

## 星载多普勒测风激光雷达小型化光学接收机

储嘉齐<sup>1,2,3</sup>, 韩於利<sup>1,2,3</sup>, 孙东松<sup>1,2,3</sup>, 赵一鸣<sup>4</sup>, 刘恒嘉<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 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;
3. 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽亳州 233527;
4. 北京遥测技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 星载测风激光雷达可以提供全球范围高实时性、高精度、高分辨率的大气风场信息, 已经被认为是解决全球化风场观测的最佳手段。我国也在积极开展星载多普勒测风激光雷达相关研究工作。针对 400 km 高度的卫星轨道, 设计并研制了一套多普勒直接测风激光雷达光学接收机, 结合双边缘检测原理和星载平台相关技术参数, 对 Fabry-Perot 标准具的主要参数进行设计。为了满足星载平台对稳定性和小型化的需求, 接收机中主要光学元件之间采用分子粘接方式紧密连接。整个光学接收机集成在 450 mm×300 mm×80 mm 密闭箱体中, 内部光学元件采用倒插方式沉入接收机壳体的凹槽内, 整体结构稳定可靠, 集成度高。通过改变激光波长的方式扫描 Fabry-Perot 标准具的透过率曲线, 对所研制的接收机进行了性能测试。并由透过率曲线的实测参数对接收机的测风性能进行仿真, 仿真结果显示在 30 km 处的最大风速误差为 2.94 m/s。并进一步分析了接收机带宽增宽对测风精度的影响, 分析结果显示带宽偏差为 0.43 pm 时, 会引起 1 m/s 的风速误差增量。

**关键词:** 星载激光雷达; 法布里-珀罗标准具; 多普勒测风; 双边缘检测

**中图分类号:** TN958.98      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210831

## Small scale optical receiver of spaceborne Doppler wind lidar

Chu Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, Han Yuli<sup>1,2,3</sup>, Sun Dongsong<sup>1,2,3</sup>, Zhao Yiming<sup>4</sup>, Liu Hengjia<sup>1,2,3</sup>

- (1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Geospace Environment, Hefei 230026, China;
3. Anhui Mengcheng Geophysics National Observation and Research Station, Bozhou 233527, China;
4. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Spaceborne wind lidar is considered to be the best means of wind field observation due to its real-time, high-precision and high resolution. Researches on spaceborne Doppler wind lidar have been actively carried out in China. The direct detection receiver of Doppler wind lidar developed for the satellite orbit with an altitude of 400 km is introduced. The receiver employs the dual Fabry-Perot etalons as the discriminating frequency unit and its parameters are specially designed for the spaceborne application. The main optical elements of the receiver are connected by molecular force and reversely inserted into the fillister of the receiver shell. The structure of the receiver is stable, reliable and highly integrated with the size of 450 mm×300 mm×80 mm, adapting to the

收稿日期:2021-11-05; 修订日期:2021-12-09

基金项目:国家自然科学基金(41774193, 42104146)

作者简介:储嘉齐,女,博士生,主要从事激光遥感方面的研究。

导师简介:孙东松,男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光遥感方面的研究。

spaceborne requirements of stability and small scale. The Fabry-Perot etalon transmission curves are obtained by tuning the wavelength of laser and the parameters of transmission curves are tested and analyzed. The wind measurement performance of the optical receiver is simulated according to the actual measured parameters. The simulation results show that the maximum wind velocity error is 2.94 m/s at the height of 30 km. Then the influence of the receiver bandwidth on measurement accuracy is further analyzed. The analysis results show that when the bandwidth deviation is 0.43 pm, the measurement error increment of 1m/s is caused.

**Key words:** spaceborne lidar; Fabry-Perot etalon; Doppler wind measurement; dual edge detection

## 0 引言

全球大气风场观测数据在提高数值天气预报精度和开展全球气候研究等方面具有重要的应用价值。通过传统探测手段获得的风场信息都存在覆盖率和测量能力上的不足,如风速计、无线电探空仪、微波多普勒雷达等。随着大气探测技术的不断发展,星载多普勒测风激光雷达凭借高时空分辨率,高测量精度,能提供全球范围三维风场信息的优势,逐渐成为大气探测的研究重点之一<sup>[1-4]</sup>。

1999年,欧洲航天局(ESA)率先提出开展ADM-Aeolus(Atmospheric Dynamics Mission-Aeolus)项目,研制搭载卫星平台的高光谱分辨率的测风激光雷达ALADIN(Atmospheric Laser Doppler Lidar Instrument)。该测风雷达作用于355 nm的紫外波长,轨道高度408 km,望远镜口径1.5 m,采用斐索干涉仪和法布里-珀罗标准具作为鉴频器分别检测Mie散射信号和Rayleigh散射信号,用于实现全球对流层和低平流层风廓线的测量。历时近20年,ALADIN搭载Aeolus卫星于2018年成功发射,成为了全球首个搭载卫星平台的多普勒测风激光雷达<sup>[5-7]</sup>。另外,从20世纪80年代起,美国国家航空航天局(NASA)针对星载测风激光雷达也展开过多项研究,并于2013年提出GWOS(Global Wind Observing Sounder)项目,进行星载多普勒混合体制测风激光雷达系统的研制<sup>[8-9]</sup>。该项目结合直接探测技术和相干探测技术,轨道高度400 km,集成355 nm和2 μm激光器,经由4个口径50 cm的望远镜接收信号,整机尺寸1.5 m×2 m×1.8 m。目前,该项目已经成功进行了实验室演示<sup>[10]</sup>。国内对于星载大气探测激光雷达的研究起步较晚,仍处于关键技术攻关和地面原理样机的研制阶段,离卫星搭载尚有一段距离<sup>[11]</sup>。

文中针对星载测风项目设计并研制了一套多普

勒直接测风激光雷达系统,该星载测风项目由北京遥测技术研究所和中国科学技术大学等单位合作开展,采用直接探测和相干探测相结合的复合体制测风雷达方案,实现0.1~30 km高度范围的风场探测。其中相干探测检测边界层以下高度范围的风速,检测目标为气溶胶;直接探测检测边界层以上高度范围的风速,检测目标为大气分子,把两套系统得到的数据融合处理后可以得到一条完整的风速廓线。文中对复合系统中的直接测风激光雷达接收机部分进行了详细介绍,该接收机以双通道法布里-珀罗(F-P)标准具作为鉴频器检测多普勒频移。该F-P标准具采用固定式结构,接收机中主要光学元件采用分子粘接的方式紧密连接,提高光学效率的同时,极大地压缩了光学接收机的体积,满足星载激光雷达系统对稳定性和小型化的需求。文中分别介绍了该测风激光雷达接收机的工作原理、设计过程、总体结构和性能测试,并对该接收机测风精度进行了仿真模拟。

## 1 测风原理

直接探测系统可利用F-P标准具和双边缘检测技术对大气回波信号进行频率鉴别。双边缘技术通过将入射激光频率锁定在F-P标准具两个信号通道透过率曲线的交叉点来准确响应激光频率变化。两个通道的透过率曲线中心频率分开,频谱分布相同,分别位于Rayleigh散射信号两侧。当没有多普勒频移时,两个通道输出光能量相同;当回波信号产生多普勒频移,两个通道的光能量一个增加,一个减小,可从回波信号的能量变化中提取出多普勒频移信息,进而反演大气风速。当仅考虑Rayleigh散射时,可将两个信号通道光能量的变化定义为响应函数<sup>[12]</sup>:

$$R(v) = \frac{T_{R1}(v) - T_{R2}(v)}{T_{R1}(v) + T_{R2}(v)} \quad (1)$$

式中:  $T_{R1}(v)$ 和 $T_{R2}(v)$ 分别为两个通道 Rayleigh 散射的鉴频函数,可由 F-P 标准具透过率方程和 Rayleigh 散射谱卷积计算得到。多普勒频移可表示为:

$$v_d = \frac{R(v_0 + v_d) - R(v_0)}{R(v_0)\Theta(v_0)} \quad (2)$$

式中:  $v_0$  为出射波长对应激光频率。根据  $v_r = \lambda v_d / 2$  ( $\lambda$ 为中心波长),可得径向风速  $v_r$  为:

$$v_r = \frac{\lambda R(v_0 + v_d) - R(v_0)}{2 R(v_0)\Theta(v_0)} \quad (3)$$

在风速测量之前,需要通过扫描 F-P 标准具的透过率曲线确定响应函数  $R$ ,然后根据实测两个通道能量变化得到的  $R$  值反解得到多普勒频率。

## 2 系统设计

该星载测风激光雷达系统设计搭建于工作在 400 km 轨道高度的太阳同步轨道卫星平台上,根据应用需求,其直接探测系统的参数指标见表 1。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

Parameters	Values
Detecting range/km	2-30
Satellite altitude/km	400
Range resolution	1 km @ 2-16 km 2 km @ 16-30 km
Wind speed rang/m·s <sup>-1</sup>	0-60
Time resolution/s	30
Wavelength/nm	354.7
Pulse energy/J	0.18
Repetition/Hz	100
Telescope diameter/mm	650
Quantum efficiency	0.4

### 2.1 光路设计

所设计的星载多普勒测风激光雷达接收机采用收发合置的结构,光路原理如图 1 所示。1064.1 nm 的单纵模连续种子光注入主激光器,经放大倍频后发

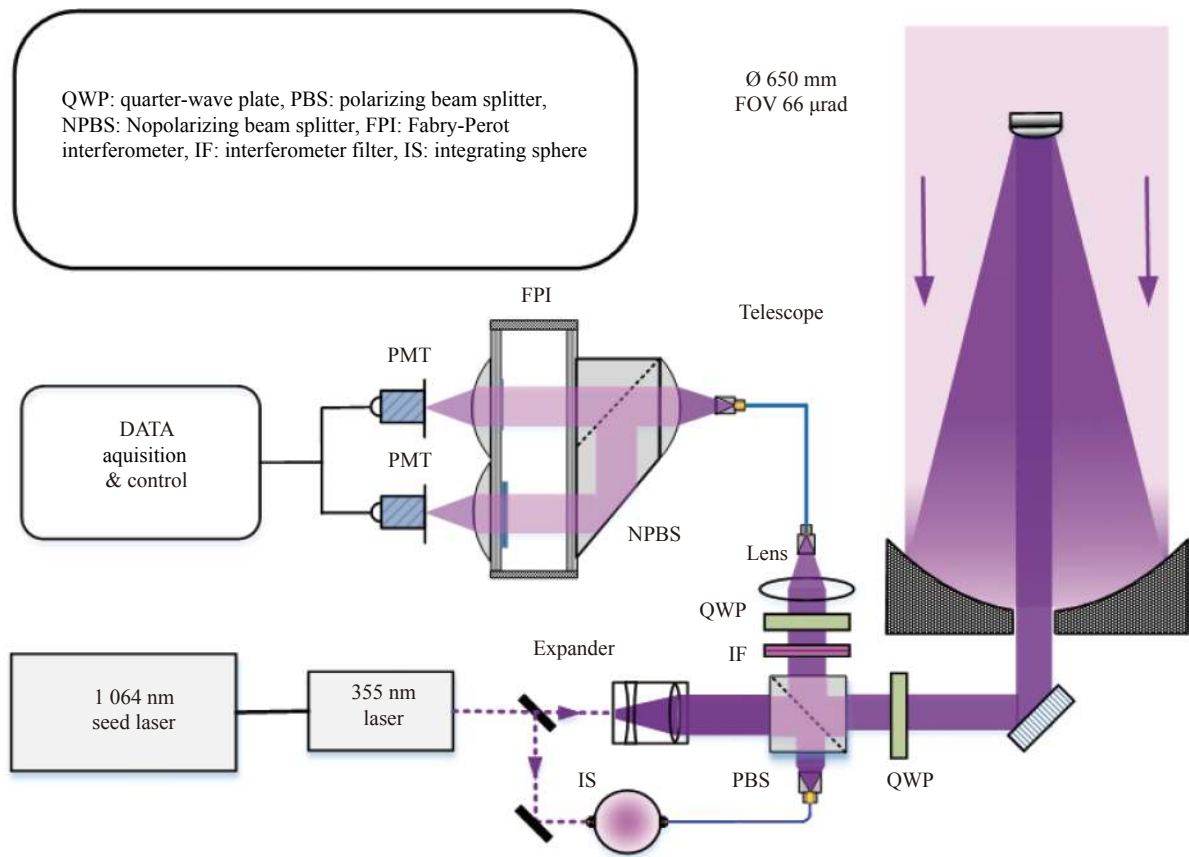


图 1 光路原理图

Fig.1 Diagram of light path

出 354.7 nm 线偏振脉冲光。考虑到激光频率抖动会对风速测量造成误差,直接探测技术要求在测量大气回波信号之前,先测量零频参考信号,即由激光器直接分出的零多普勒频移信号。出射激光先经过分束片分束,小部分反射光进入积分球,用于零频校准。分束片的大部分透射光经扩束准直后,分别经过偏振分光棱镜、四分之一波片和扩束望远镜进入大气中,和大气分子相互作用。其中偏振分光棱镜和四分之一波片组成“光开关”,将线偏光转化为圆偏光射入大气中。回波信号再次通过四分之一波片后又变成线偏光,且偏振方向和出射时垂直,在偏振分光棱镜处发生反射,从而实现光学接收机的收发合置。反射光经过后续光学元件后,变成圆偏光,再由光纤耦合进入接收机的鉴频部分。进入鉴频部分的圆偏光先准直为平行光,再被非偏振分光棱镜等分成两束分别进入 F-P 标准具的两个信号通道,最终出射信号汇聚到光电探测器端面上进行能量检测。其中鉴频部分包括透镜,非偏振分光棱镜和 F-P 标准具。干涉滤光片用于滤除信号中的背景噪声。所用的耦合光纤为芯径 100 μm 的多模光纤,限制望远镜视场的同时,采用光纤传输可以根据结构设计需求对接收机内鉴频部分的位置进行灵活布置。

## 2.2 F-P 标准具设计

F-P 标准具作为直接测风雷达接收机中的核心部件,其参数的选取反映了透过率曲线的陡峭程度,直接影响探测的信噪比和误差。

### 2.2.1 自由谱间距的选取

自由谱间距 (FSR) 为透过率曲线连续两个波峰之间的宽度。一方面,为了不引起测量误差,需将大部分 Rayleigh 散射信号能量集中在一个 FSR 内。在波长 354.7 nm,大气温度 250 K 的条件下, Rayleigh 散射的多普勒展宽可描述为高斯线型,其带宽  $\delta = 1.51$  GHz。通常认为 99.73% 的 Rayleigh 信号都集中在  $6\delta = 9.06$  GHz 的频率范围内,因此 FSR 不能小于该值<sup>[13]</sup>。但同时 FSR 也不能过大,因为在 F-P 标准具的有效精细度保持不变的条件下,随着 FSR 的增大,透过率曲线带宽增加,会导致测量灵敏度降低,从而影响测量精度。

另一方面,该激光雷达接收机根据卫星运行引起的多普勒频移进行了针对性设计。卫星轨道高度为 400 km,为了测量大气水平风速,设计雷达观测方向

与雷达正面方向成 45°,同时与垂直地球表面方向成 45°。在最优的卫星轨道设计方案下,卫星与地球自转的相对速度变化为 7.77 km/s,根据探测方向相对卫星平台的指向,相对速度带来的径向分量为 3.88 km/s,对应频移。利用标准具透过率曲线的周期性,设计 FSR 的值为 ( $n$  取正整数),可消除卫星运行引起多普勒频移对测量的影响。综合考虑,设计标准具的 FSR 为 10.925 GHz,取卫星运行带来的多普勒平移的 1/2 (如图 2 所示)。

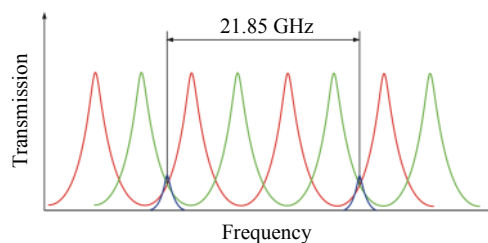


图 2 卫星引起多普勒频移示意图。红色和绿色曲线表示两个标准具通道的透过率曲线;蓝色曲线表示入射激光频率位置

Fig.2 Diagram of Doppler shift caused by satellite. Red and green curves are transmission curves of two etalon channels; blue curves are laser frequency position

### 2.2.2 峰值间距和谱宽的确定

系统采用固定腔长的 F-P 标准具,以种子注入式脉冲激光器作为激光光源,通过调谐种子波长实现 F-P 标准具透过率曲线的扫描。通常激光器可调谐范围有限,且连续调谐过程中经常出现激光器跳模的现象,会导致透过率曲线的测量不准确。设计两信号通道之间的峰值间距为 FSR 的一半,此时两信号通道的透过率曲线关于交叉点对称,只需扫描 1/2 个 FSR 即可获得完整的透过率曲线,降低了对连续可调谐脉冲激光器稳定性和波长调谐范围的要求。

根据双边缘技术的理论,风速测量误差可表示为:

$$\varepsilon = \frac{1}{\Theta \cdot SNR} \quad (4)$$

式中:  $SNR$  是测量信噪比,表示为:

$$SNR = \frac{1}{\sqrt{(SNR_1)^{-2} + (SNR_2)^{-2}}} \quad (5)$$

式中:  $SNR_1$  和  $SNR_2$  分别为两个信号通道的信噪比。

若采用光子计数模式,可将  $SNR$  表示为:

$$SNR_i = \frac{N_i}{\sqrt{N_i + N_{bi} + N_{di}}} \quad (6)$$

式中:  $SNR_i$  为第  $i$  个通道的信噪比;  $N_i$  为第  $i$  个通道接收的 Rayleigh 散射信号光子数;  $N_{bi}$  为第  $i$  个通道接收

的太阳背景光子数;  $N_{di}$  为第  $i$  个通道的探测器暗计数。在标准具透过率曲线的 FSR 和峰值间隔确定的情况下, 风速测量误差为谱宽  $\nu_{1/2}$  的单值函数。结合激光雷达方程, 经仿真计算得到系统风速误差和谱宽之间的关系如图 3 (a) 所示。根据误差最小原理, 确

定谱宽  $\nu_{1/2}=1.64$  GHz。此时系统信噪比随探测高度的变化如图 3 (b) 所示, 图中信噪比曲线出现突变是由于 16 km 处距离分辨率变化导致的。综上, F-P 标准具的频率参数设计值为: FSR=4.6 pm,  $\Delta\nu=2.3$  pm,  $\nu_{1/2}=0.7$  pm。

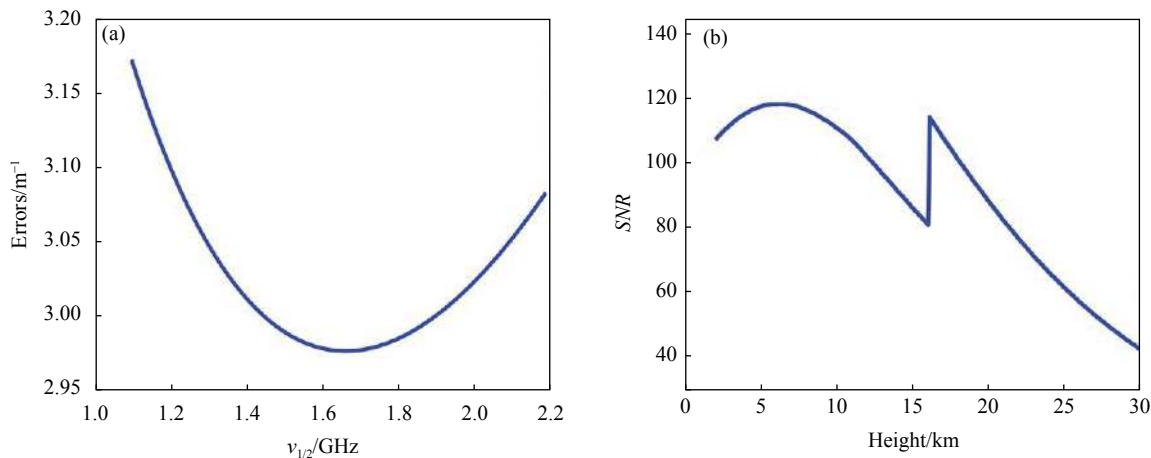


图 3 最大风速条件下, (a) 30 km 处系统风速误差随谱宽的变化; (b) 1.64 GHz 时系统的信噪比随高度变化

Fig.3 Under the maximum wind velocity, (a) wind error variation with spectrum width at the height of 30 km; (b) SNR variation with different heights when is 1.64 GHz

### 2.2.3 口径及腔长的选取

口径作为标准具的一个关键参数, 其值也反映了光学接收机中空间光路的接收口径大小, 并需要和望远镜系统、透镜参数以及光纤参数相匹配。入射到 F-P 标准具的光束由光纤耦合得到, 耦合光纤为芯径 100 μm, 数值孔径为 0.22 的多模光纤。标准具对输入光的发散角非常敏感, 通常控制入射到标准具的光束发散角小于 1 mrad<sup>[14]</sup>。为了保证信号的接收效率, 空间光路的接收孔径应满足公式 (7):

$$\Omega_r A_r \geq \Omega_f A_f \quad (7)$$

式中:  $\Omega_r, \Omega_f$  分别为接收光路和光纤的接收立体角;  $A_r, A_f$  分别为接收光路和光纤的通光面积。进一步简化上式得到接收光路的通光口径  $d_r$  应满足:

$$d_r \geq \frac{2 \arcsin(NA) d_f}{2\theta_0} \quad (8)$$

式中:  $2\theta_0$  为标准具最大接收角, 取  $2\theta_0 = 2$  mrad;  $NA$  为光纤数值孔径;  $d_f$  为光纤芯径。经计算, 接收光路的通光口径为 22 mm, 考虑安装余量, 取标准具的口径为 25 mm。

腔长为 F-P 标准具两平板之间的距离, 采用在同

一个基板上沉积镀膜的方式形成两个不同长度的腔长作为标准具的两个通道。根据干涉极大产生条件  $2nd=mc/\nu_m$ , 腔长  $d$  表示为:

$$d = \frac{c}{2n(\nu_{m+1} - \nu_m)} = \frac{c}{2n \cdot \text{FSR}} \quad (9)$$

式中:  $n$  为平板间介质折射率;  $m$  为干涉级次。根据两反射面之间的光程是否可调整将标准具分为固定式和可调谐式。考虑卫星平台震动会给系统带来测量误差, 文中介绍的直接探测接收系统中采用固定腔长式的 F-P 标准具, 通道腔长为 13.71 mm, 两通道腔长差为 88.7 nm。

F-P 标准具作为高精度光学鉴频器是直接探测激光雷达中的关键部件, 它的加工、装调和调节精度要求都非常高, 表面平整度要求为  $\lambda/100$ 。温度变化会对标准具的腔长及介质折射率产生影响, 从而引起频率漂移。温度变化 1 °C, 会引起标准具透过率谱线平移 80 MHz, 对应于径向风速误差为 15 m/s。平板间材料选用零膨胀微晶玻璃, 其热膨胀系数在  $10^{-7}/K$  的量级。工作时, 需将标准具放置于温度控制精度为 0.1 K 的热控箱内以保证测量性能<sup>[15]</sup>。

### 3 接收机结构

文中系统应用于卫星平台,具有体积小、稳定性高的特点。系统中标准具准直镜、非偏振分光棱镜、

标准具平行玻璃板和探测器耦合镜之间通过分子作用力直接连接,组成接收机中的鉴频部分(如图 4 所示)。光学元件之间省去空间光路,可以提高光学效率,同时压缩了接收系统的体积。

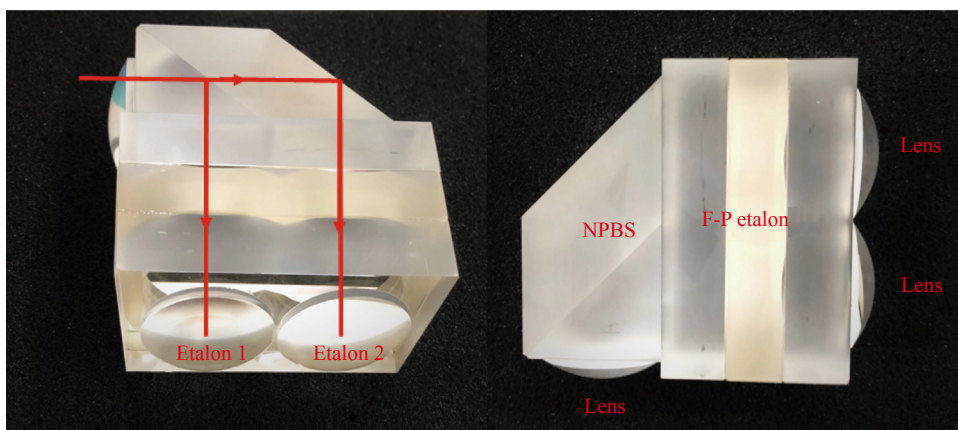


图 4 F-P 标准具组合结构

Fig.4 Composite structure of F-P etalon

为了将接收机集成在形状规则的壳体中,实际系统中以光阑代替耦合光纤限制望远镜视场,接收机内部均采用空间光路,并添加了反射镜、波片和分光棱镜来调整光路,实现接收机的收发合置,并具有零频

校准功能。整个光学接收机集成在 450 mm×300 mm×80 mm 大小的密闭空间中,如图 5 所示。光学元件在接收机壳体内部有对应的安装凹槽,采用倒插的方式沉入接收机壳体中,每个安装凹槽都配有压板遮光。

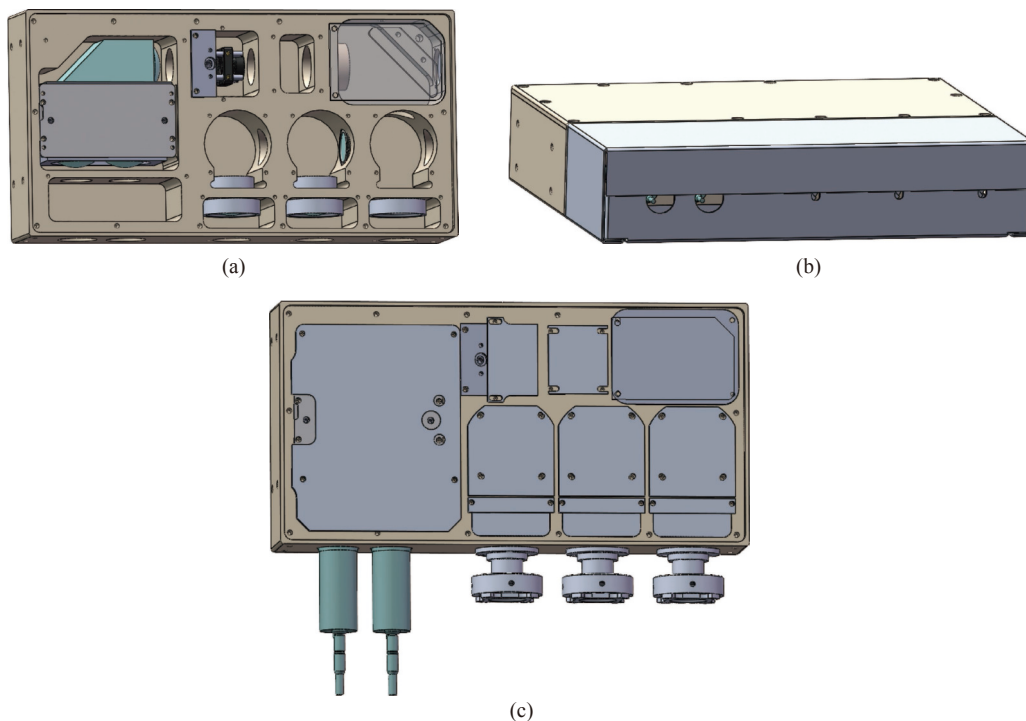


图 5 接收机内部及整体结构

Fig.5 Internal structure of receiver and the whole structure of receiver

波片和光纤准直透镜等光学镜片装入带有螺旋的套筒中直接旋进接收机壳体内部,大大压缩了空间体积。接收机整体结构稳定可靠,集成度高,同时有利于提高装调工作的效率。另外,由于 F-P 标准具对光路的入射角度非常敏感,而整个接收机结构相对固定,光路不能承载机械加工误差,在标准具的组合结构上配了可调节安装板,用于实现角度的微调,以满足标准具对入射光路的精度要求。望远镜的视场光阑为大小可变光阑,配有笼式结构和调节板,位置灵活可调。光电探测器和光纤接口都位于接收机的同侧,光纤接口从左到右依次为回波信号接口、激光发射接口和零频校准信号接口,并配有保护罩保护光纤接口和探测器。

#### 4 接收机性能测试及仿真

为了验证接收机的性能,对搭建完成的接收机进行透过率曲线的扫描,测试试验装置如图 6 (a) 所示。1064.1 nm 种子光注入主激光器经放大倍频后发出 354.7 nm 的脉冲光,通过调谐种子波长来改变激光器的输出波长,调谐步长为 0.12 pm。从光路中分出小部分光接入波长计实时记录波长数据。试验测得波形如图 6 (b) 所示,此时标准具的一个通道能量达到最强,另一个通道能量最弱,当调节波长时,两个通道能量强弱会交替变化。进一步对测得波形数据进行采样、积分就得到对应当前波长下两个通道的能量。波长扫描一个 FSR 后就得到一组完整的透过率散点图。

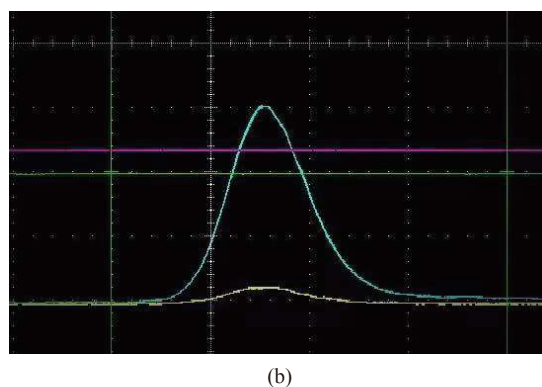
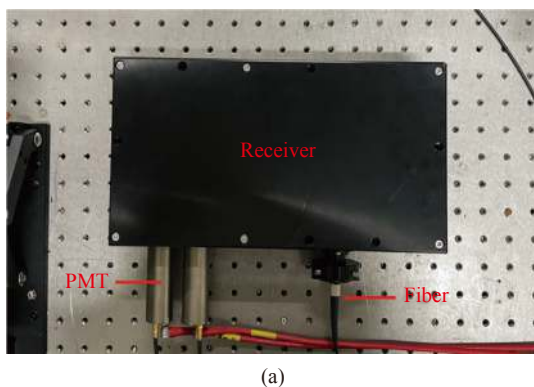


图 6 (a) 接收机测试装置; (b) 接收机测试波形

Fig.6 (a) Test device of receiver; (b) Test curves of receiver

F-P 标准具对单一频率的光的透过率  $h_\nu$  级数展开形式为:

$$h(\nu) = T_p \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} R_e^n \cos \left[ \frac{2\pi n \nu}{\text{FSR}} \frac{1 + \cos \theta_0}{2} \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[ \frac{2n \nu}{\text{FSR}} \frac{1 - \cos \theta_0}{2} \right] \right\} \quad (10)$$

式中:  $T_p$  为峰值透过率;  $\theta_0$  为入射光发散角;  $R_e$  为标准具内表面有效反射率。将透过率连续扫描散点图和公式 (10) 进行拟合,拟合结果如图 7 所示。取 F-P 标准具参数为多次实测结果的平均值,得到 FSR 为 4.6 pm, 带宽为 0.91 pm, 实测的通道带宽大于设计值 0.7 pm。由于装调和加工存在误差,入射光无法严格满足平行光正入射的条件,所以实际带宽不可能严格等于设计值,通常带宽超过理论值约 0.2 pm 是可以接受的。另外两个通道间隔分别为 2.5 pm 和 2.1 pm, 和

设计值 FSR 的一半之间存在偏差,可能加工过程中两个通道镀膜工艺存在误差,导致通道腔长差不严格等于设计值。

在扫描过程中,激光器存在频率和能量的抖动现象,会导致测量不稳定,影响透过率曲线扫描的准确性。计算多次连续扫描的透过率曲线的均值和方差,结果如图 8 所示,可以看出:波长扫描得到的透过率曲线稳定性较好,测得两个通道的能量波动的最大方差分别为 0.033 和 0.031。

根据实际测量得到的不同带宽,对光学接收机的测风性能进行了仿真模拟,测风误差随风速变化情况如图 9 所示。可以看出在设计带宽 0.7 pm 处,最大风速的测风误差为 2.82 m/s。取平均测量带宽 0.91 pm 时,最大风速误差为 2.94 m/s。图 10 进一步分析了带宽增宽对测风精度的影响,可以看出:带宽增宽越大,

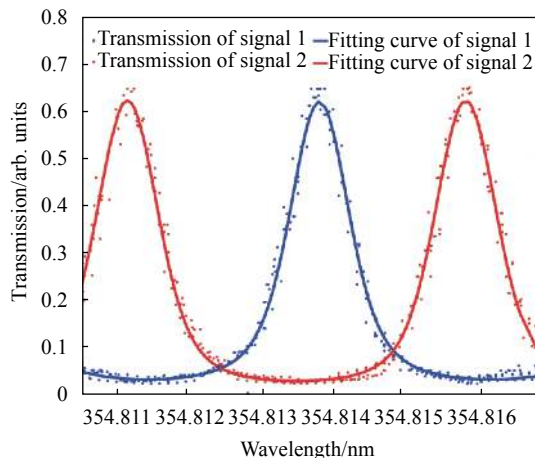


图 7 F-P 标准具透过率曲线拟合结果

Fig.7 Fitting curves of F-P etalon transmission

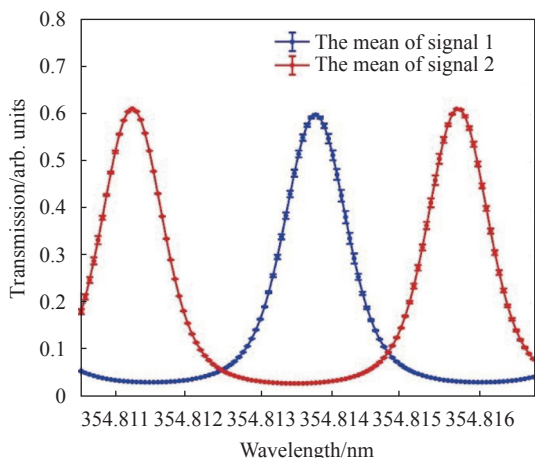


图 8 F-P 标准具透过率曲线测量误差

Fig.8 Measurement errors of transmission curves of F-P etalon

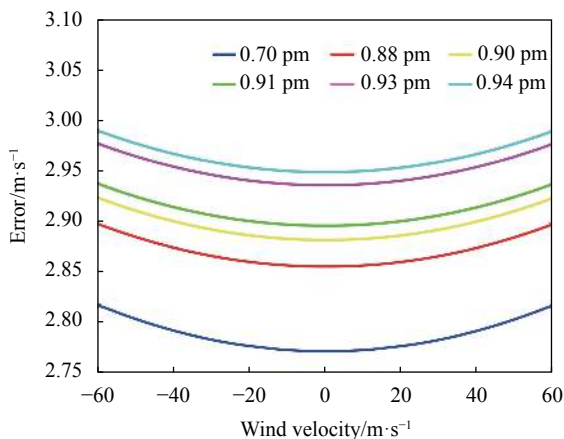


图 9 30 km 处不同带宽条件下测量误差随风速变化

Fig.9 Measurement error variation with wind velocity with different bandwidths at 30 km

测风误差增长越快。在 30 km 高度处,当带宽从设计值 0.7 pm 增宽 0.43 pm,即实际带宽为 1.13 pm 时,对应最大风速的测量误差增加 1 m/s。所以为了保证测风精度,加工和装调完成的接收机的实际带宽不应超过 1.13 pm。

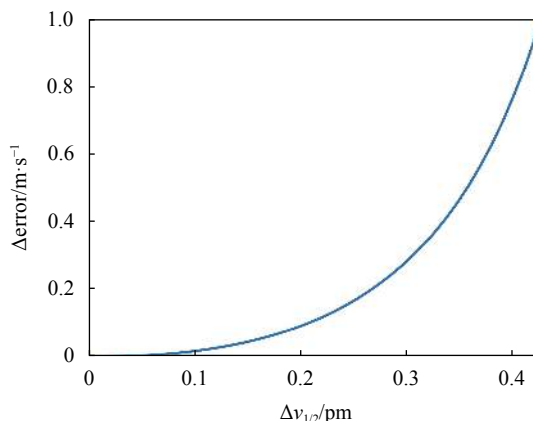


图 10 30 km 处不同带宽增宽和最大风速误差增量关系

Fig.10 Maximum wind velocity error variation with different bandwidth broadening at 30 km

## 5 结论

文中设计并研制了一套星载多普勒直接测风激光雷达光学接收机。接收机中主要光学元件之间采用分子粘接的方式紧密连接,光学效率高。各光学元件嵌入接收机壳体中,结构稳定可靠,集成度高,适应星载平台对小型化和稳定性的需求。结合卫星相关技术指标,对固定式 F-P 标准具的主要参数进行了针对性设计,并通过扫描波长的方式测量标准具透过率曲线。由于加工和装调存在误差,透过率曲线的实测带宽为 0.91 pm,高于设计带宽值。进一步分析了接收机的测风性能,通过仿真计算,该接收系统 30 km 处的最大风速测风误差为 2.94 m/s,并且带宽增宽越大,最大风速误差增加越快,1 m/s 的风速误差增量,对应 0.43 pm 的带宽增宽。

## 参考文献:

[1] Liu Z S, Chen Z, Yu C R, et al. Doppler wind lidar: From vehicle-mounted to space-borne [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2015, 10(2): 126-138. (in Chinese)  
 [2] Yan Z A, Hu X, Guo W J, et al. Near space Doppler lidar techniques and applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*,



- 2021, 50(3): 20210100. (in Chinese)
- [3] Kavaya M J, Spiers G D, Frehlich R G. Potential pitfalls related to space-based lidar remote sensing of the Earth with an emphasis on wind measurement[C]// Proceedings of SPIE, 2001, 4153: 385-393.
- [4] Guo J P, Liu B, Gong W, et al. Technical note: First comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(4): 2945-2958.
- [5] Reitebuch O, Lemmerz C, Paffrath U, et al. The airborne demonstrator for the direct detection Doppler lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: Instrument design and comparison to satellite instrument [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2516-2530.
- [6] Marksteiner U, Lemmerz C, Lux O, et al. Calibrations and wind observations of an airborne direct detection wind lidar supporting ESA's Aeolus mission [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2056.
- [7] Benjamin W, Christian L, Alexander G, et al. First validation of Aeolus wind observations by airborne Doppler wind lidar measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(5): 2381-2396.
- [8] Wood S A, Emmitt G D, Greco S, et al. DLSM: a coherent and direct detection lidar simulation model for simulating space-based and aircraft-based lidar winds[C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4035: 2-12.
- [9] Emmitt G D. Combining direct and coherent detection for Doppler wind lidar[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5575: 31-37.
- [10] Marx C T, Gentry B, Jordan P, et al. Lab demonstration of the hybrid Doppler wind lidar (HDWL) transceiver[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8872: 887207.
- [11] Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003. (in Chinese)
- [12] Wang J J, Shu Z F, Dou X K, et al. Research of the frequency response function of the Rayleigh Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2364-2369. (in Chinese)
- [13] Wang G C, Sun D S, Duan L F, et al. Analysis and design of Fabry-Perot etalon of Doppler wind lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0301001. (in Chinese)
- [14] Shen F H, Sun D S, Liu C L, et al. Single solid F-P etalon-based dual-frequency Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2944-2950. (in Chinese)
- [15] Sun J, Feng Y T, Bai L Q, et al. Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for measuring wind [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1167-1173. (in Chinese)