

文章编号: 1001-3806(2006)02-0170-04

基于 1064nm 米散射激光雷达的大气消光特性的研究

杨 昭¹, 李 强¹, 孙东松²

(1. 连云港师范高等专科学校 物理系, 连云港 222006; 2 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了一台自行研制的 1064nm 微脉冲米散射激光雷达的总体结构、技术参数及其工作原理。给出了具体探测的实验结果, 推算出系统的几何重叠因子, 根据激光雷达方程的反演方法, 得出了大气气溶胶消光系数随高度变化的垂直分布廓线图。该激光雷达系统在夜晚的探测高度可达 5km 左右。通过激光雷达系统的日夜连续监测, 可得到消光系数随高度及时间变化的三维分布图, 对于进一步研究大气气溶胶的浓度、分布、散射及吸收特性都具有重要的意义。

关键词: 激光技术; 微脉冲激光雷达; 气溶胶; 反演法; 消光系数

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Study about atmosphere extinction coefficient based on 1064nm Mie-scattering lidar

YANG Zhao¹, LI Qiang¹, Sun Dong-song²

(1. Lianyungang High Normal University, Lianyungang 222006 China; 2 School of Apparatus Science and Photoelectrical Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083, China)

Abstract The system structure, the theory and the technical parameters for a 1064nm Mie scattering micropulse lidar are presented. Based on the experimental results, the overlap factor of the system and retrieve the profile of the atmosphere aerosol extinction coefficient can be deduced. Signals can be detected by the lidar system about 5km far away at night. The 3-D profile of the extinction varied with altitude and time can be received by lidar's day and night surveying which helps to study the thickness, distribution, scatter and absorption of the atmospheric aerosol.

Key words laser technique; micropulse lidar; aerosol; retrieve; extinction coefficient

引 言

激光雷达是传统的雷达技术与现代激光技术相结合的产物, 是以光频工作的雷达。1960 年激光问世以后的 40 多年来, 随着激光技术日新月异的发展以及先进的信号探测和数据采集系统的应用, 激光雷达凭借其高测量精度、精细的时间和空间分辨率以及大的探测跨度成为一种重要的主动遥感工具。常见的米散射激光雷达是利用激光作为电磁辐射源, 通过探测激光与大气相互作用的辐射信号来遥感大气的^[1]。根据测得的原始数据, 可推演出许多重要的大气参数指标。

作者建立了 1 台 1064nm 单波长米散射微脉冲激光雷达, 用于探测对流层气溶胶消光系数随高度的空间分布。本文中主要介绍该激光雷达的总体结构、技术参数及其工作原理, 给出了具体测量的实验结果并

对其进行了进一步的分析和讨论。

1 系统结构及技术参数

该激光雷达系统分为 4 个单元: 激光发射单元、信号接收单元、探测单元及数据采集单元。结构简图见图 1, 系统的主要技术参数指标见表 1。

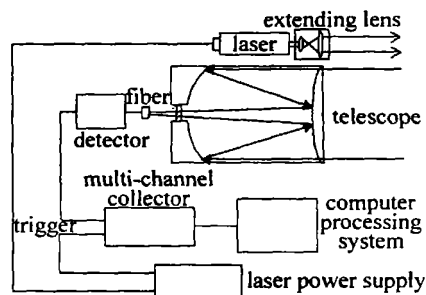


Fig 1 Schematic diagram of Mie scattering lidar's system structure

根据激光器光轴与接收望远镜光轴是否重合, 可将激光雷达系统分为同轴和离轴两种工作模式。如图 1 所示, 系统属于收发分离的离轴模式, 发射与接收单元的光轴始终保持平行, 二者可同时作方位和俯仰扫描, 从而得到水平程、斜程以及垂直方向的大气回波信号。

作者简介: 杨 昭 (1974-), 女, 硕士, 讲师, 现主要从事激光遥感方面的研究。

Email: yanzhao8195@126.com

收稿日期: 2005-02-02 收到修改稿日期: 2005-09-16

Table 1 The primary technical parameters of Mie scattering lidar system

	name of unit	technical parameter
parameters of the system		
	reflectivity of the object	10%
	atmospheric model	modtran
laser emission unit		
	laser	Nd:YVO ₄
	wavelength of laser	1064nm
	monopulse energy	160μJ
	pulse repetition frequency	12.25Hz
	width of monopulse	100ns
	angle of beam divergence	0.11mrad
	stability of emission power	< 2%
	optical efficiency	90%
receiver unit		
	telescope model	cassegrain
	primary aperture of telescope	254mm
	secondary aperture of telescope	94mm
	aperture of receive fiber	100μm
	the field of view	0.12mrad
	optical efficiency	30%
	quantum efficiency	20%

系统采用的光源为 COHERENT 公司生产的二极管抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器, 它可以通过声光 Q 开关输出脉宽为 100ns 以下的短脉冲激光束。该激光器内部光路简单, 结构紧凑, 且抽运光源和介质都是固态的, 使用寿命长, 可靠性高, 适合全天候工作。除激光器以外, 发射单元中还包括一个 40 倍率的扩束镜, 对高重复频率、低能量的窄脉冲激光起到扩束作用。

信号接收单元的主要部分是一台美国 MEADE 公司生产的 LX200GPS 型望远镜。它是施密特-卡塞格林型反射式望远镜, 主镜为一个抛物面, 直径 254mm; 副镜为双曲面, 直径 94mm; 组合焦距为 85cm。主、副镜都镀有铝膜层, 在组合焦点处设置一个可变直径的小孔光阑使得接收望远镜的视场角在 0.1mrad~0.5mrad 之间可调。

望远镜接收到的回波信号通过光纤传送到系统的探测单元, 这里采用光子计数模式的 SiAPD 单光子计数探测器。传统的激光雷达中通常采用光电倍增管作为信号探测器, 它虽然很灵敏但量子效率低, 通常不超过 20%, 动态范围也很小。而 APD 光子计数器的动态范围较大, 约为 10 个数量级, 满足了微脉冲激光雷达对信号的探测要求, 且其量子效率也较高, 可达 70%, 最高量子效率值对应的波长约为 1000nm, 与实验要求吻合。

数据采集单元由 MCS-pci 多通道数据采集卡、数据处理和显示计算机组成。MCS-pci 采集卡对每次扫描可以预设多达 65536 个采集通道, 且相邻两个采集通道之间没有空载时间, 每一个通道预设的滞留时间可以在 100ns 到 1300s 之间随意选择。这些优良性能大大提高了信号探测的分辨率, 对实验非常有利。利用采集卡自带的内触发信号、控制输出口及相应的控制软件, 可以实现激光器、光子计数器和数据采集卡 3 部分的同步协调运行^[2]。

2 工作原理

当发射的激光脉冲在大气中传播时, 探测器接收到的回波信号功率 $P(r)$ 由激光雷达方程决定:

$$P(r) = \frac{1}{2} P_0 \sigma A_r r^{-2} \beta(r) Y(r) T^2(r) \quad (1)$$

式中, P_0 为激光的发射功率 (W); c 为光速 (m/s); A_r 为接收望远镜的有效接收面积 (m²); $\beta(r)$ 为距离 r 处大气的后向散射系数; $Y(r)$ 为系统的重叠因子, 且 $0 \leq Y(r) \leq 1$, 可以通过水平均匀大气回波信号利用斜率法^[3]得到 $Y(r)$ 的分布; $T(r)$ 是大气透过率, 且:

$$T(r) = \exp\left[-\int_0^r \sigma(r') dr'\right] \quad (2)$$

式中, $\sigma(r)$ 为大气消光系数分布。

作者所研究的微脉冲激光雷达以量子理论为基础, 其发射和接收都建立在光子计数的概念上。因此, 采集卡中实际记录的是相应的光电子数 $N(r)$, 它与 $P(r)$ 存在以下关系: $N(r) = \left[\frac{\eta \lambda}{hc}\right] P(r) \Delta t$ (3)

式中, η 为探测器的量子效率; λ 为发射激光的波长 (nm); h 为普朗克常数, $h = 6.626276 \times 10^{-34}$; $\Delta t = 2\Delta r/c$ 是米散射激光雷达的采集时间 (s), Δr 为垂直分辨率 (m)。将 (1) 式代入 (3) 式可得:

$$N(r) = \frac{\eta \lambda E}{hc} \cdot \frac{A_r}{r^2} Y(r) \cdot T_s \cdot \Delta r \cdot \beta(r) \cdot T^2(r) \quad (4)$$

T_s 是系统常数, 可通过激光雷达的标定来获得, E 是发射的激光脉冲能量 (J)。

(4) 式中 $\beta(r)$ 和 $\sigma(r)$ 均为未知数, 对于弹性散射, 假定两者满足关系: $\beta(r) = \text{const} \sigma^k$ (5) 指数 k 依赖于激光雷达的波长及大气气溶胶的性质, 通常其取值范围为: $0.67 \leq k \leq 1.0$

3 反演方法

一般情况下, 大气散射包括分子 (molecule) 散射和气溶胶 (aerosol) 散射。大气能见度较低时, 气溶胶散射占主导地位, 分子散射与之相比可忽略不计。根据文献 [4] 中提供的稳定反转解得到气溶胶的消光分布为:

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S(r) - S_c)/k]}{\sigma_c^{-1} + \frac{2}{k} \int_r^r \exp[(S(r) - S_c)/k] dr'} \quad (6)$$

式中, $S(r) = \ln[r^2 P(r)]$ 为距离校准信号, r_c 为选定的参考距离, 且 $S_c = S(r_c)$, $\sigma_c = \sigma(r_c)$ 。 σ_c 可以利用斜率法作出近似的估算, 对这种估算的精度要求不高, 模拟计算证明, 即使 σ_c 的误差达到 $\pm 50\%$, 对计算结果的影响依然很小^[5], 因此, 可能获得气溶胶消光系数相对精确的解。

当大气能见度较高时, 分子散射与气溶胶散射的强度基本相当, 此时不能忽略分子散射的贡献, 对方程求解时必须将两者分开考虑, 激光雷达方程可以表示为:

$$P(r) = \frac{T_s [\beta_R(r) + \beta_M(r)]}{r^2} \times \exp\left\{-2 \int_r^r [\sigma_R(r') + \sigma_M(r')] dr'\right\} \quad (7)$$

显然, (7) 式中:

$$\begin{cases} \beta_R(r) + \beta_M(r) = \beta(r) \\ \sigma_R(r) + \sigma_M(r) = \sigma(r) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\beta_R(r)$, $\sigma_R(r)$ 分别为 Rayleigh(分子) 后向散射系数和消光系数, 它们满足以下关系:

$$\frac{\sigma_R}{\beta_R} = \frac{8\pi}{3} \quad (9)$$

由于大气中分子分布相对稳定, 分子的后向散射能够根据大气密度模式较为精确的确定, 其相对误差不超过 3%^[6], 则利用 (9) 式很容易得出分子消光系数的垂直分布; 假定已知某一高度 r_c 处的气溶胶和分子消光系数(标定值), 根据 Fernald 方法^[7] 可以得到以下各高度的气溶胶消光系数为(后向积分):

$$\sigma_M(r) = -\frac{S_1}{S_2} \sigma_R(r) + \frac{X(r) \cdot \exp\left[2 \left\{\frac{S_1}{S_2} - 1\right\} \int_r^r \sigma_R(r') dr'\right]}{\frac{X_{r_c}}{\sigma_M(r_c) + \frac{S_1}{S_2} \sigma_R(r_c)} + 2 \int_r^r (r) \exp\left[2 \left\{\frac{S_1}{S_2} - 1\right\} \int_r^r \sigma_R(r') dr'\right] dr} \quad (10)$$

而 r_c 以上各高度的气溶胶消光系数为(前向积分):

$$\sigma_M(r) = -\frac{S_1}{S_2} \sigma_R(r) + \frac{X(r) \cdot \exp\left[2 \left\{\frac{S_1}{S_2} - 1\right\} \int_r^r \sigma_R(r') dr'\right]}{\frac{X_{r_c}}{\sigma_M(r_c) + \frac{S_1}{S_2} \sigma_R(r_c)} - 2 \int_r^r (r) \exp\left[2 \left\{\frac{S_1}{S_2} - 1\right\} \int_r^r \sigma_R(r') dr'\right] dr} \quad (11)$$

以上两个公式中, $X(r) = P(r) \cdot r^2$, $S_1 = \sigma_M(r) / \beta_M(r)$ 是气溶胶的消光后向散射比, 它依赖于发射的激光波长、气溶胶的尺度谱分布和折射指数, 其取值范围一般在 $10s_r$ 到 $100s_r$ 之间。对于分子而言, $S_2 = \sigma_R(r) / \beta_R(r) = 8\pi/3$ 。 对近地面大气层进行探测时, 可以利用透过率迭代法得出大气消光系数的近似分布^[8]。

4 处理结果

实验中设定激光器每工作 10m in 停止 5m in, 系统距离分辨率为 15m, 假定可探测的最远距离为 12km, 多通道数据采集卡中的通道数相应为 810 个。本实验系统采用内触发方式, 触发信号产生于 MCS 卡的 MIDPASS 输出端口, 其输出信号经过反相后触发激光脉冲。实验发现, 信号脉冲与触发脉冲不同步, 触发信号超前 900ns(或 135m), 因此, 接收到的前 9 个采样信号在数据处理时需忽略。 MCS-pci 多通道数据采集卡中收集的原始信号是探测时间内多发激光脉冲回波信号累计的结果, 对其进行平均可得单发脉冲的回波信号。然而由此得到的回波信号中还含有天空背景噪声、探测器的暗电流噪声以及热噪声的影响, 反演时必须将其扣除。一般情况下, 探测信号中 10km 之外的信号强度波动很小, 基本保持不变, 该信号的平均值即可近似认为是背景噪声; 暗电流噪声及热噪声可以根据探测器自带的出厂参数利用拟合的方法求得。

图 2 中给出了水平方向上距离校准信号 $X(r)$ 的变化情况, 从图中可以看出大约 4km 以后由噪声引起

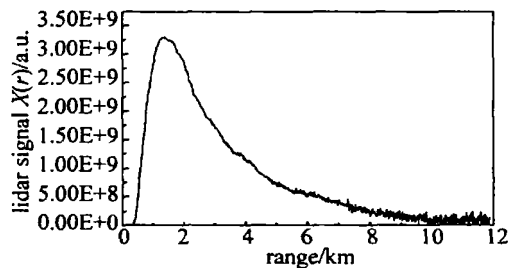


Fig 2 Lidar range-corrected signal $X(r)$

的起伏非常明显。原始信号处理后通过反演可得出系统的重叠因子 $Y(r)$, 图 3 中给出 $Y(r)$ 随高度的变化情况。可以看出, 1.2km 以后发射视场与接收视场完全重合。

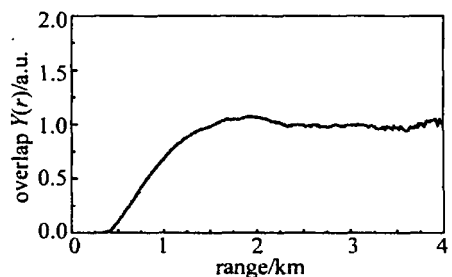


Fig 3 Lidar overlap factor $Y(r)$

根据斜率法得出的水平层大气消光系数为:

$$\sigma_h = 0.214 \text{ km}^{-1} \quad (12)$$

大气的水平能见度为: $R_v = \frac{3.192}{\sigma_h} = 18.28 \text{ km}$ (13)

当激光雷达系统呈倾斜指向时 (天顶角 $\theta = 60^\circ$), 得到的是斜程回波信号, 按照 (10) 式的后向积分法可推算出该方向大气气溶胶消光系数的分布。式中, 大气分子的消光系数 $\sigma_R(r)$ 可根据美国温压湿标准大气模式理论计算, 其变化趋势如图 4 所示。边界高度 r_c 是通

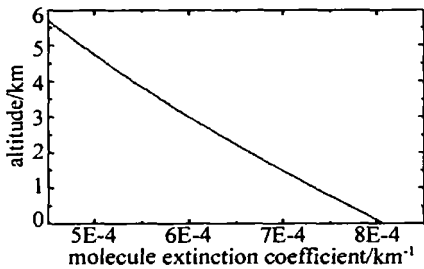


Fig 4 Extinction coefficient of atmospheric molecule

过选取近乎不含气溶胶的清洁大气层所在的高度来确定的^[9], 其中气溶胶的消光后向散射比 $S_1 = 50$ 。

测量在晴朗的夜晚进行。图 5 中给出了 2004-12-13

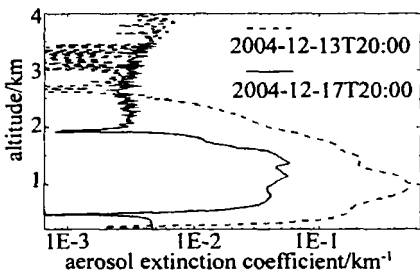


Fig 5 Extinction coefficient of atmospheric aerosol

和 2004-12-17 夜晚 20:00 苏州市区上空大气气溶胶消光系数的反演结果。由于信噪比的影响, 系统只能探测到近距离 (5km 以内) 的有效信号, 远距离信号淹没在噪声中。从图 5 中可以看出, 2004-12-13 和 2004-12-17 两个晚上的气溶胶及云层分布有显著的不同。2004-12-13 晚 20:00 探测到的数据显示, 在 600m 到 1300m 之间存在一层厚度约为 800m 的气溶胶层, 1000m 左右的消光系数最大, 约为 0.57 km^{-1} 。2004-12-17 晚 20:00 的气溶胶分布曲线显示, 在 700m 到

1600m 之间存在一层厚度约为 900m 的气溶胶层, 这层气溶胶有两个消光系数的峰值, 分别位于 1200m 和 1400m 附近, 消光系数的最大值约为 0.06 km^{-1} , 是 2004-12-13 测得消光系数峰值的 1/10。两个测量日中近地面的污染较为严重, 造成气溶胶粒子的浓度及消光系数都偏大, 且具有较为丰富的多层结构。

5 结 论

介绍了微脉冲米散射激光雷达探测大气的实验装置及数据处理方法, 给出了气溶胶消光系数随高度变化的分布廓线图。通过激光雷达系统的日夜连续监测即可得到消光系数随高度及时间变化的三维分布图, 这有利于进一步研究大气气溶胶的浓度、散射及吸收特性, 对于气候学、环境学及大气学等领域都具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] SUN JQ. Atmosphere detecting by lidar [M]. Beijing: Science Press, 1986: 65~71 (in Chinese).
- [2] XUE G C, SUN D S, YANG Zh. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(3): 244~247 (in Chinese).
- [3] SPANHURNE J D. Operational cloud boundary detection and analysis from micro pulse lidar data [A]. In Proceedings of the Eighth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting [C]. Washington D C: U S Department of Energy, 1973: 119~122.
- [4] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211~220.
- [5] YANG Zh, SUN D S, LI Q. Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(3): 239~242 (in Chinese).
- [6] RUSSEL P B, SWISSER T J, MCCORMICK M P. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Appl Opt, 1979, 18(6): 3783~3790.
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Appl Opt, 1984, 23(3): 652~655.
- [8] ZHANG J B, HU H L. Solution of atmosphere extinction coefficient by transmittance iteration method [J]. Laser Technology, 1994, 18(2): 77~81 (in Chinese).
- [9] LEFRERE J. Lidar survey of the post Mt St Helens stratospheric aerosol at hawk province observatory [J]. Appl Opt, 1981, 20(7): 1116~1117.