

# 天基相干测风激光雷达技术分析

朱振宇 高 昆 韩 璐 倪国强 高春青

北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 大气风场的测量对国家安全、天气预报、航空航天等都有重要意义, 目前我国缺乏有效的大尺度风场的综合探测能力。激光雷达(LiDAR)是迄今为止唯一能够直接获得三维风场廓线的测量工具, 提出的天基相干多普勒激光雷达利用光外差探测技术获得激光多普勒频移信息, 求取被测对象的径向速度分量, 较之传统的非相干激光测风雷达, 具有时-空分辨率高、灵敏度高的优点, 特别是在体积、重量、功耗上拥有突出优势。阐述了天基相干激光测风雷达的原理与方法, 分析了其中的关键技术, 并对未来激光测风雷达的天基实现可行性和应用前景进行了展望。

**关键词** 测量; 激光雷达; 相干测量; 风场测量; 卫星有效载荷

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101201

## Technical Analysis of Space-Based Coherent Wind LiDAR

Zhu Zhenyu Gao Kun Han Lu Ni Guoqiang Gao Chunqing

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Measurement of atmospheric wind field is very important for national safety, weather forecasting, aerospace and military applications. At present, our country is lacking of the comprehensive measurement capability of large-scale wind field. Light detection and ranging (LiDAR) is the sole instrument to access the three-dimension wind field profiler directly. The proposed space-based coherent Doppler wind LiDAR accesses the target Doppler frequency shift and calculates its line-of-sight velocity using laser heterodyne technology. Comparing with the traditional LiDAR, it has the prominent features of high space-time resolution and high sensitivity in dimension, especially in weight and power consumption. Illustrations focus on its principle and key technology. The intending space-based feasibility and prospect of the proposed coherent wind LiDAR are also given.

**Key words** measurement; laser lidar; coherent measurement; wind measurement; satellite payload

**OCIS codes** 120.0280; 120.1880; 120.4820

## 1 前 言

在现代高技术战争中, 获得目标区域大范围内、大尺度的气象条件至关重要。其中高空间分辨率和高时间分辨率的测风对大气建模和预测各种大气现象尤为重要。以数值天气预报为例, 要求在  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  平均范围内的零风速测量精度优于  $0.4 \text{ m/s}$ , 且斜率误差不能超过风速值的  $0.7\%$ 。激光雷达(LiDAR)可以通过多普勒效应测量风场目标运动信息, 具有时空分辨率高、速度分辨率高、测速范围广、抗干扰能力强等优点, 可以为数值天气预报、航空航天器、精确制导武器等军、民用部门提供目标区域准确的大气风场数据。目前国外用于对流层风速测量的激光雷达主要是较为成熟的地基和机载雷达, 但受机载激光雷达激光发散角、扫描视场角、飞行区域等因素的限制, 尚不具备全球范围数据的获取能力, 天基测风激光雷达具有全天候、运行轨道高、观测视野广、不受观测区域限制等优点, 成为全球范围内直接获得三维风场廓线有力的测

收稿日期: 2015-03-01; 收到修改稿日期: 2015-05-13; 网络出版日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61340018, 61271427)、北京市自然科学基金(4152045)

作者简介: 朱振宇(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。

E-mail: zhenyu0212@sina.cn

导师简介: 高 昆(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电成像、光学遥感应用和图像处理方面的研究。

E-mail: gaokun@bit.edu.cn

量工具<sup>[1-3]</sup>。本文就天基相干测风激光雷达技术的原理、特点以及关键技术作一个简单的阐述。

## 2 相干测风激光雷达技术特点

### 2.1 相干测风激光雷达原理

天基多普勒测风激光雷达探测如图1所示,按照探测方式可分为相干探测和直接探测2种体制。非相干(直接)探测是通过回波信号在鉴频器上的透射率计算得到多普勒频移,这种探测技术属于能量探测,探测相对简单,对激光性能要求较低。

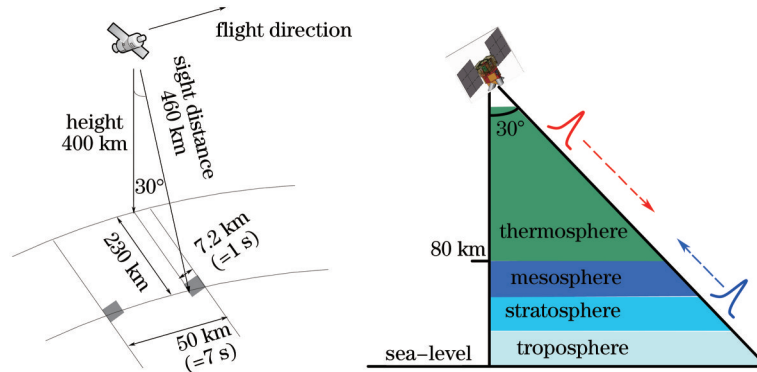


图1 天基多普勒测风激光雷达探测示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection of space-based Doppler lidar

激光相干探测采用了光外差探测的方法,基本原理框图如图2所示<sup>[4]</sup>。本振稳频激光器发出的频率为 $f_0$ 的连续激光,经分束后一路作为本振光源,另一路经移频、放大后输出频率为 $f_0 + f_c$ 的高功率激光信号,经发射光学系统扩束准直后射向目标空间。受多普勒效应影响,大气气溶胶粒子对激光产生的散射回波光频率会相对于发射激光频率产生一个与气溶胶粒子速度相关的频移,回波光信号在信号光探测器光敏面与本振光混频,输出载频为 $f_c + \Delta f$ 的信号;同时系统取部分发射激光与本振光在参考光探测器上混频,输出二者差频(即发射激光频移) $f_c$ 作为校正信号,将回波探测器的差频输出 $f_c + \Delta f$ 与发射激光频移 $f_c$ 比较,即可算出测量点大气气溶胶粒子相对于系统的径向运动速度和方向。

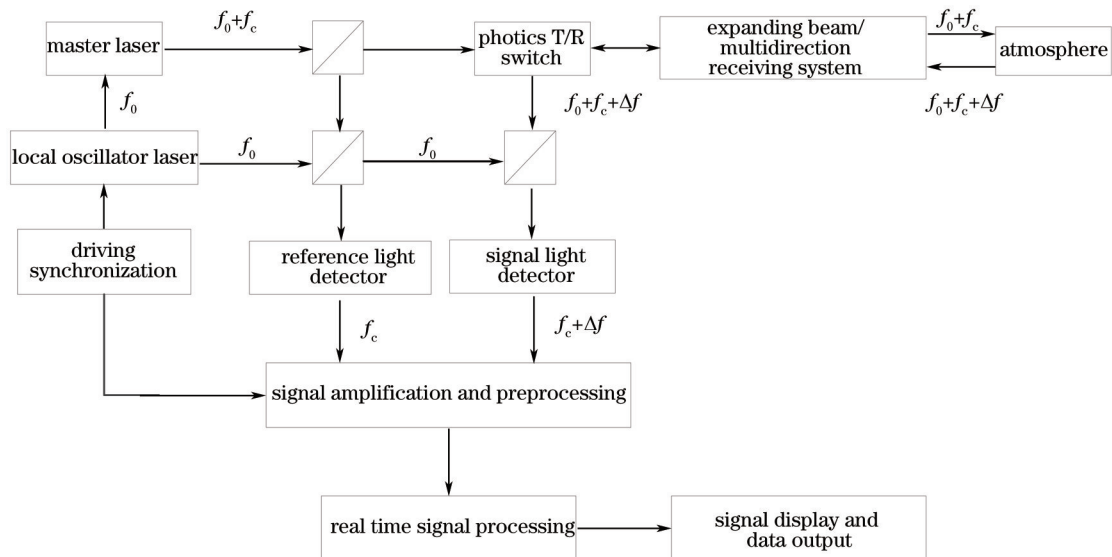


图2 相干激光测风雷达工作原理框图

Fig.2 Block diagram of the principle of coherent wind lidar

#### 1) 速度分辨率

设 $v$ 为大气中气溶胶微粒(目标)相对于系统运动的径向速度,当受到波长为 $\lambda$ 的激光照射时,引起的回波光信号多普勒频移为

$$\Delta f = \pm 2\nu/\lambda, \quad (1)$$

当测风目标运动方向远离系统时取负,反之取正。

通过设置距离波门,测得空间不同距离处各扫描样本点的径向速度数据,对全部扫描过程中获取的径向风速、角度和距离数据进行矢量处理,可以得到三维风场分布信息。

### 2) 距离分辨率

激光测风雷达每一工作周期内的回波信号是从激光发射开始时连续的、带有作用距离范围内所有气溶胶径向速度、强度等信息的连续信号。信号处理时,先将这一信号连续采样,然后以激光发射时刻为基准设置若干等距离或非等距离的距离波门  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_n$ ,对每一距离波门内的采样信号做傅里叶变换,即可计算对应距离范围内气溶胶的径向速度值,距离分辨率即为

$$dL = c\Delta\tau/(2n), \quad (2)$$

式中  $\Delta\tau$  为距离波门宽度,  $c$  为光速,  $n$  为大气折射率。

### 3) 测速误差

相干探测系统测速误差即测频误差,主要影响因素包括光频漂移、通道噪声、多普勒频率提取精度等。当激光频率发生漂移时,其带来的测速误差为

$$\Delta\nu = \lambda\Delta f'/2 = c\Delta f'/(2f_0), \quad (3)$$

式中  $\Delta f'$  为激光光谱宽度。

在加入校正光路的条件下,光频漂移引入的风场测速误差较小,通道噪声引入的测速误差及多普勒提取引入的测速误差占主要因素。由于风场在短时间内不会有大的变化,而且风场产生的多普勒频移不是单频信号,在多普勒频率测量时,在合理优化算法的前提下,采用滤波、相参积累等方式可以有效提高风速测量精度。

## 2.2 国内外发展现状

20世纪70年代末,美国NASA研制出了第一台脉冲CO<sub>2</sub>相干测风激光雷达,该激光雷达采用了激光振荡放大技术(MOPA),可以实现重复频率200 Hz下激光脉冲峰值功率达到5 kW,测量量程达到10 km,测距精度达到150 m,测速范围达到40 m/s<sup>[5]</sup>。但CO<sub>2</sub>激光器也有寿命短、性能不稳定、结构复杂、成本高等缺点,随着固体激光技术的发展,1989年,美国相干技术公司(CTI)采用半导体激光器(LD)抽运的Nd:YAG激光器(5 mJ、10 Hz)实现了全固态的相干测风激光雷达,实现了测距精度为192 m、测速精度为0.42 m/s的高精度风速测量,测量范围也增大到了3.75 km<sup>[6]</sup>。1990年,CTI公司实现了第一台2 μm相干测风激光雷达,该激光雷达采用闪光灯抽运的Tm, Ho:YAG为光源,脉冲能量为20 mJ,可以实现20 km范围内的风场测量<sup>[7]</sup>。20世纪以来,美国的NASA Langley研究中心已经实现了10 Hz、250 mJ的2053.472 nm相干测风激光雷达(实验室指标达到1.2 J),并计划最近在DC-8和WB-57飞机上进行外场实验<sup>[8]</sup>。日本的国家信息和通讯技术中心(NICT)也在实验室内实现了20 Hz下100 mJ的单频2051 nm激光输出,并进行了风速测量实验,并计划将激光器能量放大到500 mJ<sup>[9]</sup>。随着1.5 μm超窄线宽激光技术的飞速发展,预计1.5 μm相干多普勒激光雷达将成为下一个研究热点<sup>[4]</sup>。

从20世纪90年代开始,美国先后启动了3个具有代表性的研究计划,即机载激光多普勒测风雷达(TODWL)、GWOLF(Groundbased Wind Observing Lidar Facility)和VALIDAR(Validation Lidar),并开辟了气象天基激光雷达的先河。在1994年9月20日用发现号航天飞机搭载激光雷达进行了激光雷达空间技术试验(LITE),充分反映了空间激光雷达在研究气溶胶和云方面的潜力,成为世界上首个地球轨道激光雷达试验<sup>[10]</sup>。

欧空局在2002年着手进行了ALADIN(The Atmospheric Laser Doppler Instrument)计划,主要采用非相干探测技术测量风场廓线用于天气预报和气候学研究,这是欧洲第一台空间激光雷达和全球第一台天基测风激光雷达,原计划2012年发射,卫星采用太阳同步轨道,飞行高度为400 km<sup>[11]</sup>。

总之,目前的天基激光测风雷达的总体趋势主要以ESA的ALADIN计划(355 nm直接探测)和NASA的JEM/CDL计划(355 nm直接探测+2 μm相干探测)为代表,其主要指标对比如表1所示<sup>[11,10]</sup>。

表1 几种天基激光测风载荷对比

Table 1 Comparison of wind loads of space-based laser

Index	NASA HDWL (coherent detection)	ESA aeolus (direct detection)
Operating wavelength	2053 nm	355 nm
Output energy	250 mJ	120 mJ
Frequency	5 Hz	100 Hz
Pulse width	180 ns	30 ns
Telescope aperture	0.5 m	1.5 m
Detector	InGaAs	Accumulation type CCD
Accumulated points	60	15/50
Detection zone	0~20 km (355 nm)	Clouds on the surface about 30 km
Vertical resolution	0.5 km	0.5 km
Horizontal resolution	87 km	200 km
Rate accuracy	1 m/s	1~2 m/s
Weight	About 100 kg	About 124 kg
Average power consumption	600 W	830 W

我国也有一些研究机构对测风激光雷达进行了研制。中国海洋大学在国家863计划的支持下研制了车载式“非相干多普勒测风激光雷达”<sup>[11]</sup>,采用了532 nm激光光源,主要测量指标为探测距离0.5~10 km,距离分辨率0.15 km,径向风速范围0~50 m/s,风速精度1 m/s,风向范围0~360°,风向精度15°。中国科学院安徽光学精密机械研究所针对非相干测风的应用要求,研制了1064 nm的Nd:YAG激光雷达,并进行了测风实验。其指标为测量范围0.1~40 km,风速范围0~100 m/s,在10 km内可达到测速精度3 m/s和测距精度30 m<sup>[12]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所采用355 nm激光器和Fizeau干涉仪实现了条纹技术测风激光雷达,并进行了风速测量实验,测量得到了1.5 km内的风廓线,并且标定得到风速测量误差小于1 m/s<sup>[13]</sup>。与国外先进技术相比,这些产品多采用了成熟的Nd激光器件与技术,工作波长都属于对人眼不安全波段,因此对使用场所有一定限制;非相干探测需要鉴频器,因此多采用一些碘吸收池等器件,又增加了系统的体积和重量;测量结果显示测量精度不如相干探测。北京理工大学曾研制了2 μm单纵模脉冲激光光源并构建了相干多普勒测速原理演示系统,实现了0.02 m/s的测速精度。

### 2.3 相干探测的技术优势

光外差探测技术具有高的灵敏度和探测微弱信号的能力,因此相干激光测风已被证明是高分辨测量遥感风场和运动目标速度的有力工具。作为天基应用,与直接探测相比:

- 1) 相干探测选用的固体激光器在体积、重量和功耗上有明显的优势,从而降低了载荷方面的负担;
- 2) 直接探测用到较大的激光脉冲能量,激光器结构复杂,抽运源需要2个单频种子激光器,作为注入种子的激光器要和作为参考的种子激光器具有相同的频率,频率控制难度大,而相干探测用到激光器只需要一个种子激光器,参考信号和注入信号均来自于该激光器,另外直接探测用到的脉冲激光器有两级放大,增加了系统的功耗,不利于系统长期稳定运转;
- 3) 直接探测与相干探测激光器的线宽差距很大,对于多普勒测风雷达来说,较宽的线宽会造成测速精度的降低;
- 4) 相干探测方式采用了光外差的探测方法,只需要单一探测光路和单个探测器,而直接探测需要搭建菲索和F-P干涉仪2种探测光路和2个探测器;
- 5) 直接探测采用的激光波长较短(355 nm),受较稠密大气散射影响,不可能获取低层大气的风场数据,比较适合测量对流层以上的高空风速,而由于相干探测采用的激光波长较长(2 μm),能够穿透低层稠密大气层并具有可精确获取中高空对流层风场多普勒频移。

当然,相干探测对激光器频率、线宽等性能要求较高,对激光光路的调整要求也更高,同时还需要更复杂的信号处理系统,但随着激光雷达技术的进步,其高测量精度和高效率运转的优势正逐渐成为正在天基测风应用发展和应用的重点探测技术。



### 3 天基相干测风激光雷达关键技术

天基激光测风雷达是一个技术上非常复杂的科学系统,因此尽管国外研究机构提出并研究了20多年,但目前还没有一套真正实用的空间系统在轨运行,欧空局的Aeolus系统发射时间一推再推,美国航天局则将发射时间推迟在2020年以后<sup>[14]</sup>,究其原因主要是系统的高度复杂性,系统的可靠性无法保障。一个相干测风激光雷达包括连续单频种子激光器部分、脉冲激光器及放大器部分、种子注入控制系统、望远镜系统、扫描系统(可选)以及信号采集和处理系统等组成。

#### 3.1 高稳定性、高效率的激光雷达发射技术

图3给出了激光雷达发射接收示意图。相干激光多普勒雷达的发射系统由激光器和发射望远镜组成,需要设计高准直度发射光学系统来进一步提高发射激光束的准直特性,以及天基高效稳定2 μm单纵模种子激光器、大能量输出2 μm功率激光器、2 μm单纵模种子激光器和功率放大器锁定技术等<sup>[13]</sup>。

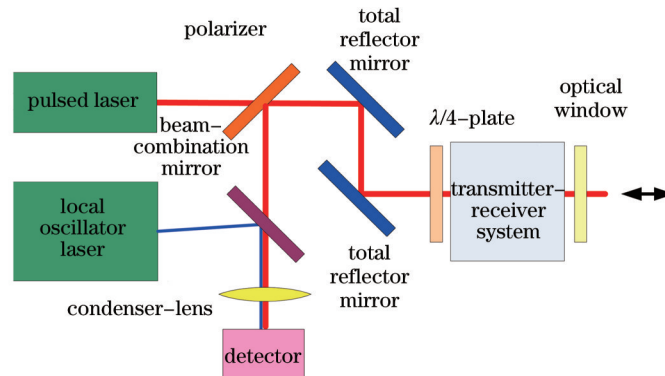


图3 激光雷达发射接收示意图

Fig.3 Schematic diagram of transmitting and receiving of laser radar

激光波长需要综合考虑人眼安全、大气通透性、激光器功率、探测器效率等多因素进行选择。目前常用2 μm激光器有Tm:YAG激光器、Tm, Ho:YLF激光器和Ho:YAG,它们的发射波长分布集中在2013、2053、2090 nm附近,图4给出了以1976年美国标准大气为参考、在晴好天气条件下、利用Modtran模拟的2090 nm波段激光在大气中传输100 km时的透射率,可以看出在Ho:YAG的发射谱内2091.2 nm在大气中传输损耗最小( $T=93.93\%$ ),是天基激光器测风雷达理想光源<sup>[13]</sup>。

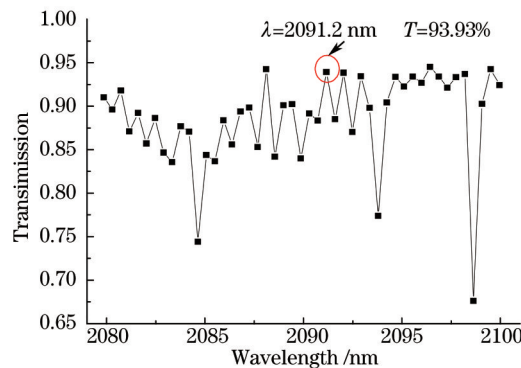


图4 2 μm 波段透射率

Fig.4 Transmittance at the wavelength of 2 μm

激光雷达探测距离为  $R$  时的最小能量为

$$E_1 = \frac{8\sqrt{\ln 2} h R^2}{\eta \lambda \cdot T^2 \beta \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot \pi D^2}, \quad (4)$$

式中  $h$  是普朗克常数,  $R$  探测距离,  $\eta$  是激光雷达总体效率,  $\beta$  是大气背向散射系数,  $\gamma$  是大气湍流系数,  $\Delta T$  是激光脉冲宽度,  $T$  是单程大气传输系数(透射率),  $D$  发射天线口径(直径)。对一个固定的激光雷达装置,  $\eta$ 、 $\Delta T$ 、 $\lambda$ 、 $D$  这几个参数是固定不变的,  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $T$  是大气参数,受海拔、天气影响严重,因此不同的天气条

件对激光雷达探测范围影响严重。为了计算出天基激光雷达所需的最小能量,必需理解激光雷达方程中各个参数的取值<sup>[15]</sup>。

### 1) 激光雷达效率 $\eta$

常用的雷达系统各部件光学系数如表2所示。

表2 激光雷达光学系统各器件效率

Table 2 Efficiency of optical system components of laser radar

Emission efficiency $\eta_e$		Receiving efficiency $\eta_r$	
Optical element	Efficiency	Optical element	Efficiency
Polarizer	99%	Window	99%
High reflectivity mirror(2×)	98%	Beam expander	98%
$\lambda/4$ plate	99%	$\lambda/4$ plate	99%
Antenna	98%	High reflectivity mirror(2×)	98%
Window	99%	Coupling lens	99%
		Beam combination device	90%
Emission efficiency $\eta_e=93.2\%$		Receiving efficiency $\eta_r=83.9\%$	

目前较好的光电探测器量子效率  $\eta_q=80\%$ , 设拍频模式匹配效率  $\eta_h=100\%$ 。如果再考虑到激光在传输接收中因偏振态旋转导致的损耗(约为10%), 即  $\eta_{BS}=90\%$ , 以及激光雷达实际应用中光学系统加工装调(通常小于40.1%, 这里取40.1%)。还有望远镜远场对准精度  $\eta_{\theta}^{FF}=90\%$ , 那么最后的全体效率为

$$\eta = \eta_q \times \eta_h \times \eta_e \times \eta_r \times \eta_{BS} \times 40.1\% \times \eta_{\theta}^{FF} = 62.6\% \times 90\% \times 40.1\% \times 90\% = 20.33\% . \quad (5)$$

### 2) 后向散射系数 $\beta$

大气散射其实就是电磁波同大气分子或气溶胶等发生相互作用, 使入射能量以一定规律在各方向重新分布的现象。大气散射同入射波的波长、强度以及粒子的大小、形状和折射率有关。本文使用了BACKSCAT4.0数据库计算得到空气质量良好的后向散射系数, 如图5所示, 可见在海拔10 km以下2091.2 nm处大气后向散射主要以米氏散射(气溶胶粒子散射)为主。

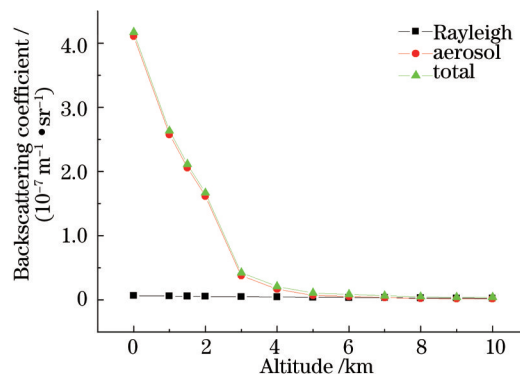


图5 不同海拔高度2091.2 nm激光后向散射系数

Fig.5 2091.2 nm laser backscattering coefficient versus altitude

### 3) 大气传输系数 $T$

大气传输系数  $T$  的计算过程是比较复杂。利用美国空军地球物理实验室开发的 Modtran 软件进行计算, 以1976年美国标准大气为参考, 在天气晴好(能见度大于23 km)的条件下, 2091.2 nm激光在大气中传输100 km的大气传输系数  $T=0.9393$ 。

### 4) 大气湍流系数

大气湍流对激光束的传播会引起光束漂移和展宽。大气湍流对激光雷达信号传输的影响可以采用大气湍流系数  $\gamma$  表示为

$$\gamma = \frac{1 + \left(1 - \frac{R}{F}\right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda R}\right)^2}{1 + \left(1 - \frac{R}{F}\right)^2 \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda R}\right)^2 + \left(\frac{D}{2S_0}\right)^2}, \quad (6)$$

式中  $F$  表示雷达望远镜的焦距, 远场  $F=R$ ,  $D$  是激光雷达接收口径,  $S_0$  表示相干长度, 可表示为

$$S_0(R) = \left[ 2.91k^2 \int_0^R C_n^2(r) \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{5/3} dr \right]^{3/5}, \quad (7)$$

其中,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $C_n^2(r)$  的单位为  $\text{m}^{-2/3}$ , 是大气折射率结构常数, 用来表示距离为  $r$  两点之间大气折射率的扰动, 可用来对光束扩展、漂移等进行定量计算, 主要受到海拔高度影响, 受波长、气压、温度等影响很小, 可近似表示为

$$C_n^2(r) = 1.5853 \times 10^{-12} z^{-4/3} = 1.5853 \times 10^{-12} (r \sin \theta)^{-4/3}, \quad (8)$$

其中,  $\theta$  是激光雷达探测仰角, 这里取  $\theta = 45^\circ$ 。由于高层大气比较稀薄, 假设大气湍流只发生在对流层和平流层 (0~40 km), 通过数值计算得出大气湍流系数为  $0.999999999717709 \approx 1$ 。大气湍流的影响很小, 可以忽略。

### 5) 取样积分技术

天基激光雷达探测到的拍频信号通常很弱, 很可能淹没在噪声中, 单次取样无法获得需要的信息, 通常采用取样积分技术来提高信号的信噪比。取样积分技术是对周期性的有用信号, 在每个周期的统一相位处多次采集波形上的某点的数值, 其加算平均的结果与该点处的瞬时值成比例, 而随机噪声的长时间平均值将收敛为 0, 这样就可以改善信噪比。根据理论信噪比的改善情况与取样次数  $N$  有关,  $N$  次取样积分后信噪比  $S/N_N$  与单次取样信噪比  $S/N$  关系为

$$S/N_N = \sqrt{N} S/N. \quad (9)$$

通过取样积分技术可以有效提高信噪比, 降低激光雷达对激光器脉冲能量的要求。

## 3.2 高灵敏度探测接收技术

高灵敏度探测接收技术的目的是获得高灵敏度、低噪声、抗干扰能力强、高光谱分辨率的相干回波信号, 开展的研究包括高精度接收光学系统设计、高灵敏度探测器接收电路设计、高信噪比、高可靠性电路及实时信号处理系统设计等。

图 6 给出了整个回波信号采集与处理系统的基本架构, 包括高速运放、高速 A/D、数字下变频、低通滤波器、快速傅里叶变换 (FFT) 滤波器组、求模选大、积累平均等功能模块组成, 其中信号处理部分采用了高速数字信号处理 (DSP) + 现场可编程门阵列 (FPGA) 的处理模式。由于 Q 开关的随机性会破坏激光脉冲的相干性, 因此设计数字下变频相干接收机以去除激光雷达发射脉冲的载波随机初相位、恢复信号的相干性, 提高接收回波信号信噪比<sup>[16]</sup>。

## 3.3 空间扫描技术

为了获取三维风场信息, 增大距离分辨率, 常规的单激光器多普勒测风雷达需要采用扫描的方式工作。在伺服控制下, 系统扫描器将准直后的激光脉冲射向探测区域并作二维空间扫描, 扫描器有多种扫描方式, 如锥形扫描、指状扫描、弧线扫描及高分辨率光栅扫描等。需要充分考虑星体本身的运动来设计合理的扫描方式, 或采用多站、多基线的方式来测量。

## 3.4 激光雷达信号处理及定标技术

以新体制相干测风激光雷达为基础, 完成对接收数据预处理加工、算法研究和产品提取的研究。包括开展空间站载体运动补偿技术研究、原始信号噪声滤波方法研究、测量数据误差控制方法研究、测量数据积累策略研究、背景去除方法研究以及获取规范化数据的新方法等信号处理方面的研究, 完成相干测风激光雷达的系统定标及系统性能测试方法研究、相干测风激光雷达数据反演方法研究及相应的相干测风激光雷达的系统模拟计算软件的设计等<sup>[17]</sup>。

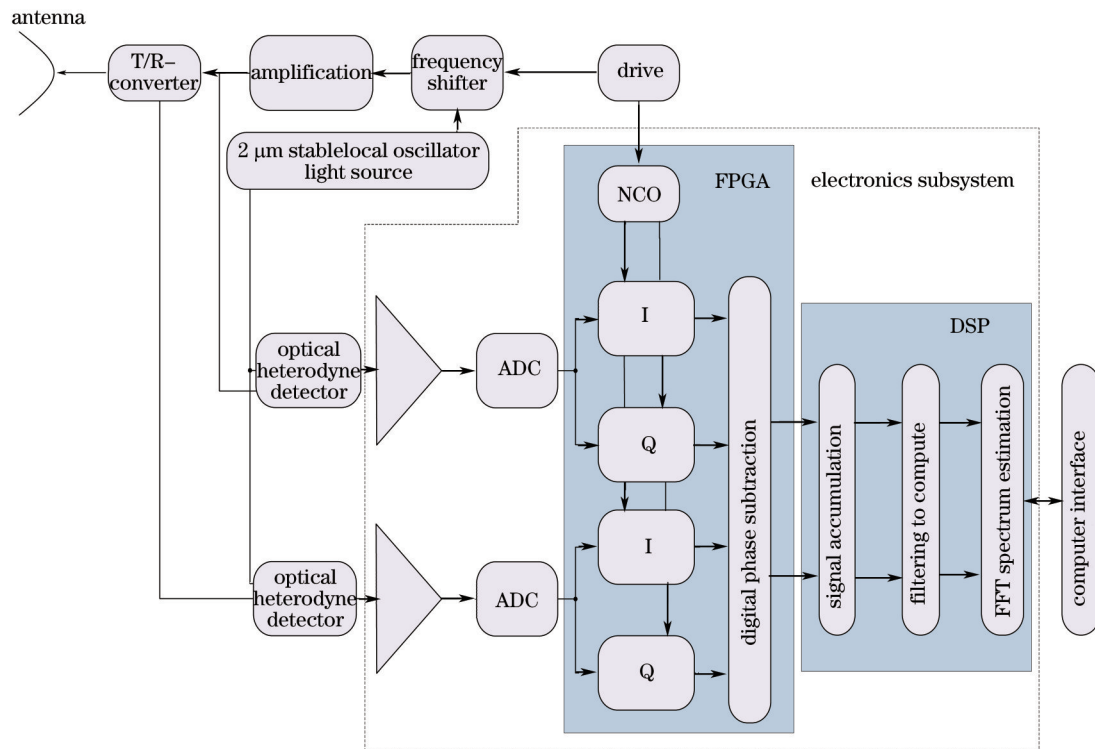


图6 相干接收电子学分系统框图

Fig.6 Block diagram of coherent receiving electronic credit system

## 4 结 论

天基相干测风激光雷达能实时获取全球的风场数据,与有声雷达、微波雷达相比,具有体积小、高分辨率、三维观测、易于多角度探测布局与集成等优点,可满足对全球范围高分辨率大气风场数据的迫切需要;可以提供对大气能见度、云底高度、云的垂直分布、气溶胶性质等气象参数的观测,因此积极发展天基相干测风激光雷达技术,对国家安全、减灾防灾、空间科学研究与应用具有战略意义。

## 参 考 文 献

- 1 Guo Jin. Progress in the study of Doppler wind lidar[J]. OME Information, 2010, 27(10): 10-15.  
郭 劲. 多普勒测风雷达研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 10-15.
- 2 Rolf E, Kinnard K F, Huffaker R M. Laser-Doppler System for Measuring Three-Dimensional Vector Velocity[R]. US3532427DA, 1969.
- 3 S M Hannon, J A Thomson, S W Henderson, *et al.*. Windshear, turbulence, wake vortex characterization using pulsed solid state coherent lidar[C]. Proceedings of SPIE: Air Traffic Control Technologies, The International Society for Optical Engineering, 1995, 2464: 94-102.
- 4 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.
- 5 J W Bilbro, W W Vaughan. Wind field measurement in the nonprecipitous regions surrounding severe storms by an airborne pulsed Doppler lidar system[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1978, 59(9): 1095-1100.
- 6 M J Kavaya, S W Henderson, J R Magee, *et al.*. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system [J]. Opt Lett, 1989, 14(15): 776-778.
- 7 S W Henderson, P J M Suni, C P Hale, *et al.*. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 4-15.
- 8 M J Kavaya, U N Singh, G J Koch, *et al.*. Development of a compact, pulsed, 2-micron, coherent-detection, Doppler wind lidar transceiver; and plans for flights on NASA's DC-8 and WB-57 aircraft[C]. 15th Coherent Laser Radar



- Conference, 2009: 1-4.
- 9 K Mizutani, T Itabe, S Ishii, *et al.*. Conductive-cooled 2 micron laser for CO<sub>2</sub> and wind observations[C]. Proc of SPIE Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring IX, 2008, 7153: 71530J.
- 10 G D Emmitt, S A Wood, G Koch. Comparison of GWOLF and VALIDAR Doppler lidar measurements[C]. 85th AMS Annual Meeting, 2005: 5193-5197.
- 11 Bai Xue, Guo Pan, Chen Siying, *et al.*. Simulation in the time domain and time-frequency analysis for coherent Doppler wind lidar[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114113.  
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): 0114113.
- 12 Gao Xin, Han Yuli, Jin Ge. Data acquisition system for wind lidar in the upper atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0113002.  
高昕, 韩於利, 金革. 中高层大气测风激光雷达数据采集系统[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113002.
- 13 Bu Lingbing, Chen Weibiao, Zhou Jun, *et al.*. Studies of fringe technique wind lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 175-178.  
卜令兵, 陈卫标, 周军, 等. 条纹技术测风激光雷达研究[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 175-178.
- 14 Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong, *et al.*. Development and applications of spaceborne lidar[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(0714): 58-63.  
李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(0714): 58-63.
- 15 Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun, *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection doppler wind lidar[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1339-1344.  
刘继桥, 卜令兵, 周军, 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1339-1344.
- 16 Wang Chunhui, Li Yanchao, Xu Bo, *et al.*. Method and simulation of data quality control in velocity azimuth display inversion of wind lidar[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 515-518.  
王春晖, 李彦超, 徐博, 等. 激光测风雷达速度方位显示反演中数据质量的控制方法与仿真[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 515-518.
- 17 Hu Hongwei, Hu Qiquan. Beam scanning and inversion method for lidar detecting wind[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(6): 720-723.  
胡宏伟, 胡企铨. 星载激光测风雷达的光束扫描及风场反演[J]. 光学学报, 2001, 21(6): 720-723.

栏目编辑: 史敏