

探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达

李俊^{1,2} 龚威² 毛飞跃² 张金业³

¹ 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081
² 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079
³ 湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 介绍了一套自行研制的双视场激光雷达系统的原理、结构、关键技术及其性能。该激光雷达系统采用两个独立的接收视场,一个采用离轴收发光学系统探测高空大气,另一个采用同轴收发光学系统探测低空尤其是大气边界层大气。激光雷达系统的数据采集单元对高空大气同时进行模拟数字信号探测和光子计数信号探测,有效地改善了激光雷达系统因回波信号的动态范围过大而无法兼顾高低空同时探测的缺点。对本系统接收的大气回波信号进行拼接和反演,结果表明,该系统能够有效获取大气气溶胶光学特性。通过与本地区另一台激光雷达信号进行对比验证了该系统探测信号的可靠性。

关键词 大气光学;气溶胶;双视场激光雷达;Mie 散射

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1201001

Dual Field of View Lidar for Observing Atmospheric Aerosols over Wuhan

Li Jun^{1,2} Gong Wei² Mao Feiyue² Zhang Jinye³

¹ School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China
² State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China
³ School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract A dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols is described. The lidar has two independent receiving fields. One observes higher atmosphere by noncoaxial system, and the other observes lower atmosphere (especially planetary boundary layer) by coaxial system. The higher atmospheric data are obtained by combining analog and photon counting. It effectively improves observing ability limited by large dynamic range of the receiving signals. The observing data are shown and analyzed. The results show that this lidar is an effective tool for observing atmospheric aerosols. The reliability has been validated by comparing with another lidar system.

Key words atmospheric optics; aerosol; dual-field of view lidar; Mie scattering

OCIS codes 010.0280; 010.1100; 010.3640

1 引 言

大气气溶胶指的是大气中悬浮着的各种固体和液体颗粒物^[1]。气溶胶在大气中所占比例很小,但

对大气的辐射传输和水循环均有重要影响^[2],大气气溶胶在不同地区、不同时间和不同高度都有着明显差异,要定量研究它对气候环境与辐射传输的具

收稿日期: 2013-05-20; 收到修改稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家 973 计划(2011CB707106)、国家自然科学基金(41127901,10978003)

作者简介: 李俊(1982—),男,博士研究生,主要从事光学与激光遥感、大气气溶胶监测等方面的研究。

E-mail: larkiner@gmail.com

导师简介: 龚威(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光学和激光遥感、地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@whu.edu.cn(通信联系人)

体影响,必须要获取高空间分辨率、高时间分辨率的大气气溶胶分布信息。

激光雷达作为大气气溶胶探测的成熟工具,在国内外得到了广泛研究及应用^[3-6]。由于激光束具有发散小、波长短、能量密度高的特点,使用激光雷达探测大气气溶胶,具有大气分层探测、时空分辨率高、观测精度高及时间上可连续观测的独特优势。由于激光雷达自身特点,回波信号的动态范围比较大,如果不考虑几何重叠因子影响,用一条回波信号覆盖对流层大气时,回波信号的动态范围通常在7个数量级以上。而目前数据采集时模数转换一般是12位,很难采集动态范围这么大的信号。现有的激光雷达系统对此采取的成熟措施有:改变发射光束与接收望远镜之间距离、缩小接收视场角、斩波器物理压缩、光电倍增管(PMT)门控,这些措施是舍弃近距离信号来提高远距离信号的探测能力^[7]。为了提高激光雷达探测范围,可以采用分光镜将信号分为远近两个通道同时进行探测,但单一的视场角很难兼顾远场探测高度和近场探测盲区,单独采用变视场角的设计也无法从根本上解决这一矛盾^[8]。因此,部分激光雷达系统采用双视场技术,即采用距离选通手段,低空大视场角和高空小视场角相结合,通过两个视场独立的望远镜分别接收低空和高空的回波信号。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了一套进行对流层气溶胶探测的双视场激光雷达(DFL),在对流层大气气溶胶探测中发挥了较好的作用^[9]。南非 Durban 大气激光雷达采用双视场技术对平流层气溶胶进行探测,也取得了较好的结果^[10]。

武汉城区上空对流层顶位于 16.5~18.5 km 高空^[11],而且 1.5 km 高度以下的大气边界层气溶胶具有浓度高、变化快、与人类活动交互明显等特点。综合考虑这两个因素,武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室自行研制了一套大气气溶胶探测双视场激光雷达,在双视场激光雷达的基础上,远场接收系统进一步增加发射激光束与接收望远镜之间距离并且缩小接收视场,并同时采用模拟探测和光子计数探测,近场接收系统借鉴微脉冲激光雷达采用同轴收

发系统,以此分别改善系统的高空和低空探测能力,用于对武汉上空大气气溶胶进行分层探测,并采用 3.75 m 的距离分辨率来提高廓线精度。本文详细介绍大气气溶胶探测原理,双视场激光雷达系统结构,阐述双视场及近场同轴收发技术的优势,并通过实际观测结果评价系统性能。

2 大气气溶胶探测原理

激光束与大气物质相互作用产生回波信号是激光雷达进行大气探测的基础。激光与大气物质的相互作用机制有多种,而大气中的气溶胶粒子直径与激光波长相近或更大,因此 Mie 散射起主导作用。与其他作用机制相比,Mie 散射的主要特点是弹性散射,散射光波长和入射光相同,散射截面大,回波信号强。

激光雷达方程表达了激光雷达回波信号强度与各种因素间的关系。将大气分为大气分子和气溶胶两种成分,在分别考虑二者对激光束的散射影响且只考虑一次散射时,激光雷达方程为

$$P(r) = CA\eta(r)P_0 \frac{\beta_m(r) + \beta_a(r)}{r^2} \times \exp\left\{-\int_0^r [2\alpha_m(r) + \alpha_a(r)]dr\right\}, \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 是激光雷达接收到的来自高度 r 到 $r + \Delta r$ 处的回波信号功率, C 是激光雷达常数, A 是接收望远镜收光面积, $\eta(r)$ 是几何重叠因子, P_0 是激光发射功率, $\beta_m(r)$ 和 $\beta_a(r)$ 分别是大气分子和气溶胶的后向散射系数, $\alpha_m(r)$ 和 $\alpha_a(r)$ 分别是大气分子和气溶胶的消光系数。

气溶胶后向散射系数和消光系数两个未知数同时存在于一个方程中,所以在求解时需要同时对大气气溶胶进行部分假设。根据假设条件的不同,主要有 Collis 斜率法、Klett 法和 Fernald 法。在 Fernald 法中,选取近似不含气溶胶的大气层所在的高度 r_c 作为参考高度, r_c 以下气溶胶粒子的消光系数(后向积分)为^[12-13]

$$\alpha_a(r) = \frac{X(r) \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r) dr\right]}{\frac{X(r_c)}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} X(r) \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r') dr'\right] dr} - \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(r), \quad (2)$$

式中 $X(r) = P(r)r^2$ 是距离修正后的回波信号, S_a 是气溶胶消光后向散射比, 在对流层气溶胶探测中, 一般取 $50^{[14]}$ 。 $S_m = 8\pi/3$ 是空气分子的消光后向散射比, $\alpha_m(r)$ 为空气分子的消光系数, 通过美国标准大气和瑞利散射理论获得。对于大气气溶胶探测, 一般认为对流层顶部不含大气气溶胶粒子, 因此选为参考高度, 考虑到武汉地区的实际情况, 在一定实验分析的基础上认为在此高度气溶胶粒子与空气分子的后向散射系数之比为 0.02。

激光雷达方程表明: 1) 几何重叠因子对近场信号影响强烈, 需要适当考虑其影响范围并对相关数据进行修正; 2) 距离因子造成回波信号随着高度增加呈平方衰减, 需要提高远场信号的信噪比。在进行激光雷达系统设计时, 要充分考虑上述两方面。

3 系统结构

图 1 是自行研制的双视场激光雷达的结构图, 主要由激光发射系统、光学接收系统和信号检测系统组成, 具体参数如表 1 所示。

激光发射系统由 Nd:YAG 激光器、激光扩束镜 (LBE) 以及反射镜三部分组成。激光发射系统的核心是激光器, Nd:YAG 激光器以 20 Hz 的频率发射固定波长 532 nm (二倍频), 能量 140 mJ 的脉冲探测对流层气溶胶。激光光束为高斯光束, 为进一步压缩发散角, 采用激光扩束镜进行光束扩大, 经过准直扩束的激光束通过一个 45° 全反镜垂直向上发射。

光学接收系统由接收望远镜、准直透镜以及干涉窄带滤光片组成。Cassegrain 望远镜作为折反射望远镜具有成本低、重量轻等特点。本系统分别通

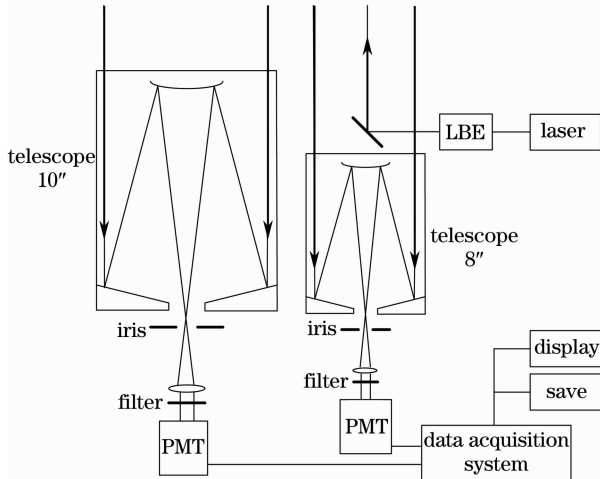


图 1 双视场激光雷达系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of DFL system

过直径 $10''$ 和 $8''$ 的 Cassegrain 望远镜将大气的后向散射光会聚到焦平面, 在此安放一个可调光阑来控制接收系统的视场角。 $10''$ 望远镜后采用小视场角来减小天空背景光提高远场信噪比, $8''$ 望远镜主要采集低空信号, 因此受天空背景光影响较小。使用干涉窄带滤光片可以大幅压制非激光波长的噪声信号, 为了使滤光片正常工作, 需要先经过一个凸透镜进行准直, 将发散光变为平行光。

表 1 双视场激光雷达系统主要参数

Table 1 DFL system parameters

	Wavelength /nm	532 (Nd:YAG)
Transmitting system	Pulse width /ns	6.12
	Frequency /Hz	20
	Pulse energy /mJ	140
	Divergence angle /mrad	0.5
Receiving system	Telescope type	Cassegrain
	Diameter /mm	203.2/254
	Focal length /mm	2000/2500
	Filter bandwidth /nm	10/3
	Fieded of view /mrad	3/1
	Height resolution /m	3.75

信号检测系统是对光信号进行一系列的处理, 使其成为可以直接用来反演处理的数据。首先通过光电倍增管进行光电转换, 然后进行模数转换将物理电信号转变为计算机可以识别的数字信号。整个信号检测系统在计算机控制下进行, 并在计算机中进行处理、显示和存储。

4 双视场相关技术

4.1 双视场探测

激光雷达方程表明, 距离因子会造成回波信号随着高度增加呈平方衰减, 如果不考虑几何重叠因子的影响, 回波信号取值在低空会呈现剧烈增加。数值模拟计算的信号廓线如图 2 所示, 虚线所示是未考虑几何重叠因子的情况, 25 km 高度区间的信号强度跨越了 7 个数量级, 其中 4~25 km 高度区间的信号强度大约占 3 个数量级, 而 4 km 以下高度区间的信号强度占 4 个数量级以上。回波信号的动态范围对探测器和模数转换系统提出了过高的要求, 会造成信号溢出或信噪比过低, 甚至信号完全不可用。

为了压缩回波信号动态范围, 有的激光雷达系统采用斩波器和门控光电倍增管等措施屏蔽近场信号, 以损失低空数据为代价提高高空探测能力, 该方法广泛用于中高层大气的探测研究, 但大气边界层

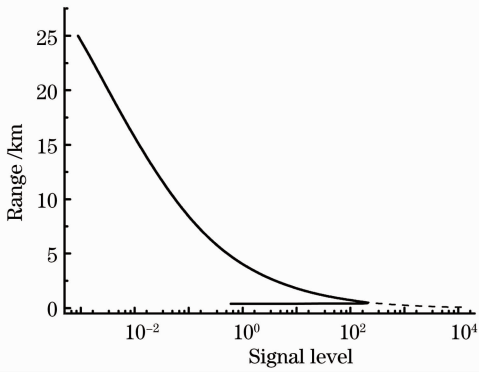


图 2 模拟的信号廓线

Fig. 2 Simulated signal profile

位于大气最底层,其上界在 0.5~1.5 km 高度,其中大气的摩擦作用和大气湍流运动都比较强,而且大气边界层中的大气气溶胶与人类活动交互作用显著,浓度高,变化快,成为大气气溶胶探测的主要不确定性因素之一。为了更好地对卫星遥感数据进行大气校正以及精确评价气溶胶对生态环境的影响,必然要降低激光雷达低空探测盲区,强化大气边界层气溶胶探测能力。

要同时获取高空和低空的有效数据,可以控制激光束和接收望远镜的视场范围,使得激光束在低空逐渐进入接收视场,引入几何重叠因子使得接收信号如图 2 实线所示,从而对回波信号的动态范围进行压缩。几何重叠因子如图 3 所示,激光束完全进入接收镜视场前,设备接收到的信号存在缺失,造成了低空探测的盲区。为降低盲区高度,通常需要增大接收望远镜的视场角。但是,随着接收望远镜视场角的增大,就会有更多的天空光作为背景噪声进入探测系统,严重影响了远场探测的信噪比,而且过强的背景光还可能造成光电倍增管的非线性工作状态。

通过理论分析或者实验测量的方法可以得到几

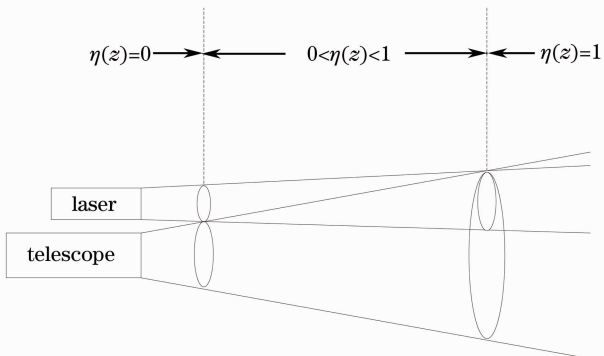


图 3 离轴系统几何重叠因子

Fig. 3 Geometrical overlap factor of noncoaxial system

何重叠因子^[15],对低空区域进行修正即可获得还原信号。但是由于对系统实际参数的计算存在偏差,几何重叠因子的理论分析和实验测量都存在较大的误差,对激光发射轴和望远镜接收轴间的偏差非常敏感,对光学接收系统的对准和稳定性也有较高要求。

为了减少几何重叠因子修正引起的不确定性,比较好的方法是增加一个接收通道,对衰减后的近场信号进行探测。有的便携式系统采用的是在准直透镜后加分光镜,将大气后向散射光分成远近两个通道同时进行探测^[16]。但采用单一视场角的设计还是有限制,大视场角会降低远场信号信噪比,小视场角会限制近场最低探测高度,而且 45°放置的分光镜还可能导致光学系统散光,从而引入误差。采用改变视场角的方法,无法从根本上解决同时探测远场近场信号的矛盾,还会对光路调整近场信号几何重叠因子造成不便。

为了解决低空探测盲区与高空探测高度的矛盾,增加回波信号探测动态范围,一个解决方案是采用双视场双通道系统。系统采用具有独立视场的两个接收望远镜分别对低空和高空进行探测,低空探测采用大视场角从而降低探测盲区,高空探测则采用小视场角来减少天空背景光的影响。对双通道同时接收的两路信号进行拼接,即可获得相应的大气回波信号。

4.2 近场信号同轴收发系统

激光雷达采用双视场技术后,近场信号采用大视场角进行接收,但受近场信号强度和硬件实际条件限制,几何重叠因子影响范围比较大,例如中国科学院安徽光学精密机械研究所发展的一套激光雷达系统激光束完全进入接收望远镜视场大约在 600 m 高度^[9]。

为了更好地探测大气边界层气溶胶,尽量减小几何重叠因子影响范围,本系统对近场信号采用激光束与接收望远镜同轴的设计,在接收望远镜的正上方放置一个 45°全反镜,扩束准直后的激光束由此调整至与接收望远镜同轴,如图 4 所示。近场信号采用同轴收发后,接收望远镜的视场角只需要大于激光束发散角就可以使激光光斑一直在接收视场的中心附近,从偏轴系统改变为轴对称系统,激光雷达接收到的光斑从非对称光斑变为圆形光斑,便于调节激光雷达光学系统。本系统采用的近场同轴光学接收系统在轴线上存在障碍物,一个是 Cassegrain 接收镜内的次镜,另一个是激光发射系

统中的 45° 全反镜及其支架,这些轴线上的障碍物会造成近场探测信号的缺失。探测得到的近场信号表明,采用同轴光学设计后,激光雷达系统能探测得到更低的回波信号。

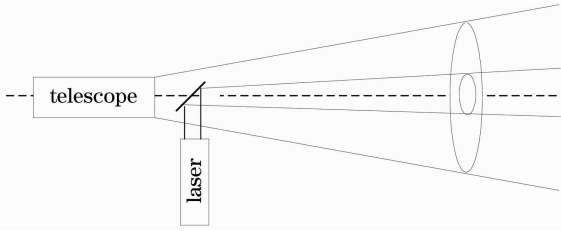


图4 同轴系统几何重叠因子

Fig. 4 Geometrical overlap factor of coaxial system

4.3 几何重叠因子

在双视场激光雷达系统中,采用双视场进行回波信号接收,信号探测盲区降低,但依然对大气边界层内信号有影响,在目前硬件条件下,采取的折中措施是对这一部分信号进行修正。目前一般采用实验法测得。选择天气晴朗、无风、污染少的夜晚,一般认为此时大气气溶胶水平方向呈均匀分布,将激光器与近场接收系统近水平放置,对回波信号进行处理来获得几何重叠因子。

对回波信号进行距离修正然后取对数,令

$$S(r) = \ln[P(r)r^2]. \quad (3)$$

对不受几何重叠因子影响区域的 $S(r)$ 进行线性拟合,可以得到 $S(r)$ 的拟合值,则几何重叠因子计算方法为

$$\eta(r) = \exp[S_{\text{measured}}(r) - S_{\text{linear_fitted}}(r)], \quad (4)$$

式中 S_{measured} 为实测值, $S_{\text{linear_fitted}}$ 为线性拟合数据。

2010年6月12日凌晨04:39、05:11和10月23日凌晨05:16进行了近场几何重叠因子的测量,此时大气状况稳定性较好。对2400脉冲的信号进行平均,测得的结果如图5所示,3组信号计算的几何重叠因子吻合

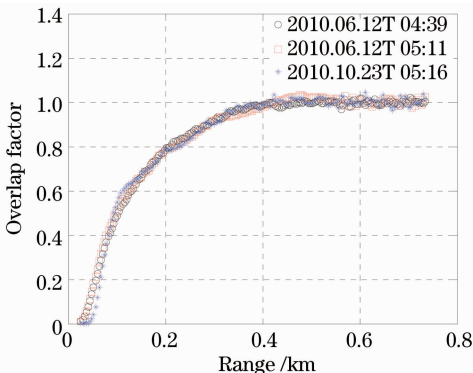


图5 几何重叠因子

Fig. 5 Geometrical overlap factor

度较高,几何重叠因子的稳定性较好。从370 m左右往上,几何重叠因子大体保持在1,受城市地表不均匀的影响,有一定的起伏但相对较小。这表明可以在近场信号几何重叠因子修正中达到较好的效果,本系统具有较高的大气边界层气溶胶探测能力。

5 典型结果与分析

双视场激光雷达研制成功后对武汉上空气溶胶进行了大量探测。由于双视场激光雷达采用双视场三通道进行信号探测,因此得到的信号需要先进行拼接。信号拼接有两部分:1)远场接收筒的光子计数信号和模数信号的拼接;2)远场接收筒信号和近场接收筒信号的拼接。远场接收筒的光子计数信号和模数信号的拼接,主要步骤是先对光子计数信号进行死时间修正,然后在1~20 MHz的区间内与模数信号进行最小二乘拟合,从而实现信号拼接^[17]。远场接收筒信号和近场接收筒信号的拼接,主要步骤是先确定拟合高度区间,然后按照判断标准在拟合高度区间中自动寻找一段区间作为最佳拼接区间,最后采用线性拟合算法实现信号拼接^[18]。

图6显示的是2010年8月3日20:22采集的一组信号,分别为近场模拟探测信号、远场模拟探测信号和远场光子计数信号,低空探测性能逐个变差,而高空大气的探测能力逐个变强。这里为了便于显示与查看,横轴采用的是对数信号显示。将这三条信号进行数据拼接,对拼接后的结果进行Fernald法反演,这样就得到了大气气溶胶消光系数的垂直分布信息。得到的结果如图7所示,随着高度的增加,大气气溶胶消光系数先迅速减小,到6 km附近开始保持稳定,到12 km左右有尖峰,然后随高度的增加而减小,并且在16 km高度以上迅速减小。12 km附近存在大气气溶胶消光系数极大值,它可能是云、噪声或其他现象造成的,可以通过一段时间内的廓线变化来判断。

对此,选取2010年8月3日20:08到8月4日05:34的双视场激光雷达观测数据,经过拼接反演,得到的大气气溶胶消光系数廓线在时间轴上的变化如图8所示。从中可以判断,近地面2 km以下是大气气溶胶颗粒的聚集区域,符合大气边界层的特征;图7中12 km的极大值是云层的前兆,在22:30和00:00时刻附近可以更清晰地看到高空的薄云分布,之后薄云逐渐消散,在凌晨03:00~05:00之间,17 km高度附近有一片明显的层次特征,这个现象的确认和成因分析还需要进一步的研究。

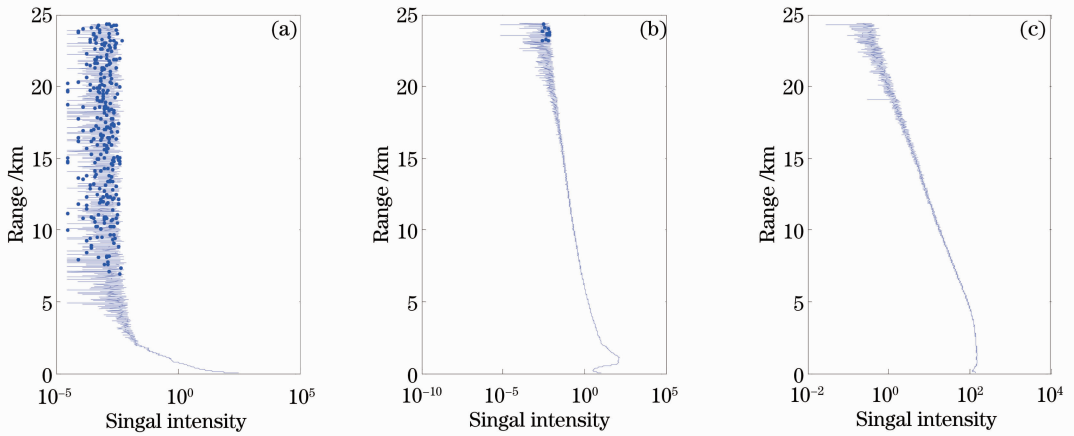


图 6 双视场激光雷达原始信号。(a)近场模拟;(b)远场模拟;(c)远场光子计数

Fig. 6 Signal from DFL. (a) Near field analog; (b) far field analog; (c) far field photon counting

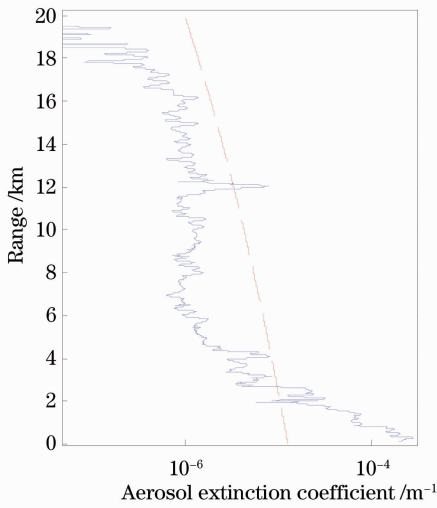


图 7 反演得到的大气气溶胶消光系数

Fig. 7 Retrieved atmospheric aerosol extinction coefficient

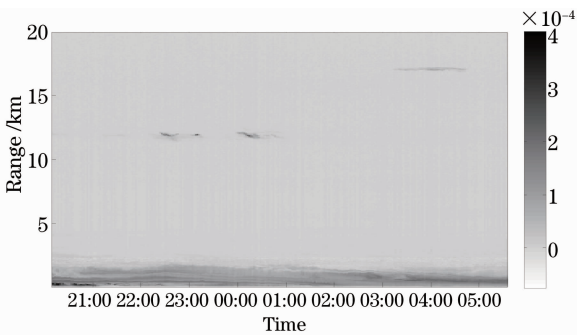


图 8 2010 年 8 月 3 日夜间的反演结果

Fig. 8 Aerosol extinction coefficient retrieved on August 3, 2010

为验证双视场激光雷达信号的可靠性,在 2010 年 5 月 11 日夜至 12 日凌晨与中国科学院武汉物理与数学研究所的一台单视场激光雷达同时进行了开

机观测。中国科学院武汉物理与数学研究所观测点与观测点距离大约为 2 km,因此认为两设备观测的大气基本一致。当天受云层等条件的影响,双视场激光雷达的高空探测表现不佳,因此仅对 10 km 以下的信号进行对比分析。5 月 11 日 23:50 两套激光雷达设备探测到的信号对比如图 9 所示(其中 DFL 表示双视场激光雷达,ZKY 表示中国科学院激光雷达),两信号吻合度很好,尤其是 6.3 km 高度的云层信号和 1~2 km 的低空气溶胶变化曲线都很吻合。因为中国科学院武汉物理与数学研究所的激光雷达主要用于高空探测,因此低空信号受几何重叠因子影响较大,0.7 km 以下的信号受到影响,而处理后的双视场激光雷达信号依然保持正常状态。两台激光雷达的信号对比表明了双视场激光雷达信号的可靠性和更佳的低空探测能力。

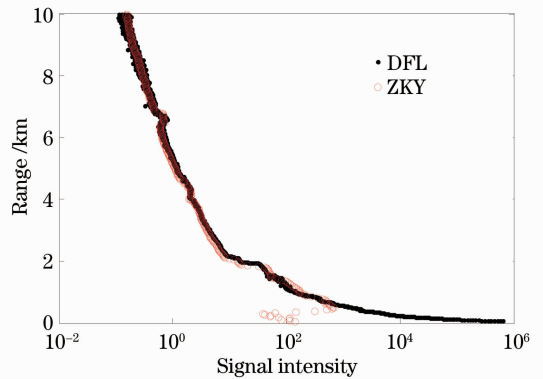


图 9 与另一台激光雷达的信号对比

Fig. 9 Signal comparison with another lidar

6 结 论

大气气溶胶探测双视场激光雷达,在普通激光

雷达的基础上,采用双视场技术、近场信号同轴收发并采用高分辨率数据采集系统,提高了系统的探测范围和探测性能。典型观测结果和分析表明双视场激光雷达稳定可靠,提供的大气气溶胶消光廓线,为长期监测和系统分析提供硬件支持,为大气、遥感和环境科学提供了有力的探测工具。

双视场激光雷达采用两个独立视场进行信号接收,信号拼接和去噪两方面与之前相比具有一些新的特点,而且为两路信号选择合理的覆盖区间也很重要。下一步工作将针对这几个方面展开,从而进一步提高双视场激光雷达的探测范围和探测精度。

致谢 感谢中国科学院武汉物理与数学研究所程学武高级工程师和杨勇提供的对比观测数据。

参 考 文 献

- Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, 60(5): 625-634.
- R J Charlson, S E Schwartz, J M Hales, *et al.*. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.
- Xia Junrong, Zhang Lei. Advances in detecting aerosol with Mie lidar [J]. *Arid Meteorology*, 2006, 24(4): 68-70.
夏俊荣, 张 镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 68-70.
- V A Kovalev, W E Eichinger. *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods* [M]. Hoboken: Wiley, Inc, 2004. 1-23.
- He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM_{2.5} concentration [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何 涛, 侯鲁健, 吕 波, 等. 激光雷达探测反演 PM_{2.5} 浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Tropospheric aerosol measurements by lidar in northern suburbs of Nanjing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100101.
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100101.

- Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi, *et al.*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148.
周 军, 岳古明, 戚福弟, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2): 140-148.
- H Vogelmann, T Trickl. Wide-range sounding of free-tropospheric water vapor with a differential-absorption lidar (DIAL) at a high-altitude station [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(12): 2116-2132.
- Liu Bo, Zhong Zhiqing, Zhou Jun. Development of a Mie scattering lidar system for measuring whole tropospheric aerosols [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9(10): 828-832.
- A Moorgawa, H Bencherif, M M Michaelis, *et al.*. The Durban atmospheric LIDAR [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(2): 306-312.
- Li Wei, Fan Chao, Yi Fan. Characteristics of tropopause over Wuhan and Haikou [J]. *Chinese J Space Science*, 2009, 29(4): 409-416.
李 伟, 樊 超, 易 帆. 武汉和海口地区对流层顶的变化特征[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(4): 409-416.
- F G Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652-653.
- Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0514001.
陈 涛, 赵玉洁, 刘 东, 等. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0514001.
- Y Sasano. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993 [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(24): 4941-4952.
- Y Sasano, H Shimizu, N Takeuchi, *et al.*. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. *Appl Opt*, 1979, 18(23): 3908-3910.
- Zhong Zhiqing, Zhou Jun, Qi Fudi, *et al.*. Portable Mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12): 1145-1147.
钟志庆, 周 军, 戚福弟, 等. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J]. *强激光与激光束*, 2003, 15(12): 1145-1147.
- Liu Zhishen, Li Zhigang, Liu Bingyi, *et al.*. Analysis of saturation signal correction of the troposphere lidar [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(11): 1051-1054.
- Huang Lifeng, Gong Wei, Li Jun, *et al.*. Signal splicing of dual-receiver Mie scattering lidar in atmospheric remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(4): 705-719.
黄立峰, 龚 威, 李 俊, 等. 大气遥感双视场米散射激光雷达信号拼接[J]. *遥感学报*, 2012, 16(4): 705-719.

栏目编辑: 张 腾