 m,模拟测得 500 m 处单发脉冲回波光子数约为 10^4 个,最大探测距离 5 km 处约为 100 个,动态范围约两个数量级,有成熟的探测器可用,其量子效率约为 35%;将以上参数代入雷达方程[(13)式],可得到单发脉冲大气回波信号光子数随距离的分布,如图 6 所示。

3.5.2 误差分析

由 2.4 节可知,径向风速可由(10)式求得,其方差即为风速测量误差,可表示为

$$\epsilon = \frac{1}{(\Theta_{\nu_1} + \Theta_{\nu_2})R_{SN}} \quad (17)$$

式中, $\Theta_{\nu_1} + \Theta_{\nu_2}$ 为单位速度变化的双边缘灵敏度之和, R_{SN} 表示测量频率响应函数时两个通道总的信噪比。利用光子累计的方法可提高系统的信噪比,减少测量误差^[14],当信号累积时间为 10 s(系统时间分辨率)时,系统信噪比和风速误差随距离的变化如图 7 所示。

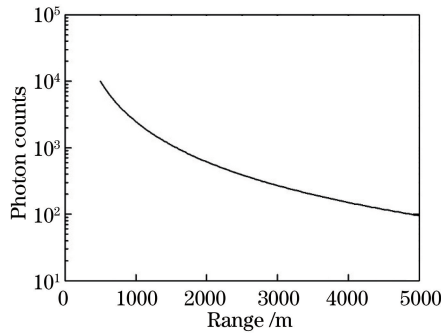


图 6 单发脉冲回波信号

Fig. 6 Backscatter signal of single pulse

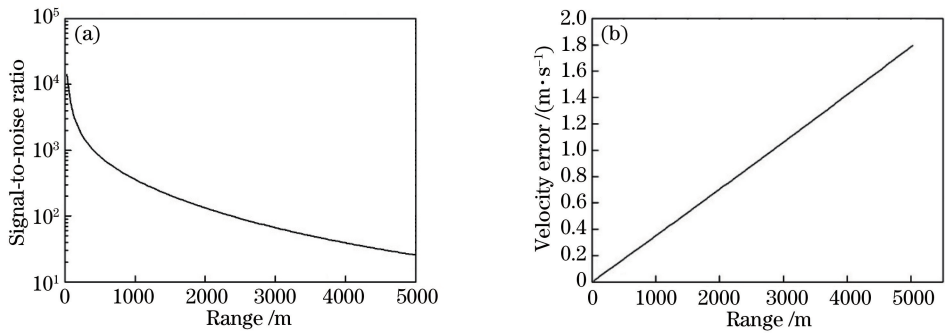


图 7 (a)信噪比和(b)风速误差随距离的变化曲线

Fig. 7 (a) Signal-to-noise ratio and (b) wind velocity error as a function of distance

4 结 论

提出了一种可应用于浮空平台、无人机等工作在高海拔区域的直接探测激光雷达系统,并完成了系统的仿真设计和设备选型工作。系统借鉴了相干测风激光雷达系统的光路,采用偏振分光棱镜和 1/4 波片组成光开关,并配合收发合置的望远镜,简化了直接探测系统的光路,提高了光路稳定性;可调谐式标准具容易受环境温度变化及震动影响而造成性能下降,对此,本研究提出了采用腔长固定式的标准具,脉冲激光器为波长可调谐式经优化,确定最佳的自由谱间距 RFS 为 12 GHz,标准具谱宽 f_{FWHM} 为 1700 MHz,两通道谱间距 $\Delta\nu$ 为 4.3 GHz。

参 考 文 献

- [1] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, *et al.* Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(6): 869-888.
- [2] Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, *et al.* A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. Geophysical Research Letters, 1989, 16(11): 1273-1276
- [3] 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.
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.
- [4] 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.
- [5] Korb C L, Gentry B M. New Doppler lidar methods for atmospheric wind measurements: the edge technique[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 1990: CWK3.
- [6] Rhothornel J, Cutten D R, Hardesty R M, *et al.* The multi center airborne coherent atmospheric wind sensor[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(4): 581-599.
- [7] Grund C J, Banta R M, George J L, *et al.* High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research[J].

Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2001, 18(3): 376-393.

- [8] Jia Xiaodong. Development of 1.55 μm coherent lidar for wind sensing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
贾晓东. 1.55 μm 相干测风激光雷达样机的研制 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2015.
- [9] National aeronautics and space administration. U. S. standard atmosphere, 1976 [M]. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1977.
- [10] Fujii T, Fukuchi T. Laser remote sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [11] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, *et al.* Application of triple Fabry-Perot etalon for rayleigh wind lidar [D]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1474-1480.
舒志峰, 唐磊, 王国成, 等. 三通道 Fabry-Perot 标准具在瑞利测风激光雷达中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1474-1480.
- [12] Korb C L, Gentry B M, Li S X, *et al.* The double edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [13] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Applied Optics, 1999, 38(3): 432-440.
- [14] Shen Fahua. Doppler wind lidar based on double-edge technique [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2009.
沈法华. 基于双边缘技术的多普勒测风激光雷达研究 [D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2009.