

单波长发射五通道接收激光雷达系统研制

陶宗明^{1,2}, 单会会¹, 张 辉¹, 张连庆¹, 王申浩¹, 麻晓敏^{1,3,4}, 周浦城², 姚 翎², 薛模根²,
王邦新³, 谢晨波³, 刘 东³, 王英俭³

- (1. 陆军军官学院 基础部 物理教研室, 安徽 合肥 230031;
2. 陆军军官学院 偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
4. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 后向散射激光雷达是探测大气气溶胶参数的有力工具,但它存在盲区 and 过渡区,且需要假设气溶胶的消光后向散射系数比来反演气溶胶的参数,这些限制了它的探测范围和精度。集侧向散射、后向散射和拉曼散射于一体的单波长发射五通道接收激光雷达系统,克服了上述困难。该激光雷达可以探测气溶胶的退偏比廓线、水汽混合比廓线、后向散射系数廓线和消光系数廓线等。气溶胶后向散射系数和消光系数可从地面到对流层顶进行探测,气溶胶退偏比廓线可以在对流层内进行探测,水汽混合比廓线可以在边界层内进行探测。在硬件条件的基础上,分析了各通道的信噪比和探测结果的随机相对误差。实例探测表明:该激光雷达系统数据可靠,探测范围较广。该系统的建立,为进一步深入研究气溶胶消光系数、水汽时空分布以及它们之间相互关系奠定了坚实的实验基础。

关键词: 大气光学; 大气散射; 激光雷达; 后向散射系数; 水汽混合比; 退偏比

中图分类号: TN958.98; P407.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1030002

Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receivers

Tao Zongming^{1,2}, Shan Huihui¹, Zhang Hui¹, Zhang Lianqing¹, Wang Shenhao¹, Ma Xiaomin^{1,3,4},
Zhou Pucheng², Yao Ling², Xue Mogen², Wang Bangxin³, Xie Chenbo³, Liu Dong³, Wang Yingjian³

- (1. Section of Physics T&R, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology, Anhui Province, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;
3. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 4. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Backscattering lidar is a powerful tool for atmospheric aerosol detection, but it can not receive the full signals in lower hundreds of meters, and has an assumption of lidar ratio for aerosol backscattering coefficient reversion. One wavelength emission and five channel receivers lidar system based on backscatter, side-scatter, and Raman scatter technique overcomes the above shortcomings. The

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41475025)

作者简介: 陶宗明(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达研制和激光雷达大气探测方面的研究。Email: zmtao@aiofm.ac.cn

system can detect aerosol depolarization ratio profile, water vapor mixing ratio profile, backscattering coefficient profile and aerosol extinction coefficient profile. Aerosol backscattering coefficient and extinction coefficient profile were from the ground to the tropopause, aerosol depolarization ratio profile was in troposphere, and water vapor mixing ratio was in planetary boundary layer. The signal to noise ratios of all channel and relative errors of detected results were analyzed based on the system hardware. Case study indicates that the data of this system are reliable, and detection ranges are rather wide. The system can be used for studying the spatio-temporal distribution of atmospheric aerosol extinction coefficient, water vapor and their relationship.

Key words: atmospheric optics; atmospheric scatter; lidar; backscattering coefficient; water vapor mixing ratio; depolarization ratio

0 引言

大气气溶胶主要分布在对流层内,其中绝大部分都在大气边界层内,它对人体健康和全球气候都有一定的影响^[1]。具体来说,一方面,它是大气污染物 PM2.5 和灰霾的主要成分,是城市光化学烟雾的重要来源等,给人体的健康、日常生产和生活带来严重的影响;另一方面,它在地球-大气辐射收支过程中扮演了重要的角色,不但通过短波吸收和长波辐射,直接影响地-气之间的辐射收支平衡,而且还会作为云的凝结核(Cloud Condensation Nuclei,CCN)参与云的形成,从而改变云的微物理和降水特性,间接影响地-气之间辐射收支平衡。因此,大气气溶胶是影响全球气候变化过程中最敏感的强迫因子,是制定减排政策和气候变化机理研究中必需考虑的新视角和切入点,也是当今国际科学研究前沿。目前人们对气溶胶气候效应的科学认知程度仍比较低^[2],其重要原因是缺乏大气气溶胶的物理、化学和光学特性观测数据,特别是气溶胶的垂直分布数据^[1]。

激光自 20 世纪 60 年代被发明以来,便很快被应用到大气探测中,激光雷达以其精细的时间、空间和光谱分辨率、大的垂直跨度和高的探测精度吸引了工程技术人员的密切关注,其探测平台也由地基探测发展为机载和星载。气溶胶激光雷达探测技术也由米散射探测发展为拉曼散射探测和高分辨率光谱探测。到目前为止,激光雷达已成为探测大气气溶胶的有力工具^[3-7]。

在后向散射激光雷达中,由于发射光路和望远

镜视场在近区内不完全重合,导致接收信号存在过渡区和盲区。过渡区内后向散射光部分被接收到,盲区内完全接收不到。这就限制了后向散射激光雷达在近距离场合的应用,特别是环境领域中的应用。侧向散射激光雷达是一种正在研究中的新技术^[8-10],其将发射系统和接收系统放在两处,避免了后向散射激光雷达中几何因子的产生,在近距离段测量精度很高,但在远距离处空间分辨率较差。侧向激光雷达和后向散射激光雷达的联合,可实现优势互补。

后向散射激光雷达在反演气溶胶后向散射系数(或消光系数)过程中,要假设气溶胶的消光后向散射系数比(又称激光雷达比)的数值,这就给反演带来一定的误差。根据氮气拉曼散射激光雷达的特点,不需要假设条件就可直接反演出气溶胶的激光雷达比^[11]。因此,集侧向、后向和拉曼散射于一体的激光雷达新系统,能精确反演气溶胶的后向散射系数和消光系数。

吸湿性是气溶胶的主要特性之一,它是指气溶胶在周围环境相对湿度增加时的吸水能力。气溶胶吸湿后,其粒径有明显的增长,故使气溶胶粒子群宏观上的消光系数变大^[12]。根据水汽和氮气拉曼散射的探测信号,可反演水汽的混合比。气溶胶的偏振探测,可定性识别粒子的形状特征。这些探测为进一步研究水汽与气溶胶消光系数之间的关系、气溶胶微物理特性等奠定实验基础。

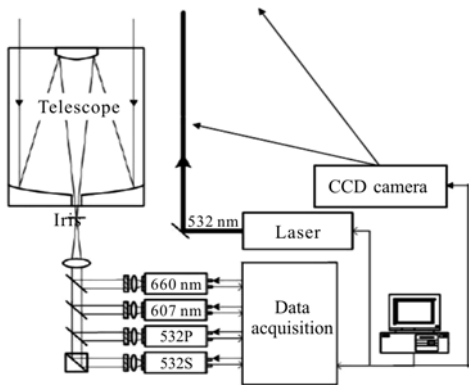
文中先对新研制的系统进行简介;接着简述气溶胶退偏比、后向散射系数和水汽混合比的探测方法,分析不同通道探测信号的信噪比及探测误差;最后展示探测个例及讨论。

1 系统

激光器发出的光束入射到大气中，就要和大气中的微粒(包括大气分子、气溶胶等)发生相互作用，产生的散射光会射向各个方向。散射光中包含了散射粒子的相关信息，利用光电探测器件，探测不同高度上的散射光强度，再通过激光雷达方程来反演散射粒子的光学参量。

1.1 系统组成

单波长发射五通道接收激光雷达探测系统主要由激光发射单元(激光器)、后向散射光学接收单元(望远镜)、后向散射信号探测单元(2 个拉曼散射接收通道和 2 个偏振散射接收通道)、侧向散射信号探测单元(CCD)以及控制单元五部分组成，如图 1 所示。表 1 是该雷达系统的主要技术参数。



(a) 示意图
(a) Diagram



(b) 实物图
(b) Photograph

图 1 激光雷达系统
Fig.1 Lidar system

表 1 激光雷达系统主要技术参数

Tab.1 Specifications of lidar system

Laser (Continuum surlite)	Nd:YAG
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	250
Repetition rate/Hz	20
Divergence/mrad	0.5
Backward receiver	Telescope(Cassergrain)
Telescope (Cassergrain)	-
Diameter/mm	300
Iris/mrad	0.5-3
Channel 1	-
Detector (PMT)	R7400-U02
Central wavelength/nm	532 (P)
Filter bandwidth/nm	1
A/D convector/bits	16
Channel 2	-
Detector (PMT)	R7400-U02
Central wavelength/nm	532 (S)
Filter bandwidth/nm	1
A/D convector/bits	16
Channel 3	-
Detector	R7400-U02
Central wavelength/nm	660
Filter bandwidth/nm	1
A/D convector/bits	16
Channel 4	-
Detector	R7400-U02
Central wavelength/nm	607
Filter bandwidth/nm	1
A/D convector/bits	16
Channel 5	-
Detector (CCD)	(SBIG) ST-8300M
Pixels	3 352x2 532
A/D convector/bits	16
Lens focal length/mm	85
Central wavelength/nm	532
Filter bandwidth/nm	25.6
Control computer	Lenovox200

1.2 系统功能

上述硬件配置的激光雷达系统，可实现气溶胶退偏比廓线、后向散射系数廓线、消光系数廓线和水汽混合比廓线等探测功能。

气溶胶退偏比廓线的探测。射向大气的激光是高纯度的偏振光，其偏振方向定义为平行方向。大气

中的散射粒子形状决定了散射光的退偏程度,532 nm 平行通道和 532 nm 垂直通道分别接收散射光中的平行分量和垂直分量,这两个通道的数据融合,就可反演出气溶胶退偏比廓线,从而可定性判断气溶胶的形状特性^[13]。

气溶胶消光后向散射系数比的探测。607 nm 通道是接收大气中氮气拉曼散射信号的,根据氮气在大气中的分布规律和氮气拉曼散射激光雷达方程,可以反演出气溶胶的消光系数,再与两个 532 nm 通道的数据融合,就可反演气溶胶消光后向散射系数比^[11]。

气溶胶后向散射系数和消光系数廓线的探测。CCD 探测通道和望远镜接收的 532 nm 的通道相结合,克服了单一望远镜接收时的几何因子影响,可反演出从地面开始到对流层顶的气溶胶后向散射系数和消光系数廓线^[10]。

水汽混合比廓线的探测。660 nm 通道接收大气中水汽拉曼散射信号,607 nm 通道接收大气中氮气拉曼散射信号。根据氮气在大气中的分布规律,把两个拉曼散射通道的数据相融合,就可反演出水汽混合比廓线^[14]。

控制软件。控制软件主要用于参数和工作时序的设置,依次实现系统的激光发射、采集器(AD 采集卡)采集、数据的平均、数据预处理和显示、数据存储等控制功能。

2 信噪比及误差分析

2.1 激光雷达方程

两个偏振通道的激光雷达方程分别为^[13]:

$$P_p(z)=k_p E \frac{\beta_p(z)}{z^2} \exp(-2 \int_0^z \alpha_p(z) dz) \quad (1)$$

$$P_s(z)=k_s E \frac{\beta_s(z)}{z^2} \exp(- \int_0^z (\alpha_p(z)+\alpha_s(z)) dz) \quad (2)$$

式中: E 为发射激光的能量;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; $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别表示激光雷达接收到 z 处大气后向散射回波功率的平行分量和垂直分量; k_p 和 k_s 分别表示接收平行分量通道和垂直分量通道的系统常数; $\beta_p(z)$ 和 $\beta_s(z)$ 分别表示 z 处大气后向散射系数的平行分量和垂直分量; $\alpha_p(z)$ 和 $\alpha_s(z)$ 分别表示 z 处大气消光系数的平行分量和垂直分量。

两个拉曼通道的激光雷达方程分别为^[14]:

$$P_w(z)=k_w E \frac{\sigma_w n_w(z)}{z^2} \exp(- \int_0^z (\alpha(\lambda, z)+\alpha(\lambda_w, z)) dz) \quad (3)$$

$$P_N(z)=k_N E \frac{\sigma_N n_N(z)}{z^2} \exp(- \int_0^z (\alpha(\lambda, z)+\alpha(\lambda_N, z)) dz) \quad (4)$$

式中:下标 w 和 N 分别表示水汽和氮气; k_w 和 k_N 分别是水汽通道和氮气通道的系统常数; σ_w 和 σ_N 分别表示水汽和氮气分子的后向微分拉曼散射截面; $n_w(z)$ 和 $n_N(z)$ 分别表示 z 处水汽和氮气的分子数密度; $\alpha(\lambda, z)$ 、 $\alpha(\lambda_w, z)$ 和 $\alpha(\lambda_N, z)$ 分别为 z 处发射波长、水汽分子拉曼散射波长和氮气分子拉曼散射波长的大气消光系数。

侧向散射激光雷达方程为^[10]:

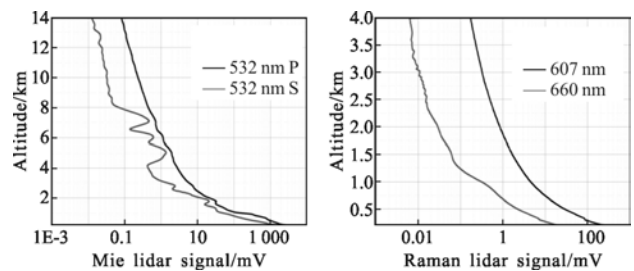
$$P(z, \theta)=k \frac{E}{D} \beta(z, \theta) \cdot \exp[-(1+1/\cos(\pi-\theta)) \cdot \int_0^z \alpha(z) dz] \Delta \theta \quad (5)$$

式中: k 为系统常数; E 为发射激光的能量; D 为 CCD 相机到激光束的水平距离; $\beta(z, \theta)$ 为大气侧向散射系数; $\alpha(z)$ 为大气的消光系数; $\Delta \theta$ 为一个像元的角宽度; $P(z, \theta)$ 为单个像元接收到的光束上高度为 z ;散射角为 θ ;角宽度为 $\Delta \theta$ 的气溶胶侧向散射信号。

2.2 信噪比分析

该系统于 2016 年 6 月底组装完毕,经过 2 个多月的调试,系统各项指标达到或部分超过设计指标。2016 年 10 月 3 日晚上是一个晴朗的夜晚,下面以该晚上的探测数据为例,进行各通道的信噪比和探测误差分析。

对于后向散射激光雷达,2000 个脉冲信号平均值作为一次测量数据;对于侧向散射激光雷达,探测一次的曝光时间为 100 s,与后向散射激光雷达的时间相一致。图 2 是该晚 22:50 的一次探测的信号廓线。其中,532 nm 米散射合成信号是由 3 个探测通道的信号融合而来的,具体的融合的方法是:在 1.0 km 高度以下,采用 CCD 侧向散射激光雷达的信号;在

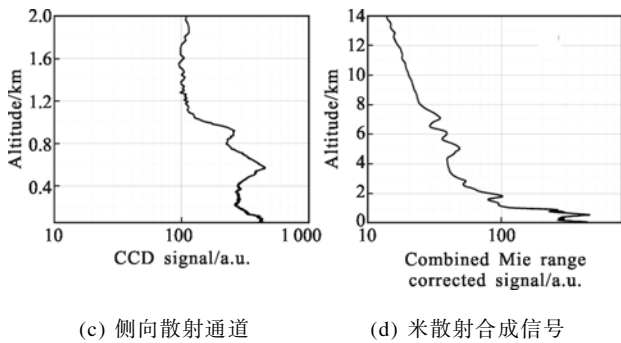


(a) 米散射激光雷达通道

(b) 拉曼散射激光雷达通道

(a) Mie lidar channel

(b) Raman scattering lidar channel



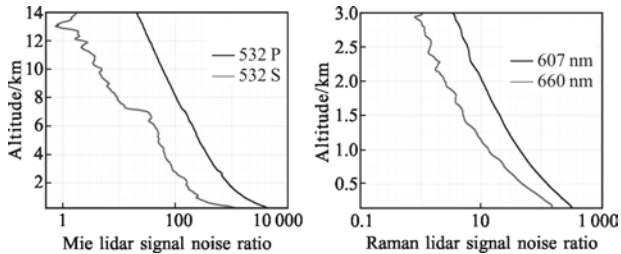
(c) 侧向散射通道 (d) 米散射合成信号

图 2 5 通道接收信号廓线

Fig.2 Profiles of five channel received signals

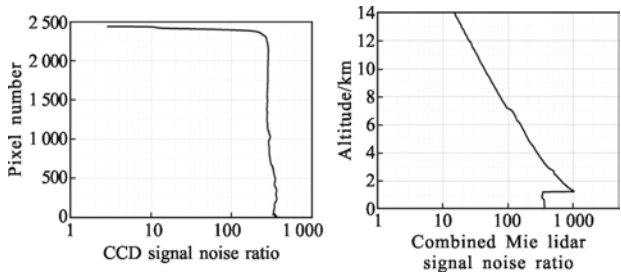
1.5 km 高度以上,采用望远镜接收到的平行和垂直偏振通道的组合信号廓线;在笔者的实验条件下,CCD 侧向散射激光雷达信号与望远镜的后向散射信号约在 0.7~2.0 km 是一致的^[15],故在 1.0~1.5 km 区域,取 CCD 和望远镜两者接收到信号的平均值。

根据信噪比的计算公式^[16],算出了 5 个独立通道信号和 532 nm 合成信号的信噪比,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出:信噪比廓线的共性是随探测高度增加而减小(合成信号廓线除外,它的信噪比是分两段计算的),但不同的通道,其信噪比廓线大小



(a) 米散射激光雷达通道 (b) 拉曼散射激光雷达通道

(a) Mie scattering lidar channel (b) Raman scattering lidar channel



(c) 侧向散射通道 (d) 米散射合成信号

(c) Side-scattering channel (d) Combined Mie scattering signals

图 3 5 通道信噪比廓线

Fig.3 Profiles of five channel signal noise ratios

及形状是不相同的。532 nm 波长的两个通道信噪比较高,其中平行通道在 14 km 高度上的信噪比仍达 10 以上,垂直通道在 14 km 高度上的信噪比接近 1。拉曼通道的信噪比较低,其中 660 nm 水汽通道的信噪比廓线最小,在 3 km 接近 1。信噪比为 1,表明探测信号的相对误差是 100%^[17],故信噪比为 1 处的高度,就是探测的最大高度。

2.3 随机误差分析

在误差分析中,由直接测量量的误差数据,根据误差传递公式,可估算出间接测量量的相对误差^[18],下面对气溶胶退偏比、后向散射系数和水汽混合比的探测误差逐一进行估算。

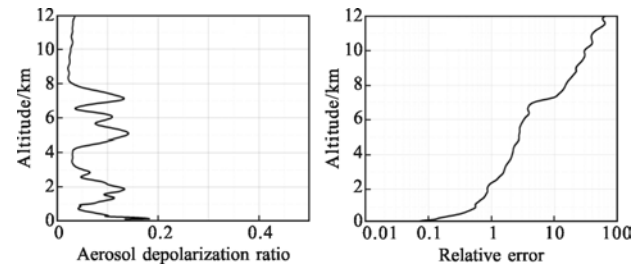
气溶胶的退偏比误差估算。气溶胶的退偏比为:

$$\delta(z) = \frac{\beta_s(z)}{\beta_p(z)} = \frac{k_p}{k_s} \frac{P_s(z)}{P_p(z)} \quad (6)$$

由误差传递公式,可得气溶胶退偏比的相对误差为:

$$\varepsilon_{\delta(z)} = \sqrt{\varepsilon_{P_s(z)}^2 + \varepsilon_{P_p(z)}^2 + \varepsilon_{k_p}^2 + \varepsilon_{k_s}^2} \quad (7)$$

由公式(6)和(7),估算出了本次探测中气溶胶的退偏比廓线和相对误差廓线,结果如图 4 所示。



(a) 退偏比 (b) 相对误差
(a) Depolarization ratio (b) Relative error

图 4 气溶胶退偏比和相对误差廓线

Fig.4 Profiles of aerosol depolarization ratio and relative error

气溶胶后向散射系数及误差估算。利用合成的 532 nm 米散射信号,来反演气溶胶的后向散射系数,反演的廓线范围可以从地面至对流层顶。先根据氮气拉曼通道反演出 3 km 高度以内的气溶胶消光后向散射系数比,然后假设这一比值不随高度变化;对于后向散射激光雷达信号,采取传统的 Fernald 方法^[19],对于侧向激光雷达信号采用课题组提出的方法^[10],分两段来反演气溶胶的后向散射系数廓线,最后进行拼接。由于后向散射系数对信号强度等参量的偏导数比较复杂,直接根据误差传递公式来估算

比较困难。在该实验探测中,利用参考文献[18]中的方法来估算后向散射系数相对误差。用上述方法估算出后向散射系数廓线和相对误差廓线的结果如图5所示。

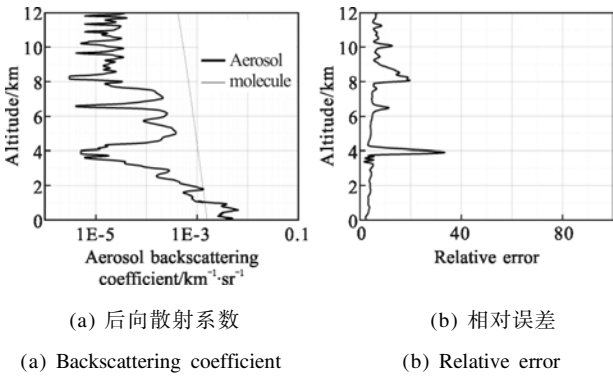


图 5 气溶胶后向散射系数和相对误差廓线

Fig.5 Profiles of aerosol backscattering coefficient and relative error

水汽混合比廓线误差的估算。水汽混合比可表示为:

$$w(z) = C_w \Delta_q^w(0, z) \frac{P_w(z)}{P_M(z)} \quad (8)$$

式中: C_w 为拉曼激光雷达探测水汽混合比的系统标定常数; $\Delta_q^w(0, z)$ 为大气透过率修正函数, 两者的表达式分别为:

$$C_w = \frac{k_N}{k_w} \frac{\sigma_N}{\sigma_w} \frac{M_w}{M_{dry}} \frac{n_N}{n_{dry}}, \Delta_q^w(0, z) = \frac{\exp(-\int_0^z \alpha(\lambda_N, z) dz)}{\exp(-\int_0^z \alpha(\lambda_w, z) dz)}$$

由误差传递公式, 可得水汽混合比的相对误差为:

$$\varepsilon_{w(z)} = \sqrt{\varepsilon_{P_w(z)}^2 + \varepsilon_{P_M(z)}^2 + \varepsilon_{C_w}^2 + \varepsilon_{\Delta_q^w}^2} \quad (9)$$

由公式(8)和(9), 估算出本次实验中的水汽混合比廓线和相对误差廓线如图6所示。

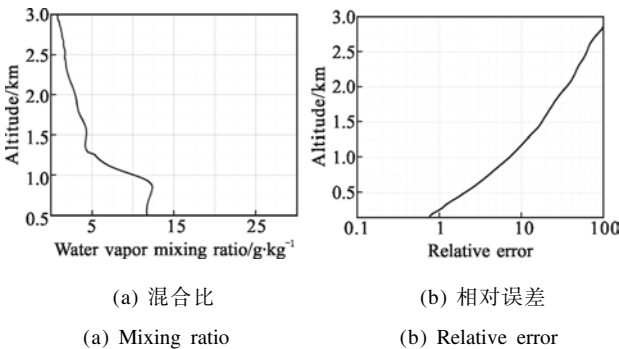


图 6 水汽混合比和相对误差廓线

Fig.6 Profiles of water vapor mixing ratio and relative error

3 讨论

以 2016 年 10 月 3 日晚上 22:50 激光雷达一次探测的信号为个例, 分析了这次探测的 5 个通道的信噪比廓线。由图 3 的信噪比廓线可知, 最大探测高度分别为: 532 nm 气溶胶平行通道达 14 km 以上; 532 nm 气溶胶垂直通道是 14 km; 607 nm 氮气通道达 3 km 以上; 660 nm 水汽通道为 3 km。

根据雷达方程, 分别反演出了气溶胶的退偏比廓线、气溶胶后向散射系数廓线和水汽的混合比廓线; 再由相应的误差公式, 分别估算出了它们的相对误差廓线。图 4(a) 是气溶胶的退偏比廓线, 从中可以看出气溶胶在高度上大致有三段: 1 km 以下段; 2 km 左右段和 4~8 km 段, 每一段中的气溶胶退偏比也不是均匀的。在图 4(b) 中, 相对误差随高度增加而增加, 在 12 km 高度上已近 100%。图 5(a) 是气溶胶后向散射系数廓线, 从中可以看出气溶胶的结构与图 4(a) 相同, 在 4 km 高度附近和 8 km 高度附近, 气溶胶是相对较少的。在图 5(b) 中, 除 4 km 高度附近和 8 km 高度附近两处外, 气溶胶的相对误差都在 10% 以内; 4 km 高度附近和 8 km 高度附近两处气溶胶相对误差较大, 是由于这两处气溶胶后向散射系数很小所造成的。图 5 反映了该激光雷达探测气溶胶后向散射系数的两大优点: 一是探测范围大, 从地面到对流层顶, 近地面处没有盲区和过渡区; 二是在精确反演出的气溶胶的消光后向散射系数比的基础上, 气溶胶的后向散射系数反演误差较小。图 6(a) 是雷达水汽混合比廓线, 从中可以看出 1 km 高度以下水汽混合比较大, 约为 12 g/kg, 因为 1 km 高度是大气边界层的高度, 水汽主要集中在边界层以内, 这与图 5(a) 是吻合的, 在边界层以上, 水汽混合比随高度增加而减小。0.5 km 高度以下, 由于几何因子的原因, 探测结果未采用。在图 6(b) 中可知, 在 3 km 高度处, 水汽混合比的相对误差达到了 100%。

4 结束语

单波长发射五通道接收激光雷达系统集成了后向散射、侧向散射和拉曼散射技术, 对各种单一技术的探测优点进行了融合, 弥补了各自的不足。侧向散射技术和后向散射技术相结合, 可以实现气溶胶消

光系数和后向散射系数从地面至对流层顶的廓线探测。拉曼散射技术与后向散射技术的结合,可以实现气溶胶消光后向散射系数比的探测,从而提高了后向散射系数(或消光系数)廓线的反演精度。除此之外,该系统还可探测气溶胶的退偏振比廓线和水汽混合比廓线。个例分析表明,该系统具有较高的信噪比和较低的探测相对误差。该系统的建立,为进一步深入研究气溶胶消光系数和水汽时空分布以及它们之间的相互关系奠定了坚实的实验基础。

参考文献:

- [1] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826–840. (in Chinese)
- [2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. IPCC, Climate Change 2007 The Physical Science Basis [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [3] Zhao Ming, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130002. (in Chinese)
- [4] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(19): 030135.
- [5] Sun Xianming, Wan Long, Wang Haihua. Sensitivity study on lidar detection of the depolarization ratio of water clouds [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906001. (in Chinese)
- [6] Ansmann A, Riebesell M, Wandinger U, et al. Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio[J]. *Appl Phys B*, 1992, 55(1): 18–28.
- [7] Deng Pan, Zhang Tianshu, Chen Wei, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130003. (in Chinese)
- [8] Bernes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(15): 2922–2929.
- [9] Tao Zongming, Liu Dong, Ma Xiaomin, et al. Development of side-scatter lidar system based on charge-coupled device and case study [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3282–3286. (in Chinese)
- [10] Tao Z, Liu D, Wang Z, et al. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar [J]. *Opt Express*, 2014, 22(1): 1127–1134.
- [11] Ansmann A, Riebesell M, Weitkamp C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(13): 746–748.
- [12] Tang I N. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(14): 19245–19250.
- [13] Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia, et al. Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chin J Atmos Sci*, 2003, 27(6): 1093–1100. (in Chinese)
- [14] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(16): 3068–3082.
- [15] Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, et al. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001. (in Chinese)
- [16] Tao Zongming, Zhang Qingze, Fang Xin, et al. Estimation of random errors for backscatter lidar observations [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 2124001.
- [17] Tao Zongming, Zhang Yinchao, Cen Gang, et al. Estimation method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 602–604. (in Chinese)
- [18] Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, et al. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 3279–3282. (in Chinese)
- [19] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652–653.