

文章编号: 1006-4710(2007)01-0001-05

小型米散射激光雷达系统设计

刘君, 华灯鑫, 李言, 徐黎明

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了探测对流层内大气气溶胶和卷云的光学特性以及大气水平能见度等, 在阐述了大气气溶胶探测原理及信号处理方法的基础上, 利用二极管激光泵浦的 Nd:YAG 固体激光器的二倍频波长 (532 nm) 激光为光源, 设计了一台小型微脉冲米散射激光雷达, 并利用标准大气模型对系统进行了仿真计算。仿真结果表明, 在探测误差小于 10% 条件下, 系统在白天和夜晚的探测高度分别为 6 km 和 13 km。该系统还具有对人眼安全、能全方位扫描探测等特点, 可应用于城市及特定场合(如厂区, 大型公共场所)的大气环境监测, 也可用于沙尘暴探测及其预警预报技术的研究。

关键词: 小型激光雷达; 气溶胶; 系统设计; 信噪比

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Design of a Compact Mie Lidar System

LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan, XU Li-ming

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A compact micro pulse Mie lidar which employed LD-pumped Nd:YAG laser at 532nm as a transmitter has been designed for detecting the optical properties of aerosols and cirrus in the troposphere and horizontal visibility on the basis of presenting lidar measuring principle and signal processing. A numerical calculation based on a standard atmospheric model is used to simulate ratio of signal to noise and error. The theoretical analysis shows that the system is capable of measuring aerosols with an error of less than 10% up to a height of 6 km at daytime and 13 km at nighttime. The lidar system has the characteristic of eye safety and scanning in any direction, and can be mainly applied in the real-time environmental monitoring of urban atmosphere, study of sand storm detection and prediction and so on.

Key words: compact lidar; aerosol; system design; ratio of signal to noise

激光雷达作为一种主动遥感探测工具已有几十年的历史, 已广泛用于激光大气传输、全球气候预测、气溶胶辐射效应及大气环境等研究领域。随着激光技术、信号探测技术、数据采集技术及控制技术的发展, 激光雷达在大气气溶胶的探测高度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量精度等方面的优势更显独特, 是其它探测手段无法比拟的。米散射激光雷达、偏振激光雷达等作为大气气溶胶及云(尤其是卷云)探测的有效工具, 已经得到广泛认知, 探测技术日趋成熟, 并开始形成产品^[1-4]。

我国中科院安徽光机所、大气物理所及苏州大学等单位也已经开展了类似的米散射激光雷达的研制工作^[5-7], 取得了一些成果, 但在激光雷达的小型化、工程化、实用化、产品化上还需进行大量的研究工作。目前国内气溶胶探测激光雷达产品几乎全部依赖于进口, 因此, 研发能服务于气象、环境及国防军事领域, 具有完全自主知识产权、高技术含量的气溶胶探测激光雷达产品, 具有重大的研究意义及社会效益。

笔者依托西安理工大学激光雷达遥测研究中

收稿日期: 2006-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675015); 陕西省自然科学基金资助项目(2006D07)。

作者简介: 刘君(1962-), 女, 河南人, 副教授, 研究方向为激光雷达大气遥感测量技术及光电测试技术。

E-mail: junliu87@xaut.edu.cn。

心,利用二极管激光泵浦的 Nd:YAG 固体激光器的二倍频波长(532nm)激光为光源,设计了一套全天候探测大气气溶胶和卷云的小型便携式米散射激光雷达系统。本文主要叙述系统的设计思路、系统构成、数据反演方法,并通过对所设计的系统参数进行数值仿真,论证了系统的可行性。

1 大气气溶胶探测原理

激光遥感的基础是光辐射与大气中的原子、分子以及气溶胶粒子之间相互作用所产生的各种物理过程,其中散射的作用最为明显。

各种散射机理中,米散射(Mie Scattering)是一种散射谱的中心波长与入射激光波长相同,散射谱的谱宽近似于入射激光谱宽的弹性散射,它是由粒径相当或大于激光波长的气溶胶粒子引起的散射。

米散射激光雷达是一种用于探测低空大气中的尘埃、云雾等气溶胶粒子的激光雷达,激光雷达探测气溶胶的原理就是向大气发射脉冲激光束,再由望远镜接收由大气中分子、粒子产生的后向散射光,通过激光雷达方程,求解出气溶胶消光系数、后向散射系数等。激光雷达方程如下:

$$P(r) = K P_0 r^2 \beta(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma(r) dr\right) \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为系统接收到距离 r 处的大气散射回波信号的功率(W), P_0 为激光的发射功率(W), K 为系统常数, $\beta(r)$ 为距离 r 处大气的后向散射系数($\text{sr}^{-1} \text{km}^{-1}$), 它与大气密度成正比, 可写成:

$$\beta(r) = \beta_s(r) + \beta_m(r)$$

式中 $\beta_s(r)$ 、 $\beta_m(r)$ 分别为气溶胶和大气分子引起的后向散射系数。由于大气分子密度的分布比较稳

定, 所以实际应用中也常用 $r_s = \beta_s(r)/\beta_m(r)$ (称作后向散射比) 来描述气溶胶强度变化; $\sigma(r)$ 为距离 r 处大气的消光系数(km^{-1}), 可写成:

$$\sigma(r) = \sigma_s(r) + \sigma_m(r)$$

式中 $\sigma_s(r)$ 、 $\sigma_m(r)$ 分别为气溶胶和大气分子的消光系数。

通过求解式(1), 可以得到大气科学研究中重要的物理参数, 如大气消光系数、散射系数、能见度及粒谱分布等。

由于式(1)中同时存在 2 个未知参数, 所以在求解该方程时, 需要对大气状态作一些假设。目前求解大气消光系数及散射系数比较常用的方法有 Klett 法^[8] 和 Fernald 法^[9], 本系统在大气消光系数的数据反演中也采用上述两种方法。

通过激光雷达水平扫描时得到的水平方向的大气消光系数, 并利用大气水平能见度 $R_s = \frac{3.912}{\sigma_s(r)}$ 的关系, 就可得到大气能见度参数。

2 激光雷达系统设计

小型米散射激光雷达系统结构框图如图 1a 所示。激光器采用发射波长 532 nm、单脉冲输出能量 20 μJ 的二极管激光泵浦的 Nd:YAG 固体激光器。

由激光器发出的激光束经准直扩束后射向大气, 大气的后向散射光由口径为 200 mm、视场为 0.2 mrad 的卡赛格林(Schmidt-Cassegrain)望远镜聚光, 经准直透镜准直、窄带干涉滤光片后, 由聚光镜会聚后耦合到光纤, 光纤输出光由光电倍增管(PMT)检测, 再经光子计数器采集后送入计算机处理。激光雷达系统参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达系统参数
Tab. 1 The system parameters of Mie lidar

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Transmitter | LD-pumped Nd:YAG |
| Laser wavelength | 532 nm |
| Pulse energy | 20 μJ |
| Pulse duration | 2 ns |
| Pulse repetition frequency | 2 500 Hz |
| Beam divergence | 0.2 mrad |
| Receiver: | Schmidt-Cassegrain telescope |
| Diameter | 200 mm |
| Field of view | 0.2 mrad |
| Filter bandwidth | 0.5 nm |
| Data system | PMT, Analog and photon counting |
| Detector type, detection mode | 7.5m, 15m, 30m (programmable) |
| Range resolution | Automated, or manual |
| Operation | <40 kg (3 parts) |
| Weight | |

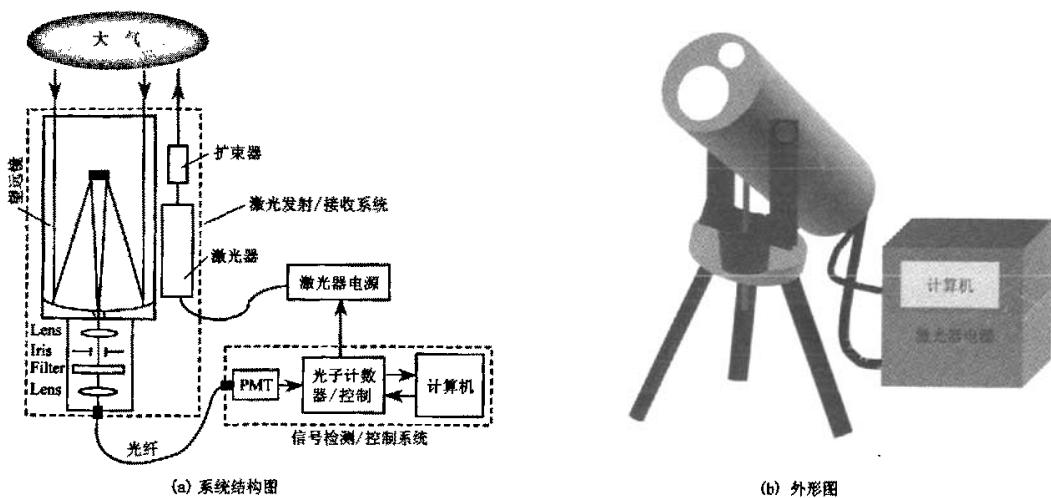


图 1 米散射激光雷达系统图
Fig. 1 The configuration of the Mie scattering lidar system

为便于携带,采用分离式模块结构设计(见图 1b),即将激光发射单元、大气回波信号接收单元设计为一个单独模块;信号检测、采集与控制单元设计为一个单独模块。模块间通过光纤耦合,可减少信号传输电缆引起的衰减及电磁噪声,提高信噪比。转动三脚架,可实现水平及任意仰角的大气剖面扫描探测,测得的信号最后送入计算机进行计算后得到测量结果,系统操作由计算机控制自动完成。

3 信号处理方法

采用单光子计数探测器作为回波信号的接收单元,则实际记录的是与回波信号功率相对应的光子数 $N(r)$,它与 $P(r)$ 存在以下关系:

$$N(r) = \left(\frac{\eta \lambda}{hc} \right) P(r) \Delta t \quad (2)$$

式中 η 为探测器的量子效率, λ 为发射激光的波长 (nm), h 为 Plank 常数, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ (J·s), c 为光速 (m/s), Δt 为米散射激光雷达的信号采集时间 (s),且 $\Delta t = 2\Delta r/c$, Δr 为系统的距离分辨率 (m)。

将式(1)代入式(2),可得系统探测得到的大气回波信号光子数 N_r 为:

$$N_r(r) = \frac{\eta \lambda}{hc} \frac{P_0}{r^2} K \beta(r) \exp \left(-2 \int_0^r \sigma(r) dr \right) \quad (3)$$

根据测得的回波信号强度,并利用特定的反演方法,就可由式(1)或式(3)求出 $\beta(r)$ 和 $\sigma(r)$,从而得到大气气溶胶的消光系数和后向散射系数随高度的变化规律。

激光雷达系统的运行采用计算机实时控制操

作,其操作流程见图 2。

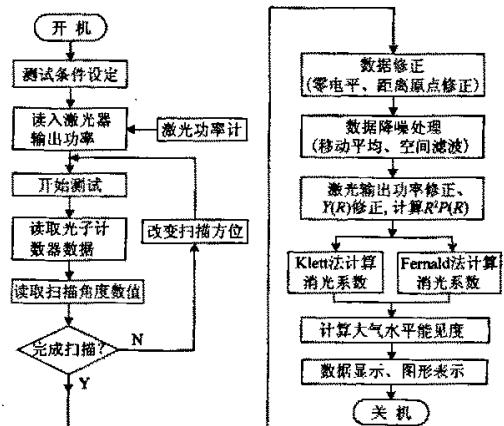


图 2 系统操作流程
Fig. 2 The program algorithm of system operation

系统主要由激光雷达系统的运行控制及数据反演处理两部分组成。其中系统运行控制主要完成激光器的运行控制、大气回波信号的实时检测及采集控制、扫描系统的姿态方位控制等功能;数据反演处理主要包括对采集到的大气回波信号进行参数修正、噪音信号剔除、产品数据的反演算法、显示及保存等功能。

4 系统仿真计算

由于激光雷达大气回波信号强度以高度平方衰减,所以白天激光雷达的探测高度受太阳背景光的影响较大,系统接收到的太阳背景光强度 (W) 可表示为:

$$P_b = K S_b \Delta \lambda \frac{\pi}{4} \theta^2 \quad (4)$$

式中 S_b 为到达地表的太阳背景光的能量密度 ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$)， $\Delta \lambda$ 为窄带干涉滤光片的带宽， θ 为接收单元的视场 (rad)。利用式(2)可求得与太阳背景光对应的光电子数 N_b ，它与 P_b 的关系为：

$$N_b(r) = \frac{\eta \lambda}{hc} P_b(r) \Delta t \quad (5)$$

实际上，引起系统测量误差的因素，除了白天测量时的太阳背景光外，还有光电检测器的电流噪声 (暗电流噪声，信号电流的散粒噪声)、负载电阻的热噪声等。假设上述噪声为不相关分布，系统的信噪比可由下式计算得到：

$$\text{SNR}(r) = \frac{\sqrt{n} N_s(r)}{\sqrt{N_s(r) + 2(N_b + N_d)}} \quad (6)$$

式中 n 为采样平均脉冲数， N_d 为探测器的暗电流。夜晚探测时 $N_b = 0$ 。

图 3 为大气后向散射比的高度分布模型。大气分子散射利用美国标准大气模型，因此利用图 3 实际可以计算出气溶胶散射系数。

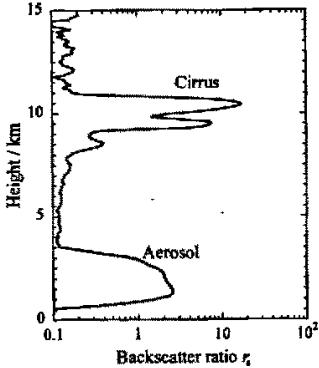


图 3 大气后向散射比 r_s 的高度分布

Fig. 3 Atmospheric backscattering ratio r_s versus height

考虑到白天太阳背景光的影响，假设在 532 nm 波长附近的太阳背景光的最大能量密度 $S_b = 0.3 \times 10^9 (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1})$ ，将大气分子的瑞利散射和大气气溶胶的米散射模型数据以及系统参数(见表 1)分别代入式(1)和(4)，即可计算出大气米散射(Mie)、瑞利散射(Rayleigh)及太阳背景光(Solar background)的强度分布，仿真结果示于图 4。

取探测时间为 5 min，利用图 4 的计算结果及公式(2)到(6)，即可得到如图 5 所示的系统信噪比(SNR)及探测误差的高度分布。从图 5 可看出，探测信号的误差小于 10% (即 $\text{SNR}=10$) 的最大探测高度为：白天 6 km，夜晚 13 km。

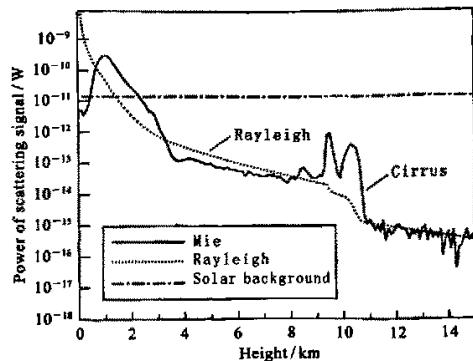
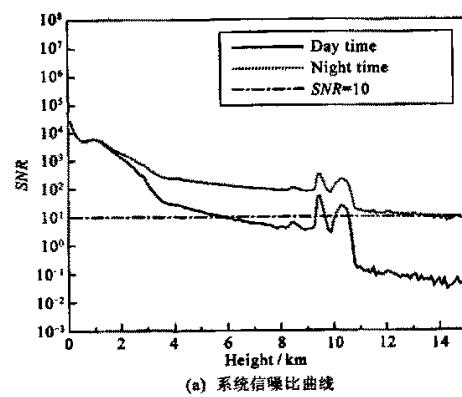
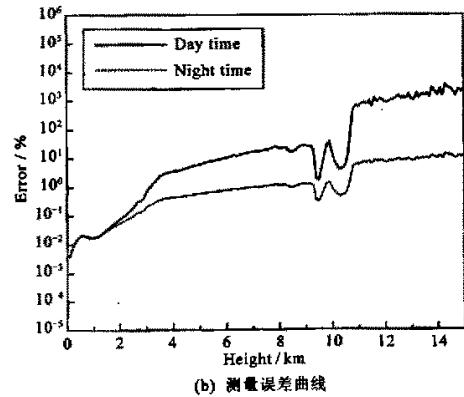


图 4 大气回波信号强度的高度分布

Fig. 4 The intensity of lidar return signal versus height



(a) 系统信噪比曲线



(b) 测量误差曲线

图 5 系统信噪比以及测量误差的高度分布

Fig. 5 The ratio of signal to noise and measurement error versus height

5 结语

设计了一套小型便携式米散射激光雷达系统，用于探测对流层内大气气溶胶和卷云的后向散射系数、消光系数以及大气水平能见度。利用米散射激光雷达方程，通过大气模型和系统参数，计算了米散

射激光雷达的回波信号强度以及系统信噪比、探测误差。

数值仿真结果表明,设计的激光雷达系统在白天和夜晚的探测高度分别可以达到6 km和13 km,探测误差小于10%。系统还具有体积小、重量轻、结构紧凑、便于携带、对人眼安全、能全方位扫描等特点。

参考文献:

- [1] McGill M, Hlavka D, Hart W, et al. Cloud physics lidar: instruments description and initial measurement results[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(18): 3 725-3 734.
- [2] Sugimoto N, Matsui I, Liu Z, et al. Observation of aerosols and clouds using a two-wavelength polarization lidar during the Nauru99 experiment[J]. *Sea and Sky*, 2000, 76: 90-95.
- [3] Liu J, Song X, Hua D, et al. High-spectral-resolution lidar for accurate observation of aerosol, cirrus clouds and water vapor profiles at Xi'an, China[A]. 23rd International Laser Radar Conference, Nara, Japan, 2006.
- [4] Pahlow M, Muller D, Tesche M, et al. Retrieval of aerosol properties from combined multiwavelength lidar and sunphotometer measurements[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(28): 7 429-7 442.
- [5] 钟志庆, 周军(Zhong zhi-qing, Zhou Jun). 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算(Simulated signal calculation for micro pulse lidar[J]). *量子电子学报(Chinese Journal of Quantum Electronics)*, 2003, 20(5): 618-622.
- [6] 张大毛, 徐赤东, 虞统, 等(Zhang Da-mao, Xu Chi-dong, Yu Tong, et al). 扫描式微脉冲激光雷达的研制和应用(Development of scanning micro pulse lidar and its applications[J]). *大气与环境光学学报(Journal of Atmospheric and Environmental Optics)*, 2006, 1(1): 47-52.
- [7] 薛国刚, 孙东松, 闫长春, 等(Xue Guo-gang, Sun Dong-song, Yan Chang-chun, et al). 小型气溶胶激光雷达及其信号校准(A compact aerosol lidar and its signal calibration)[J]. *激光与红外(Laser and Infrared)*, 2005, 35(3): 151-153.
- [8] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211-220.
- [9] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652-653.

(责任编辑 王卫勋)