

## 偏振微脉冲激光雷达对一次沙尘过程的探测分析

徐赤东 纪玉峰

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 大气光学中心, 安徽 合肥 230031

**摘要** 在介绍偏振微脉冲激光雷达原理的基础上展示了自主研发的雷达系统。利用这种系统监测了一次沙尘暴过程, 通过分析这次沙尘过程的变化特点认为此次沙尘过程包含有地面扬沙和高空输送两部分。通过数据也说明了偏振微脉冲激光雷达具有较强的沙尘探测能力。

**关键词** 沙尘暴 激光雷达 退偏比

### 1. 引言

我国是沙尘暴高发区, 每年的冬春季节, 沙尘暴从中国北部的广大区域漫天而过。有些在迁移传输的过程中不断沉降, 散落于传输路线上, 而有一些细小颗粒则进入到平流层形成了一层稳定的沙尘层, 无论哪一种都直接影响到地气辐射, 影响到大气气候等。为了解它的变化和特性, 对于沙尘暴的监测也就尤为重要, 对其监测方法也有很多种, 如卫星、雷达、探空等。采用激光雷达监测沙尘更是一个有效的手段, 它能够从地面直接监测沙尘暴的变化、沙尘暴的结构等。我们采用了自己研发的偏振微脉冲激光雷达对沙尘进行了监测。

### 2. 偏振微脉冲激光雷达

#### 2.1 偏振微脉冲激光雷达方程

当一束偏振激光束发射到大气中, 对于球形粒子, 其后向散射光的偏振方向与照射光相同, 即没有发生退偏振现象, 雷达方程如式(1)<sup>[1]</sup>所示。当偏振激光照射到非球形粒子后, 其后向散射光的偏振方向将发生变化, 产生了与发射光相垂直的分量, 即发生退偏振, 可以用式(2)表示。

$$P_p(z) = P_0 k_p z^{-2} \beta_p(z) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_p(z') dz'\right) \quad (1)$$

$$P_s(z) = P_0 k_s z^{-2} \beta_s(z) \exp\left(-\int_0^z (\alpha_p(z') + \alpha_s(z')) dz'\right) \quad (2)$$

式中下标 p 和 s 分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向,  $P_0$  是激光发射功率 ( $W$ ),  $P_p(z)$  和  $P_s(z)$  分别为激光雷达接收到的在距离  $z$  处大气后向散射平行分量和垂直分量的回波功率 ( $W$ ),  $k_p$  和  $k_s$  分别是接收平行分量通道和垂直分量通道的雷达系统常数 ( $W \cdot km^3 \cdot Sr$ ),  $\beta_p(z)$  和  $\beta_s(z)$  分别表示在距离  $z$  处大气后向散射系数的平行分量和垂直分量 ( $km^{-1} Sr^{-1}$ ),  $\alpha_p(z)$  和  $\alpha_s(z)$  分别表示在距离  $z$  处大气消光系数的平行分量和垂直分量 ( $km^{-1}$ )。

激光雷达一般使用退偏比  $\delta$  来描述非球形粒子, 偏振激光雷达探测的退偏振比  $\delta(z)$  可表示为:

$$\delta(z) = \frac{\beta_s(z)}{\beta_p(z)} = k \frac{P_s(z)}{P_p(z)} \quad (3)$$

其中,  $k = k_p / k_s$ 。这样, 通过分析雷达接收到的对应不同高度处两个通道的大气后向散射回波功率以及这两个通道的增益常数比  $k$ , 利用(3)式, 就可以获得大气退偏振比的垂直分布廓线  $\delta(z)$ 。

## 2.2 偏振微脉冲激光雷达 (PMPL)

中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心研制的偏振微脉冲激光雷达外形如图 1 所示。雷达主要由激光发射单元、信号接收单元、采集控制单元和软件组成。雷达可以放置呈任意的角度进行探测。

激光器发射的激光经过扩束器等进入大气后，受到大气分子和气溶胶粒子的散射与吸收，其中后向散射的光子经望远镜接收后由分光系统将平行和垂直偏振光分别送达对应探测器，而计数器按照时序累加所接收的信号，同时将它们存储到数据存储单元。最后这些存储的数据由计算机读出并实时计算出所需的参数。所有操作通过软件控制，可以实现整个雷达的全自动运行。

如表 1 所示，PMPL 主要技术指标如表 1 所示，PMPL 采用的是二极管泵浦的全固态激光器，体积小，能量低，重复频率高，这也正是 PMPL 的关键点之一。PMPL 系统的突出特点是：系统结构简单、体积小、重量轻、眼睛安全、造价低、可连续运行和移动携带方便，关键器件的模块化结构确保了系统工作的稳定性和探测数据的可靠性，能够昼夜自动连续探测<sup>[2]</sup>。

表 1 偏振微脉冲激光雷达主要技术指标

laser	Diode pump Nd:YAG
wavelength	532nm
Repetition	2500Hz
frequency	12ns
Pulse width	10μJ
Energy /pulse	50μrad
FOV	
Receive diameter	160mm
Filter(HW)	0.5nm
Receive range	15KM (day), 6KM (night),
Resolving power	30m
Work mode	Continue or
Weight	intermittent 30KG

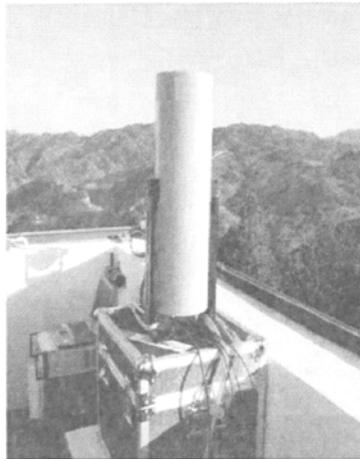


图 1 偏振微脉冲激光雷达

### 3. 沙尘探测与分析

根据原理中的分析利用偏振微脉冲激光雷达对沙尘的监测, 其实质上只要得到退偏比即可。而退偏比测量是偏振微脉冲激光雷达所独有的特性, 根据退偏比可以直接判断是水云、冰晶云、沙尘等。在 Sassen (1991) 的综述文章中提供了在实验室获得的大气中不同类型粒子的退偏比<sup>[3]</sup>。在不考虑多次散射的情况下, 一般洁净大气远小于 0.1, 沙尘 0.1-0.3, 卷云 0.4-0.7, 较重沙尘暴可超过 0.4。

偏振微脉冲激光雷达在工作时同时测量垂直通道和平行通道的回波信号, 再根据雷达方程和退偏比计算公式计算得到退偏比的分布廓线。在进行沙尘暴测量时, 为了解沙尘暴的垂直分布和变化过程, 一般将镜筒垂直放置, 直接将激光垂直发射到大气中。

如图 2 是 2006 年 3 月 19 日在沈阳测量的退偏比演变过程, 根据以上分析可以认定是沙尘暴天气, 数据给出的是从下午的 19:40 到 20 日的 05:40 共 9 个小时的沙尘的演变情况。在 0.6 千米到 1.2 千米左右有一个几百米厚的相对沙尘较少的区域, 在 1.2 千米以上的区域存在厚度约 1.5 千米的沙尘层, 而 0.6 千米以下退偏比逐渐变大且区域变厚, 而两层之间没有特别明显的连接层, 即两层退偏比较大的区域存在有明显的分界线。

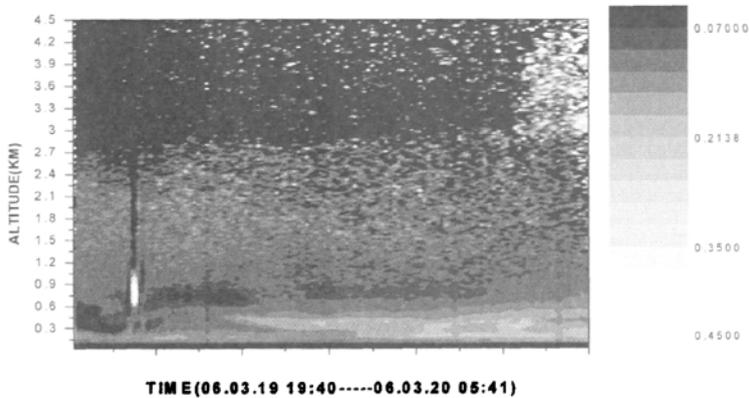


图 2 退偏比连续变化过程

在 3 月 19 日 19:40 时底层信号还不是很强, 单独提取 19:55 的信号来看 (图 3), 图中左侧是退偏比, 右侧是垂直 (s) 和平行通道 (p) 的实测廓线, 可以看出底层在开始时只有 0.15 左右, 再往上有一个极小点, 而在 2006 年 3 月 20 日 04:44 时底层已经增大到 0.2, 且最小值点的位置已经发生变化。在 1.2 千米以上起始时退偏比就在 0.15 左右, 在 20 日时变化非常剧烈, 数值明显增大。

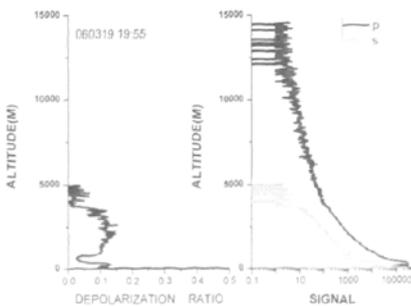


图 3 2006 年 3 月 19 日测量信号及退偏比

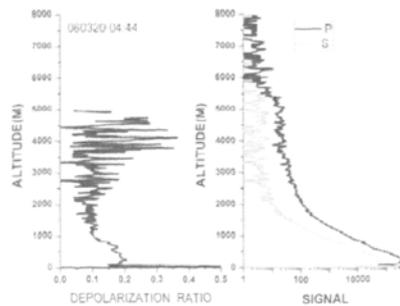


图 4 2006 年 3 月 20 日测量信号及退偏比

从图 2 和起始、结束的数据变化特点来推断，这一次的沙尘包含有地面扬沙和高空外来输入两种。这是因为地面退偏比值在起始时就有明显的沙尘信息，且与高层之间存在明显分界，所以地面的沙尘应该起源于地面扬沙。随着时间的推移地面退偏比增大，这与地面扬沙存留在大气中没有沉降有关，同时与高层沙尘不断降落也有关。由于底层沙尘的增多和加厚，雷达自身回波信号也直接受到影响，如图 3-4，在起始时刻平行通道还可以测到 12 千米，到第二天时只能到 6 千米，沙尘结构对激光信号的衰减还是十分严重的。

#### 4. 结论

通过对偏振微脉冲激光雷达 (PMPL) 的介绍和对一次沙尘过程的监测分析，PMPL 可以用于沙尘暴的监测，能够反映出沙尘的分布结构，变化过程等信息。因此，如果采取多区域布点测量的方式应该可以获得更多的沙尘迁移、整层结构变化的信息。

#### 参考文献

- [1] O.Uchino, I.Tabata, K.Kai and Y.Okada: Polarization Properties of Middle and High Lever Clouds Observed by Lidar. J. Meteor. Soc. Japan, 1988, vol.66, pp607-616
- [2] Ji Yufeng, Xu Chidong, Wang yuanjun, et al, A New Lidar—Developed Micro pulse lidar, Jiansuqixiang, 2001, special, 26-30(in Chinese)
- [3] K.Sassen: Lidar Backscatter Depolarization Technique for Cloud and Aerosol Research. pp.393-416