

关于发展我国空间激光气象雷达的建议

王建宇, 洪光烈

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:云、气压、气温、风场、湿度分布是数值天气和气候预报模型的基本变量。国际上已经实施或正在进行的空间激光雷达与大气探测有关的计划有多项。对我国发展空间气象激光雷达的建议:二极管泵浦 Nd:YAG 的激光器及其二倍频和三倍频器作为光源,用同一个望远镜接收大气的散射回波,采用多种分光技术,从回波中分离出 Mie 散射回波,并且直接由光谱技术得到 Mie 散射和 Rayleigh 散射的多普勒频移量和谱展宽量,获取大气的气溶胶、云、风场、气温等数据;由 Nd:YAG 的激光器泵浦光参量振荡器(OPO)实行差分吸收方法来探测大气水汽(湿度)分布廓线和通过氧气的 761nm 差分吸收得到气压等气象要素的信息。

关键词:激光雷达; Mie 散射; Rayleigh 散射; 差分吸收; 多普勒频移

中图分类号: TP721.2 **文献标识码:** A

Advice About Our Country Developing Spaceborne Meteorologic Lidar

WANG Jian-yu, HONG Guang-lie

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Cloud, atmospheric pressure, temperature, wind and humidity are fundamental parameters for numerical weather and predicting climate. International, some programs are implementing or have been implemented. Advice about our country developing spaceborne meteorologic lidar was provided: Nd:YAG laser, frequency doubled and frequency tripled was used as optical source, atmospheric echo is received by telescope, using spectroscopy technology, we can separate Mie backscatter from echo, and directly find Doppler shift and backscattering spectrum-broaden so as to acquire data about atmospheric aerosol, cloud, wind, temperature. Nd:YAG laser pumping OPO lidar implement differential absorption technique to detect atmospheric vapor (humidity) distributing profile, and a lidar acquire atmospheric pressure with oxygen 761nm differential absorption technique.

Key words: lidar; Mie backscattering; Rayleigh backscattering; differential absorption; doppler shift

1 引言

垂直分布的气溶胶和云剖面,对其他主被动卫星传感器的大气校正有重要意义。虽然红外卫星传感器(如 NOAA)能够检测云的覆盖以及气溶胶的总的厚度,但还是难以获得其垂直分布。水汽含量(即湿度)及其垂直分布特征在大气动力学、气象学、全球水文循环和大气化学等有联系的一系列大气过程中有着重要影响。在目前的全球观测系统中,由于风场观测的覆盖范围的局限,已经限制了有关的气候预测和天气预报的深入研究。被动遥感能提供温度面上测量,得到大气温度的垂直分布测量结

果较难,尤其是白天太阳辐照条件下探测更难一些。

研究空间激光雷达的主要目标之一是为了获得高精度、高垂直分辨率绘制大气压力、湿度廓线、大气温度、风场的空间遥感能力,以提高我们对大气过程和气候变化的理解。空间激光雷达被认为是能够精确观测全球风场、气溶胶、云的垂直物理和化学性质的唯一设备。

作者简介:王建宇(1959-),男,博士生导师,博士后合作导师,从事红外遥感和激光遥感载荷研究。

收稿日期:2008-09-26; **收稿日期:**2008-11-16

2 国际上的研究现状

2.1 航天飞机激光雷达 LITE (lidar in-space technology experiment)

1994年9月9日,三波长米散射激光雷达由“发现号”航天飞机搭载上天。LITE采用Nd:YAG激光器作为发射源,经二倍频和三倍频同时输出1064nm,532nm和355nm激光脉冲;望远镜直径1m;探测器针对不同波长分别使用光电倍增管和雪崩光电二极管。激光雷达回波信号从40km高度到地球表面回波脉冲覆盖了5~6个数量级大小的动态范围。云的回波峰值信号变化超过2个数量级。观测任务执行时间被分成对气溶胶、云和地球表面的观测,三个通道可以独立地设置。LITE总共运行了53h,得到了覆盖地面轨迹1.4百万公里共计40GB的数据。至今,这些数据仍被广泛应用。

2.2 地球科学激光高度计 GLAS (geoscience laser altimeter system)

2003年1月13日,美国NASA成功地发射了云和陆地高程卫星ICES (cloud and land elevation satellite),在卫星上搭载了地球科学高度计系统GLAS (geoscience laser altimeter system)。ICES的主要任务是测量极地的冰盖总量,研究冰盖总量对海平面变化的影响;测量云和气溶胶的分布和垂直结构,其中云参数的观测包括多层云的高度、云顶和云底的高度、散射截面的垂直廓线和薄云的光学厚度。气溶胶的观测包括气溶胶检测、霾层的高度、消光截面的廓线及气溶胶光学厚度等;测量冰面(如格陵兰和南极冰层)、陆地地形和植被的冠盖高度,了解表面粗糙度、反射率、植被高度和冰雪面的特征。

2.3 云气溶胶激光雷达红外探索卫星观测系统 (CALIPSO)

CALIPSO (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation)于2006年4月28日成功发射升空。CALIPSO由三个探测系统组成,即偏振双波长Mie散射激光雷达、成像红外辐射计(IIR)和广视场照相机(WFC)。激光雷达探测大气气溶胶和云的光学性质与形态的垂直分布廓线。成像红外辐射计测量热红外窗口区域三个波长8.7 μm ,10.5 μm 和12.0 μm 的辐射,用于获取卷云的反射率和云粒尺度。广视场照相机用于气象信息和高精度的空间记录。根据CALIPSO的技术参数对其探测云和大气气溶胶的性能进行了数值模拟计算。模拟计算时,假定10km高度以上的卷云含有冰晶粒子。从模拟图中可以看出,即使在17km高度上的高层薄卷云都被532nm平行偏振通道和垂直偏振通道十分清晰地探测到。垂直偏振通道还给出了卷云冰

晶粒子退偏振比的信息。1064nm通道的探测信号也能较为清晰地区分云层和大气气溶胶层。

2.4 俄罗斯、法国空间对地表高度和云的激光探测

1996年,法国与俄罗斯合作在和平号(MIR)空间站PRIRODA模块上安装了ALISSA星载激光雷达,主要测量大气云的垂直结构、高空卷云和云顶绝对高度。获得的数据对于地球气象研究具有重要意义。发射激光器波长为单色的532nm波长,单脉冲能量10mJ,重复频率50Hz,望远镜口径400mm,距离分辨率150m。该载荷设备的成功运行,证实了甚至低功率的星载激光雷达也能够获得云和气溶胶边界层的有用信息。

2.5 美国NASA/GSFC中心空间激光测风计划

SPARCLE是由美国NASA/MSFC中心负责的,为二十一世纪地球轨道任务EO-2设计的遥测设备。系统采用NASA/LaRC研制的半导体激光泵浦的Tm, Ho:YLF激光器,工作波长为2 μm ,脉冲能量为100mJ,脉冲宽度为180ns,重复频率为6Hz。激光发射和接收共用一个口径为25cm的望远镜,采用石英楔型扫描仪。与此同时,美国NASA/GSFC开始研制航天飞机载的直接探测多普勒激光雷达测风系统——Zephyr。Zephyr采用双边缘技术分别测量大气气溶胶和分子后向散射信号来反演风速信息。系统采用半导体泵浦的、种子注入的Nd:YAG激光器,其基波频率(1064nm)的脉冲能量0.5J,用于测量气溶胶散射;三倍频(355nm)的脉冲能量为0.2J,测量大气分子散射。激光的重复频率为25Hz,1064nm和355nm的频率宽度分别为80MHz和240MHz。系统拟采用1m口径的望远镜,信号接收分别采用模拟和光子计数两种方式。预计在2015年以后发射。

2.6 欧空局星载激光雷达测风

欧空局(ESA)决定选用直接探测多普勒激光雷达作为ALADIN (atmospheric laser doppler lidar Instrument),并且准备搭载在2008年发射的ADM-Aeolus (atmospheric dynamic mission aeolus)卫星上,将首次从太空直接测量全球三维风场,将是第一个测量全球三维风场的星载多普勒激光雷达。目前,ESA的直接探测激光雷达准备采取条纹图像和双边缘检测技术,采用100Hz激光二极管泵浦的三倍频Nd:YAG激光器,波长355nm,单脉冲能量130mJ,激光线宽30MHz,望远镜的接收口径1.5m。卫星的轨道高度400km,天顶角为35°。测量高度范围从地球边界层到低的平流层(0~20km)。ALADIN采用了两个接收探测器通道,其中Mie通道接收云和气

溶胶散射信号, Rayleigh 通道接收分子散射信号, 在 Mie 散射信号很弱的地方 Rayleigh 通道发挥重要作用, 因此两个通道具有互补作用, 分别以较高精度测量高低空的风场。

3 美国 NASA 地球科学空间主动遥感 2000 ~ 2020 年研究计划

美国地球科学技术局 (ESTO) 它成立了技术专家委员会, 目的在于就科学探测目标和寻求实现这些目标的技术途径提出建议。专家委员会特别关注激光器和激光雷达技术, NASA 兰利研究中心 2000 年 4 月 9 日, 这个专家委员会提出了 2000—2020 年的工作计划^[1], 如图 1 所示。

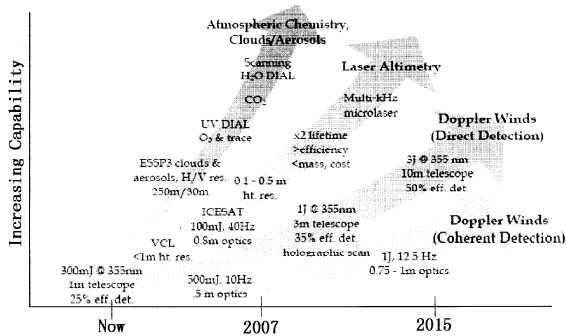


图 1 美国 NASA 地球科学空间主动遥感 2000 ~ 2020 年研究计划

4 研究方案分析

4.1 Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶和云层

大气中的各种固态和液态气溶胶粒子, 包括尘埃、烟雾、云层等与激光的相互作用主要表现为散射, 称为 Mie 散射。Mie 散射的特点是散射粒子的尺寸与入射激光波长相近或比入射波长更大。Mie 散射的辐射波长与入射波长相同。

Mie 散射激光雷达是一种用于探测 30km 以下低空大气中的尘埃、云雾等气溶胶粒子的激光雷达。大气中的这些气溶胶粒子对激光的散射机制为 Mie 散射, Mie 散射具有较大的散射截面, 使 Mie 散射激光雷达的回波信号通常较大^[2]。

Mie 散射激光雷达是最成熟的一种固体激光雷达, 它只测量介质的后向散射强度信号, 回波频率不发生变化, 所以对激光的频率和相干性没有要求。它是最早在空间使用的激光雷达。用于测量云底高度、气溶胶结构或能见度的激光雷达都是 Mie 散射激光雷达, Mie 散射激光雷达要求对大气气溶胶散射敏感, 所以, 系统信噪比 (S/N) 是影响系统测量性能主要因素。以 532nm 作为探测波长, 因为基于该波长的地基雷达和航空雷达已经积累了大量探测数据, 反演方法也比较成熟^[3]。Mie 散射激光雷达示意图如图 2 所示。

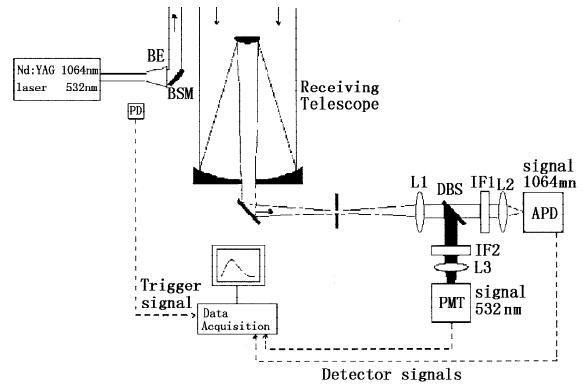


图 2 Mie 散射激光雷达示意图

偏振激光雷达也是一种 Mie 散射激光雷达, 对后向散射进行正交偏正分光后分别检测, 得到强度和退偏比, 从而获得云中的物理特性和冰晶信息^[4]。

接收到的 Mie 散射回波随着高度是光滑变化的, 如果出现突起, 即是云产生的, 由脉冲时间可以知道云高。利用 1064nm 回波可以得到云高^[5], 参考工作参数如表 1 所示。

表 1 参考工作参数表

激光器	二极管泵浦的 Nd:YAG 激光器
波长/nm	532;1064
单脉冲能量/mJ	110;110
脉冲重复率/Hz	20
线宽/pm	30
偏振度/%	99.9 (532nm)
发散角/ μ rad	100
接收望远镜直径/cm	100
视场角/ μ rad	130
垂直采集分辨率/m	30(低层);60(高层)
水平采集分辨率/m	333(低层);1000(高层)
数据率/kbps	320

4.2 多普勒激光雷达探测全球风场

非相干激光多普勒测风技术在最近十年间得到快速发展, 它对探测器前的光信号入射到高分辨率干涉仪或带宽非常窄的滤波器进行谱分析, 通过比较散射光频率和发射光频率得到多普勒频移。由于非相干测量方法相对简单、受大气波动影响小和工程实现相对容易, 而成为目前普遍采用的多普勒测风手段^[6]。

多普勒激光雷达, 采用波长 1.064 μ m 和 355nm 两个通道的双边缘工作方式, 能同时测量 Mie 和 Rayleigh 散射, 还可以从能量监测通道获取云底高度和大气密度等副产品。因此实际上 Mie 散射激光雷达和多普勒激光雷达可以完全一体。多普勒雷达

示意图如图3所示。

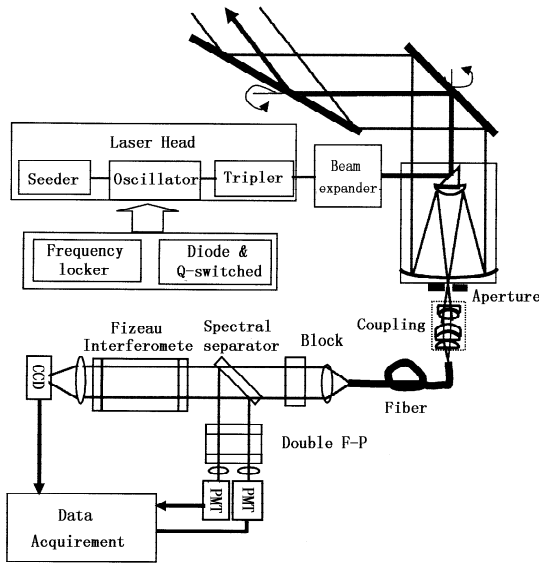


图3 多普勒雷达示意图

干涉仪光谱分析技术^[7]:望远镜耦合光纤输出回波,首先经过一个宽带干涉滤光片,然后送到 Mie 散射通道,由于 Mie 散射通道只有一小部分光透过 Fizeau 干涉仪,大部分光被反射回来,因此在光路中插入 1/4 波片,这样入射和反射光偏振方向正交,由偏振分束镜转入 Rayleigh 散射通道中。

(1) 双边边缘技术

两个 F-P 干涉仪透过率曲线的中心频率位于 Rayleigh 散射谱的两翼,在无多普勒频移时,落入两个信号通道的强度相同;在有多普勒频移时,两个通道的信号强度发生变化,一个变大,一个变小,比较它们的大小,将两个通道信号之差除以两个通道之和就可以得到多普勒频移量。为了得到上述的频谱结构,可以采用如图4所示的 F-P 干涉仪结构。将干涉仪分割成两部分,它们的腔长存在一个微小的差别,以形成中心频率上的差异,然后在光出射端,用透镜将这两路光束分别照射不同的探测器。由于两个平板固定在一个极板上,消除由于振动和热效应引起的两个通道中心频率间隔的漂移。F-P干涉仪的一个平板上镀同种厚度的薄膜,另一个平板上镀两种厚度的薄膜。

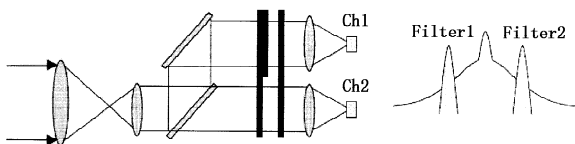
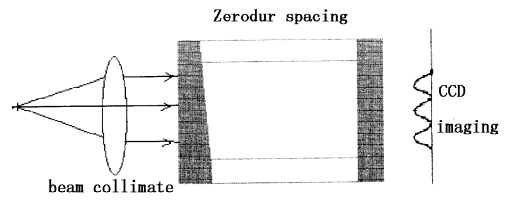


图4 双边边缘探测示意图

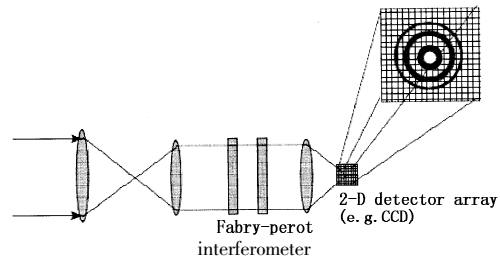
(2) 干涉条纹图像技术

Fizeau 干涉仪也由两块光学平板组成,但彼此之间以一定的微小楔角分开,形成楔形空气隙。入

射光在通过两个平板间楔形空气隙后,沿楔角方向产生干涉条纹,如图5(a)所示。Fizeau 楔角干涉条纹强度分布可以采用函数描述,即 $A(\phi) = \frac{(1-R)^2}{1-2R\cos(\phi)+R^2}$, 式中, R 为平板内表面的反射率, ϕ 为相位因子,它与平板间隔 d 及入射光频率 ν 之间的关系为 $\phi = 4\pi d\nu/c$, 可见干涉条纹的空间位置与回波光频率有关,当发生多普勒频率移动时,干涉条纹的空间位置随之发生移动,可由干涉条纹移动量反演风速。干涉仪要放置在恒温装置中。如果两个平板不是形成微小楔角,而是平行,在焦平面上相干成环形图像,如图5(b)所示。



(a) 两平板以一定微小楔角分开



(b) 两平板平行

图5 干涉条纹成像探测技术示意图

Mie 散射通道采用背面辐照的积分 CCD 探测器, Rayleigh 散射通道则采用 PMT(光电倍增管)作为探测器^[8]。参考工作参数如下:

- 355nm 发射机(Nd:YAG 激光器,三倍频);
- 300 ~ 500mJ@100Hz;
- 250MHz(0.1pm)线宽;
- >5ns 脉冲宽度;
- WPE(wall power efficiency)2%,3年寿命。

4.3 紫外 Rayleigh-Mie 散射激光雷达探测白天对流层温度廓线

大气分子的弹性(Rayleigh)散射谱的宽度是温度的直接函数,通过分析雷达回波中(Rayleigh)散射谱宽度的变化,间接地探测大气温度,图6是激光雷达探测大气温度原理的示意图。

大气分子瑞利频谱的 FWHH(半高全宽)可以表示为^[9]:

$$\Delta\nu_w = 2\nu_a \left(\frac{8KT\ln 2}{mc^2} \right)^{1/2}$$

式中, ν_a 为激光发射频率; K 为玻尔兹曼常数; T 为大气温度; m 为分子质量; c 为光速。设激光波长为 355nm, 由上式可以得到瑞利散射光谱宽度与大气温度关系如图 7 所示^[10]。

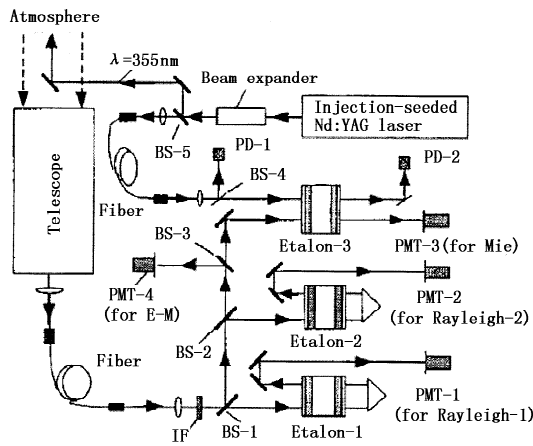


图 6 激光雷达探测大气温度的示意图

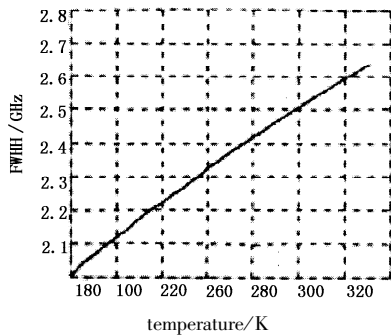


图 7 瑞利散射光谱宽度与大气温度关系

从图 8 中可以看出^[11], 温度升高, Rayleigh 散射信号谱变宽了, 通过 Filter1 的信号减小, 而通过 Filter2 的信号强度增加了; 反之亦然, 由 Filter1 和 Filter2 的信号强度相对变化, 反映 Rayleigh 散射信号谱宽度的变化, 从而反演出温度。Filter3 中心波长对准激光的发射波长, 即对准无多普勒频移的 Mie 散射中心波长 354.7nm。

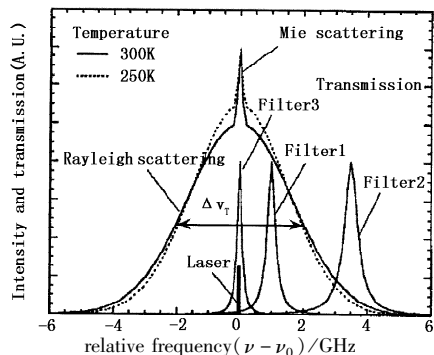


图 8 Mie 和 Rayleigh 散射信号谱以及滤光片的频率范围

参考工作参数如下:

种子注入 Nd:YAG 激光器

- 波长 354.7nm
- 脉冲能量 500mJ
- 脉冲重复频率 20Hz
- 谱线宽 90MHz
- 激光谱不纯度 < 1%
- 光学望远镜 1000mm
- 视场 0.1mrad
- 干涉滤光片带宽 1nm at 60%
- FPE 滤光片
- Filter 1 (Rayleigh - 1) 1.0, 20, -43
- Filter 2 (Rayleigh - 2) 3.5 GHz, 35, -45
- Filter 3 (Mie) 0, 70, 0
- PMT 探测器 Hamamatsu R3896

4.4 差分吸收激光雷达探测全球水汽(湿度)分布

差分吸收激光雷达测量大气 H₂O 时, 发射机发射两束激光, 接收机交替接收两束激光的大气后向散射回波。由于两束激光的 H₂O 吸收截面不同, 波长为 λ_{on} 的一束(吸收截面 $\sigma(\lambda_{on})$) 被 H₂O 强烈吸收, 波长为 λ_{off} 另一束(吸收截面 $\sigma(\lambda_{off})$) 被 H₂O 吸收较弱, 这两个波长相差较小, 所以可认为大气中气溶胶对它们的散射系数及非 H₂O 气体对它们的吸收截面相近。由于对 H₂O 的吸收强度不同, 探测器接收到的两束激光的后向散射回波就有区别。根据回波的信号的差别就可以计算出 H₂O 浓度的距离分布。探测的回波方程为:

$$P(R, \lambda_{on}) = \frac{P_0(\lambda_{on}) C(\lambda_{on}) A \beta(\lambda_{on}, R) \Delta R}{R^2}$$

$$\exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha(\lambda_{on}, z) + N(z) \cdot \sigma(\lambda_{on})] dz\right\} \quad (1)$$

$$P(R, \lambda_{off}) = \frac{P_0(\lambda_{off}) C(\lambda_{off}) A \beta(\lambda_{off}, R) \Delta R}{R^2}$$

$$\exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha(\lambda_{off}, r) + N(r) \cdot \sigma(\lambda_{off})] dz\right\} \quad (2)$$

式中, $P(R, \lambda)$ 是接收机接收到的来自 $R \sim R + \Delta R$ 高度大气段的回波功率; $P_0(\lambda)$ 为发射激光束的功率; ΔR 是距离分辨率; $C(\lambda)$ 是系统的接收效率常数; R 为探测距离; A 为接收望远镜的受光面积; $\beta(\lambda, r)$ 为大气中探测光的后向散射系数; $\alpha(\lambda, r)$ 是除了 H₂O 吸收之外的消光系数; $N(r)$ 是 H₂O 浓度。因为 λ_{on} 与 λ_{off} 相近, 近似认为:

$$\beta(\lambda_{on}) = \beta(\lambda_{off}), \alpha(\lambda_{on}) = \alpha(\lambda_{off}), C(\lambda_{on}) = C(\lambda_{off})$$

将式(1)和式(2)相除(即排除大气变化的主要因素)、两边取对数、微分运算, 可得到计算 H₂O 浓度的表达式如下:

$$N(R) = \frac{1}{2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{P(R, \lambda_{off})}{P(R, \lambda_{on})} \right] \quad (3)$$

经典的差分吸收雷达设计中,如差分吸收雷达测量 SO₂, λ_{on} 对应于被测气体吸收谱的峰, λ_{off} 对应于被测气体吸收谱的谷。我们认为对于 H₂O 气体的红外吸收谱来说,谱线很窄, λ_{on} 和 λ_{off} 的中心波长可以对应同样一个波长,但发射光谱的谱宽相差较大,如 λ_{on} 光发射谱宽窄小于或相当于被测气体吸收谱线宽度的 1/10(0.02cm⁻¹),它被强吸收;而 λ_{off} 发射谱宽大于吸收谱线宽度的 10 倍(2cm⁻¹), λ_{off} 光很少被吸收,即有效吸收截面小。

通过种子注入光参振荡器中使得发射激光的谱线宽度明显小于水汽 940nm 谱线宽度;通过水汽样品气体池和锁相放大器将发射 on 激光锁定在水汽的谱线上。当种子光被截止,光参量振荡器输出谱线很宽的光^[13]。图 9 表示 532nm 激光泵浦 OPO 产生 940nm 激光发射机原理。参考工作参数如下:

- 0. 940μm 波长对
- 0. 5 ~ 1J@10Hz 双脉冲
- 0. 25pm 线宽, 频谱纯度 >99%
- WPE15%, 3 年寿命

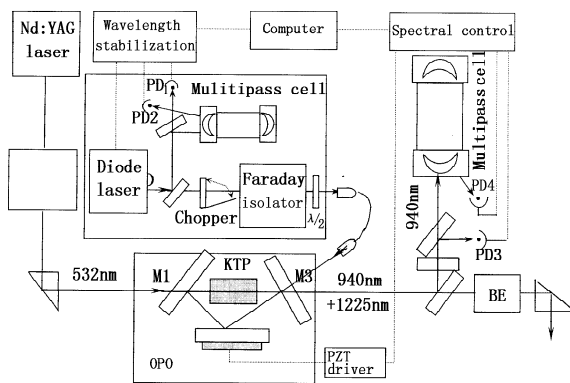


图 9 532nm 泵浦 OPO 产生 940nm 激光发射机示意图

(周期性开关 chopper, 可以轮流输出 on 窄频光源和 off 宽频光源)

4.5 差分吸收激光雷达探测全球气压分布

氧气 A 带有 761nm 强吸收谱线;激光器输出两种波长的激光束,它们波长之相差较小;一个被氧气强吸收,另一种被氧气吸收很较弱;两者回波的强弱反映了氧气分子的密度和大气压对吸收谱线的影响,间接地反映大气压力^[14-15],如图 10 所示。761nm 激光器可以有三种来源:

- 1) Nd:YAG 激光器二倍频泵浦钛宝石激光;
 - 2) 二极管泵浦翠宝石激光器;
 - 3) C 波段掺铒光纤激光器 1522nm 二倍频。
- on 光源通过种子注入压缩和锁定线宽, off 光源

不必太严格。参考工作参数如表 2 ~ 表 4 所示。

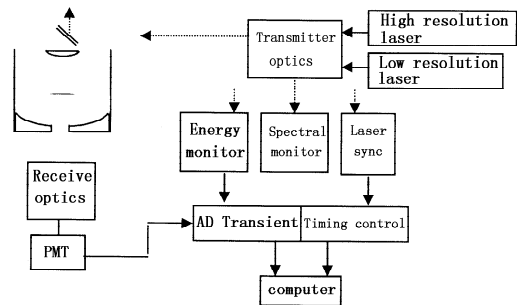


图 10 双波长氧差分吸收雷达探测大气压力系统示意图

表 2 发射机工作参数

	激光器 1	激光器 2
• 类型	Alexandrite	Alexandrite
• 输出能量/mJ	450	400
• 重复频率/Hz	10	10
• 脉冲宽度/ns	100	130
• 调谐范围/nm	725 ~ 780	740 ~ 770
• 带宽/cm ⁻¹	0.016	0.026
• 发散角 × 孔径/(mrad × mm)	6	10

表 3 接收机工作参数

• 望远镜	100cm diam Cassegrain
• 光学滤光片	84% transmitting at 760 nm
• 探测器	Si - APD
• 量子效率	50% at 760 nm
• 放大器	Analog Modules LNCA - 3000 V/A

表 4 数据系统工作参数

• A - D 转换器	12 - bit
• 采样速率	5MHz typical, 20MHz max

$$P_x(R) = \frac{Ec\eta}{2} \frac{A}{R^2} \beta(R) \times \exp(-2 \int_0^R [\alpha(r) + K_c$$

$$(r) + K_x(r)] dr)$$

其中, P_x(R) 表示激光雷达接收到的脉冲能量; β(R) 为大气的 Mie 和 Rayleigh 散射之和; α(r) 为大气的消光系数; K_c(r) 为大气的非氧吸收; K_x(r) 为氧气的吸收系数; η 为雷达的效率; E 为雷达的发射脉冲能量; A 为雷达的接收面积。对于 on 和 off 两种波长而言,因为他们十分相近,可以认为以上方程中的参数只有 K_x(r) 和 E 有差别^[16]。因此, $\bar{K}(r) = K_{on}(r) - K_{off}(r)$ 表征两种波长对氧气的吸收系数差:

$$\frac{P_{on}(R)}{P_{off}(R)} = \frac{E_{on}}{E_{off}} \exp(-2 \int_{R_0}^R \bar{K}(r) dr) \quad (4)$$

$$\int_{R_0}^R \bar{K}(r) dr = -\frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_{on}(R)/P_{off}(R)}{E_{on}/E_{off}} \right) \quad (5)$$

因为 $\int_{R_0}^R \bar{K}(r) dr$ 与氧气的密度成正比,跟氧气吸收光谱的压力展宽相关联,所以有:

$$\int_{R_0}^R \overline{K}(r) dr = C^* |p^2(R) - p_0^2|$$

其中, C^* 是常数, 可以通过实验来标定; $p(R)$ 和 p_0 是在 R 和 R_0 处的气压。

5 结论

发展空间激光雷达探测大气参数, 服务于气象预测是未来我国空间技术的重要发展方向。为了提高空间激光雷达的性价比, 我们建议: 共用一台二极管泵浦 Nd:YAG 的激光器及其二倍频和三倍频器作为光源, 用同一个望远镜接收大气的散射回波, 采用多种分光技术, 从回波中分离出 Mie 散射回波, 并且直接由光谱技术得到 Mie 散射和 Rayleigh 散射的多普勒频移量和 Rayleigh 散射谱展宽, 从而得到大气的气溶胶和云、大气温度, 和全球风场; 以及用差分吸收雷达探测大气水汽分布(湿度分布), 通过氧气的差分吸收获得气压分布, 对于进一步了解大气十分有益。

一些在地基激光雷达和机载激光雷达雷达中可能被应用得很好的方案, 并不能应用于空间激光雷达中, 例如利用氧气和氮气的转动 Raman 散射探测大气温度, 或利用氮气的振动 Raman 散射探测大气密度和气压, 振动 Raman 散射探测水汽, Raman 散射强度比 Mie 和 Rayleigh 散射小三个数量级, 不利于空间平台的远距离探测, 因此不被采纳。

空间激光雷达不可能代替其他气象探测手段, 但随着该领域的不断进步, 它将成为气象探测技术的重要组成部分, 对其他手段形成有力的补充。

参考文献:

- [1] Frank Peri, Jr. *, George J Komar **, Active remote sensing technology development plans for NASA's Earth Science Enterprise, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring II [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4484.
- [2] Gennadii G Matvienko, Vladimir A Alekseev', Anatolii I Glishina, et al. Simulation of the aerosol spaceborne lidar TECTONICA-A, part of the EUROPTO conference on laser radar ranging and atmospheric lidar techniques II Florence [J]. SPIE, 1999, 3865.
- [3] Chris A Hostetler, John W Hair, Anthony L. Cook NASA Langley research center, a compact airborne high spectral resolution lidar for observations of aerosol and cloud optical properties.
- [4] B E Schutz. University of Texas at Austin Center for Space Research, R1000 Austin, TX 78712, USA, Spaceborne Laser Altimetry and Beyond, 2001.
- [5] Bob E Schutz, Team Leader, H Jay Zwally. Project Scientist, Jack Bufton, Charles Bentley, Thomas Herring, Jean-Bernard Minster, James Spinhirne, Robert Thomas, NASA Earth Observing System, Geoscience Laser Altimeter System, GLAS Science Requirements, Prepared by GLAS Science Team, Version, 1997, 10(2): 01.
- [6] J A McKay, T D Wilkerson. Direct detection wind speed Doppler lidar systems [J]. SPIE, 3127: 14.
- [7] Direct detection Doppler wind lidar: ground-based operation to space Jinxue Wanga, Michael Dehringb, Carl Nardellb, Deidra Dykemana, Berrien Moore III Proceedings of SPIE Vol. 5154 Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring IV, SPIE, 2003, 5154.
- [8] Georg D Ememitt, SPARCLE: a space-based mission to demonstrate global monitoring of tropospheric winds with a Doppler lidar [J]. SPIE, 3504: 144 - 152.
- [9] Dengxin Hua, Takao Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar by use of a multicavity Fabry-Perot filter for accurate temperature profiling of the troposphere [J]. APPLIED OPTICS, 2005, 44(30): 6474 - 6478.
- [10] Dengxin Hua, Masaru Uchida, Takao Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere [J]. APPLIED OPTICS, 2005, 44(7): 1305 - 1314.
- [11] Dengxin Hua, Masaru Uchida, Takao Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar for daytime-temperature profiling of the troposphere [J]. APPLIED OPTICS, 2005, 44(7): 1315 - 1322.
- [12] G Ehret, A Fix, V Wei, et al. Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapor DIAL application in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. Appl. Phys., 1998, 67: 427 - 431.
- [13] G Poberaj, A Fix, A Assion, et al. Airborne all-solid-state DIAL for water vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment for accuracy [J]. Appl. Phys., 2002, 75: 165 - 172.
- [14] Mark Dombrowski, Geaiy K Schwemmer, C Laurence Korb. A lidar system for measuring atmospheric pressure and temperature [J]. SPIE Laser Radar V, 1990, 1222: 194 - 204.
- [15] C Laurence Korb, Chi Y Weng. Differential absorption lidar technique for measurement of the atmospheric pressure profile [J]. APPLIED OPTICS, 1983, 22(23): 3759 - 3770.
- [16] C Laurence Korb, Geary K Schwemmer, Mark Dombrowski, et al. Airborne and ground based lidar measurements of the atmospheric pressure profile [J]. Applied Optics, 1989, 28(15): 3015 - 3020.