

文章编号: 0258-7025(2009)11-3020-06

瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计

伯广宇 钟志庆 刘 博 戚福第 周 军

(中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 研制了一台探测大气温度、气溶胶、卷云的瑞利-拉曼-米氏激光雷达(RRML),介绍了激光雷达的设计方法,基于单片机实现了光电倍增管门控电路。通过数值模拟计算大气后向散射回波信号,分析仿真信号的特征,作为激光雷达设计的参考。通过设计合理的接收光路,采用极高灵敏度的 R4632 光电倍增管以及微弱信号光子计数技术,提高瑞利和拉曼微弱信号的信噪比(SNR)。为了实现瑞利-拉曼-米氏激光雷达对大气气溶胶和卷云的联合探测,532 nm 回波信号采取高低分层技术,通过对气溶胶和卷云的回波光衰减和探测器门控两种手段相结合,保证了 R4632 光电倍增管极高的灵敏度探测器对大气气溶胶和高层卷云回波信号的线性检测,从而实现一台激光雷达对大气温度、气溶胶和卷云的探测。试验表明,信号检测单元的设计满足测量精度的要求。

关键词 激光技术;光电信号检测;数值模拟计算;单片机;信噪比

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3020

Design of Optical Receiver and Signal Detection Unit for Combined Rayleigh-Raman-Mie Lidar

Bo Guangyu Zhong Zhiqing Liu Bo Qi Fudi Zhou Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A Rayleigh-Raman-Mie lidar (RRML) signal detection and optical receiver unit is constructed, the principle of lidar design is emphatically introduced, the design is based on the simulated calculation on atmosphere backscatter signal. The purpose of the signal detection unit is to improve the signal to noise ratio (SNR) of the lidar signal. By rational design the signal detection and optical receiver unit, use extremely sensitive R4632 photomultiplier tube (PMT) and photo counting method, a good SNR of Raman and Rayleigh signal could be received. Through construct the PMT gating control and signal attenuation unit, a linear detection of aerosol and cirrus signal is received. Finally, the experimental result shows the rationality of the signal detection and optical receiver unit design method.

Key words laser technique; photoelectric signal detection; simulated calculation; chip microcomputer; signal to noise ratio

1 引 言

激光雷达以其高分辨率、大动态的探测范围,在大气遥感中越来越受到人们的重视。随着人们对大气组分分布有效检测需求的增加,激光雷达遥感大气温度、气溶胶、云等的物理信息在很多大气研究项目中已受到重视,采用瑞利-拉曼-米氏多种方法联合探测多种大气组分,将有利于提高激光雷达时、空的资料覆盖率。

中国科学院安徽光学精密机械研究所展开了用

于大气温度、气溶胶和卷云探测的瑞利-拉曼-米氏激光雷达(Rayleigh-Raman-Mie lidar, RRML)的研制。本文介绍了 RRML 光学接收、光电信号检测设计和基于单片机的光电倍增管门控电路的实现。

2 瑞利-拉曼-米氏激光雷达的探测原理和回波信号仿真

RRML 系统垂直向大气中发射 532 nm 波长的脉冲激光,信号检测单元接收空气分子 532 nm 波

收稿日期: 2008-12-25; 收到修改稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403702)资助课题。

作者简介: 伯广宇(1980—),男,博士研究生,主要从事大气探测激光雷达方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

导师简介: 周 军(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事大气探测方面的研究。Email: jzhou@aiofm.ac.cn

长的瑞利后向散射信号(认为 25 km 以上的大气气溶胶粒子含量极少)和氮分子 607 nm 波长的拉曼后向散射信号,反演 5~50 km 大气温度廓线^[1,2];通过接收 532 nm 波长的大气气溶胶和卷云米氏散射信号和氮分子 607 nm 波长的拉曼后向散射信号,反演 1~15 km 大气气溶胶消光、后向散射系数及消光后向散射比廓线,以及 6~15 km 卷云的云底、云顶、云峰高度、消光、后向散射系数廓线^[3]。

研究激光雷达信号特征是进行光学接收和信号检测设计的首要任务,对激光雷达回波信号进行仿真研究,可以为激光雷达设计提供有效的参考。模拟计算使用的大气分子消光模式以及气溶胶粒子模式的公式由 Sasano 等^[4]给出,该模式被合肥地区 L300 激光雷达的长期观测所验证。图 1 是利用该模式计算的大气分子消光系数的垂直分布廓线(实线)和气溶胶粒子消光系数的垂直分布廓线(虚线)。

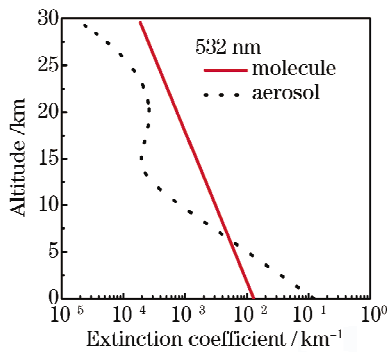


图 1 分子和气溶胶模式的消光系数垂直分布廓线
Fig. 1 Vertical profiles of model molecular and aerosol extinction coefficients

针对系统提出的性能指标,在综合计算激光能量、望远镜有效接收面积、累积脉冲数、信号检测空间分辨率等影响因素的基础上,提出表 1 所示参数。根据激光雷达方程和模式大气,计算出 RRML 系统

接收的回波信号和回波信号信噪比廓线。

表 1 RRML 系统采用的仿真参数
Table 1 RRML system parameters

System parameter	Value
Nd:YAG wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	200
Pulse repetition frequency /Hz	20
Telescope receiver diameter /mm	350
Emitting optical transmittance	0.7
Receiving optical transmittance (607 nm and 532 nm)	0.2/0.15
Filter bandwidth/nm (607 nm and 532 nm)	0.3/0.5
Detection quantum efficiency (607 nm and 532 nm)	0.1/0.12
Bin width /m (Raman and Rayleigh)	200/1000
Dark counts /counts per second	1000
Telescope field of view /mrad	2

利用中国科学院安徽光学精密机械研究所 L625 大型激光雷达实测信号与仿真信号作对比,两者变化趋势的一致性说明仿真信号是可信的。图 2 (a)是对流层米氏散射的仿真信号,仿真结果表明大气对流层信号动态范围达到 6 个量级以上。模式大气反应不出实际大气的状态,且 L625 激光雷达回波信号未校正几何因子影响,故 7 km 以下仿真信号与实测信号不一致,7 km 以上仿真信号与实测信号趋于一致。图 2 (b)显示拉曼仿真信号在 1~20 km 探测高度上,信号动态范围达到了 4 个量级,仿真信号与 L625 实测信号趋势的一致性较好。图 2(c)为 20~60 km 分子瑞利散射仿真信号,仿真信号与实测信号趋势的一致性很好。

图 2(d)为仿真的信噪比,拉曼信号累积 40000 个激光脉冲,其信噪比在 18 km 高度可以达到 10;瑞利信号累积 30000 个激光脉冲,其信噪比在

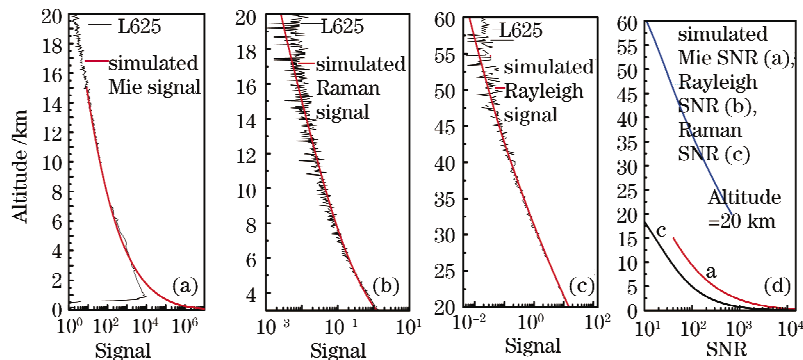


图 2 瑞利-拉曼-米氏散射仿真信号及信噪比
Fig. 2 Simulated Rayleigh-Raman-Mie signal compare to L625

60 km高度达到 10;图 2(a)仿真结果表明对流层气溶胶回波信号很强,故图 2(d)仿真大气气溶胶回波信噪比时,只取了回波强度的 4%,其信噪比在 15 km处达到 40。仿真时忽略了夜晚天空微弱背景光的干扰,故仿真得到的信噪比应该稍偏大。

RRML 系统温度测量精度要求达到 ± 3 K,气溶胶和卷云消光、后向散射系数及消光后向散射比测量精度为 $\pm 20\%$ 。根据 L625 激光雷达数据反演的经验,50 km 高度处的瑞利信号,20 km 高度处的拉曼信号的信噪比达到 5,15 km 高度处的米氏散射信号信噪比达到 10,激光雷达探测精度可以满足数据反演精度的要求^[5,6]。仿真信噪比留有 2 倍的冗余,可以保证 RRML 系统实现设计指标。

3 光学接收系统设计

激光雷达光学接收单元包括接收望远镜和后继光路。图 2(a),(c)的仿真结果表明,1~50 km 的气溶胶和空气分子 532 nm 回波信号整个动态范围达到了 8 个量级,单一探测器无法检测这样大动态范围的信号,如果通过加衰减片、减小探测器增益等手段抑制回波信号动态范围,则会影响瑞利信号的探测高度,因此 532 nm 回波信号接收光路应分 532 nm 高层、低层 2 个通道接收,如图 3 所示。

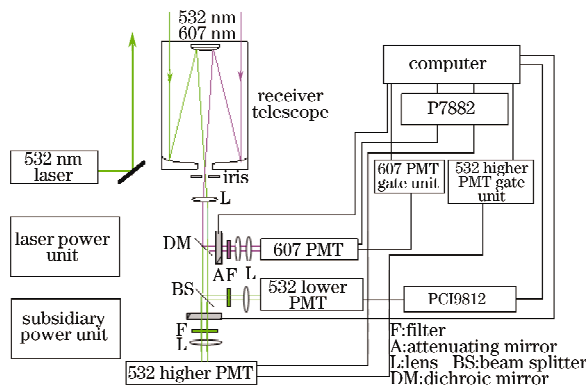


图 3 RRML 系统结构框图

Fig. 3 Schematic diagram of Rayleigh-Raman-Mie lidar

光学发射单元采用 Continuum 公司的 SureliteII 型激光器,波长 532 nm,脉冲能量 200 mJ,重复频率 20 Hz。接收望远镜采用 Meade 公司口径 350 mm 的卡塞格林望远镜。回波光经望远镜小孔光阑(0~2 mrad 可调)和准直镜(lens)。532 nm 和 607 nm 的回波光信号通过 607 nm 波长全反(反射率大于 97%),532 nm 波长高透的分色镜(dichroic mirror)分离,607 nm 光由 607 nm 通道

接收,532 nm 光再经 96%透射,4%反射的分束镜 (beam splitter)分为高低两层,分别被 532 nm 高层和低层通道接收,根据图 2(d)米氏散射信噪比仿真的结果,这种设计既满足边界层气溶胶的探测,又不影响瑞利信号的探测高度。532 nm 通道和 607 nm 通道分别加 0.5 nm 和 0.3 nm 带宽的滤光片,回波光信号通过滤光片后的短焦距汇聚透镜汇聚到探测器阴极面上。分析图 2(a)和(b)的仿真数据,拉曼回波信号较气溶胶米氏散射回波信号弱大约 3 个量级,故要求 607 nm 拉曼通道对波长相邻的 532 nm 回波光有很强的截止能力,因此 607 nm 通道增加对 532 nm 光信号的截止片。

4 光电信号检测单元的实现

4.1 瑞利和拉曼信号采集单元

图 2(b),(c)仿真结果显示,瑞利和拉曼高层回波信号极微弱,为提高其信噪比,需要采用高灵敏度、高量子效率的探测器和光子计数技术检测^[7],因此 607 nm 通道和 532 nm 高层通道采用 Hamamatsu 公司的极高灵敏度、高增益的侧窗式 R4632 型光电倍增管,暗计数 50 /s,光谱响应峰值波长在 400~600 nm 之间,响应时间 2.2 ns。信号采集选用 FAST ComTec 公司的 P7882 型光子计数卡。

当 RRML 系统进行温度测量时,为了防止低层的强回波信号引起探测器饱和,根据图 2(b)拉曼仿真信号给出的动态范围,探测 607 nm 通道拉曼信号的光电倍增管门控的开门高度为 5 km。根据图 2(c)瑞利仿真信号给出的动态范围,探测 532 nm 高层通道瑞利信号的光电倍增管门控的开门高度为 20 km。通过以上措施可以保证 R4632 光电倍增管的线性,同时可以避开气溶胶米氏散射信号对瑞利和拉曼回波信号的干扰。

4.2 米氏散射信号数据采集系统

当使用 532 nm 高层通道和 607 nm 通道探测边界层以上大气气溶胶和高层卷云时,强回波信号会使 R4632 光电倍增管极灵敏型探测器饱和,故需要在 532 nm 高层通道和 607 nm 通道接收光路上加相应强度的衰减片,532 nm 高层通道的光电倍增管门控的开门高度 5 km,保证 R4632 光电倍增管的线性。衰减片的调整通过步进电机带载装有 5%, 20%, 50%, 100% 透过率衰减片的 4 档位衰减盘实现。532 nm 低层通道信号检测采用 Hamamatsu 公司的 H5783 型光电倍增管,峰值响应波长 500 nm,光敏面直径 8 mm,内置高压模块,在大气气溶胶低

层强回波信号的检测上有较高的性价比;信号采集选用凌华公司的 PCI-9812 型 12 位 A/D 数据采集卡。通过 532 nm 高低两个通道米氏散射回波信号的拼接,可以反演 1~15 km 气溶胶和卷云参数;通过 607 nm 通道的拉曼信号可以计算气溶胶和卷云的光学参数。

4.3 基于单片机的光电倍增管门的电路实现

RRML 系统实现了一种基于单片机的光电倍

增管门控电路,实现了对光电倍增管开门时刻的控制。Surelite II 型激光器提供激光的抽运(Flash)信号及出光同步(Q-switch)信号。Q-switch 信号较 Flash 信号有 180 μ s 的延时,两信号均为反相 TTL 电平,脉宽 12 μ s,利用这两个信号作门控电路的触发信号。因为 R4632 光电倍增管使用 C1392-57 常开型管座,故需要首先通过关门电路关闭 PMT。PMT 关门电路原理图如图 4。

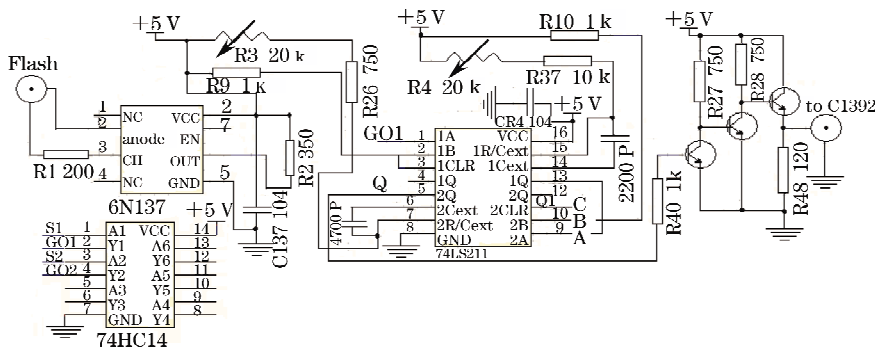


图 4 PMT 关门电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of gating close control

Flash 信号经过 6N137 高速光耦,将门控电路与激光器电路隔离。74LS211 单稳态采用下降沿触发方式,因此利用 74HC14 对 6N137 输出信号倒

相、整形。利用 Flash 信号的下降沿,触发关门电路输出上升沿到管座的 Gate 端口,使探测器关门。PMT 开门电路原理图如图 5 所示

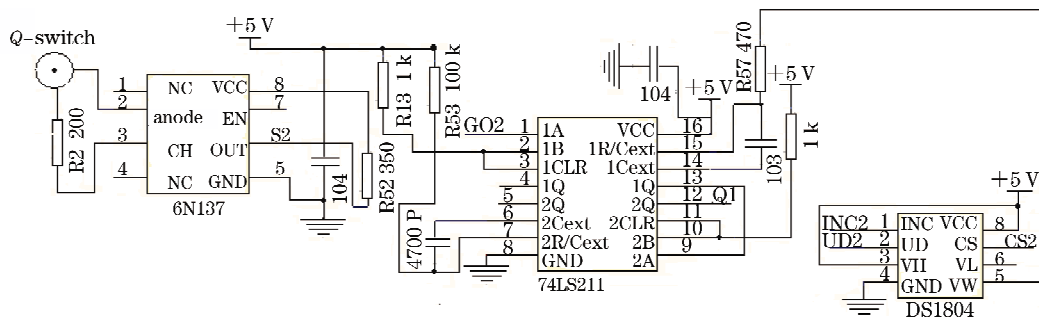


图 5 PMT 开门电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of gating open control

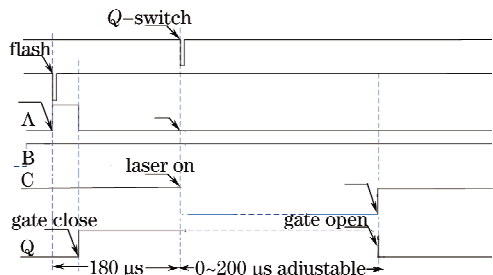


图 6 门控电路工作时序图

Fig. 6 Time sequence of gating control

当 Gate 端口为低电平时探测器开门。通过单片机控制 DS1804 数字电位器的阻值,调整

Q-switch信号触发开门电路输出下降沿的时刻,清除关门电路加在 Gate 端口的高电平,调节 PMT 的开门时刻。门控电路工作时序如图 6 所示,A,B,C,Q 见图 4 标注。

4.4 单片机控制及辅助电路

图 7 是单片机控制及采集卡触发电路原理图。光电倍增管门控和步进电机控制以 AT89S51 单片机为核心。单片机输出 500 Hz,脉宽 5 μ s 的方波信号驱动步进电机,使用 H21A3 型光电开关实现衰减盘定位,衰减片的调整通过上位机控制单片机实现;串口电路实现单片机与上位机的通信;触发电路

为 P7882 和 PCI9812 采集卡提供采集同步触发信号。

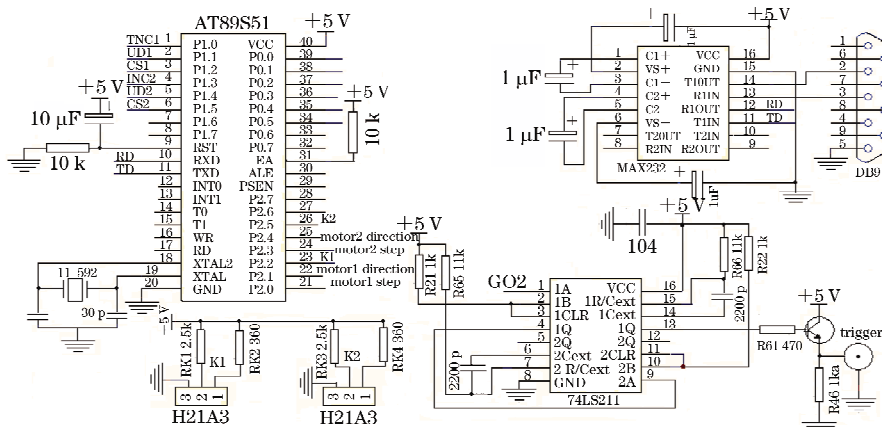


图 7 单片机控制及采集卡触发电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of micro controller unit (MCU) and trigger control

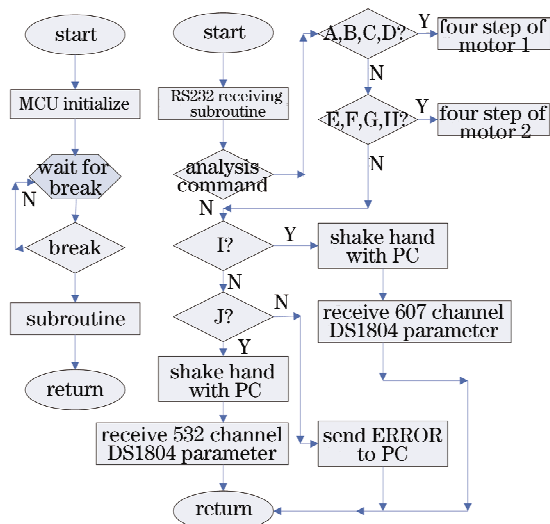


图 8 单片机控制程序流程图

Fig. 8 Schematic diagram of flow process chart

4.5 单片机控制程序流程

图 8 是单片机程序流程图。上位机软件开始运行时完成对单片机的初始化,初始化完成后,单片机等待上位机发送的 PMT 门控的调整和步进电机控制指令。

5 激光雷达运行结果及讨论

激光雷达研制成功后,进行了一系列的测试,检验激光雷达的探测能力。对瑞利-拉曼信号的检测试验选择在晴朗无云的夜晚进行,米氏散射信号检测试验当晚高空有云,观测地点位于合肥市西郊(31.9 N,117.17 E)。在满足系统信噪比的前提下,根据图 2(d)仿真的信噪比结果,拉曼信号检测累加 40000 个激光脉冲,瑞利信号检测累加 30000 个激光脉冲,米氏散射信号累积 10000 个激光脉冲。

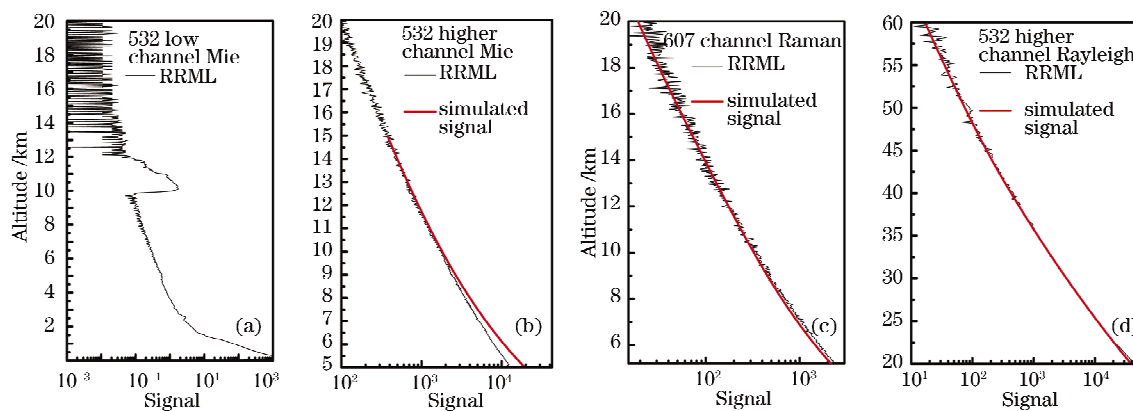


图 9 RRML 系统实测信号与仿真信号的对比

Fig. 9 Lidar measured signal compared with simulated signal

图 9(a)为 532 nm 低层通道探测的大气气溶胶和云的米氏散射信号,在 9.5~12.5 km 处出现较

厚的云层。图 9(b)为 532 高层通道加 10%透衰减片,门控开门高度为 5 km 所探测的大气气溶胶信

号,5~9 km处反映的大气气溶胶浓度较模式大气干净,9 km后信号趋势与仿真信号一致性较好,15 km处的信噪比达到20。图9(c)为607 nm通道拉曼回波信号,实测信号趋势与仿真信号一致性较好,信噪比在17 km处可以达到5。图9(d)为532 nm高层通道的瑞利信号,信噪比在55 km处可以达到5,实测信号在25~60 km范围内与仿真信号一致性较好。

6 结 论

分析表明,RRML系统探测的信号信噪比达到数据反演所需的要求。通过对瑞利、拉曼散射和大气气溶胶米氏散射的实测信号与仿真信号的对比,两者趋势的一致性反映出RRML系统光电信号检测单元保证了很好的线性检测。RRML系统满足大气温度、气溶胶和卷云的探测,光学接收和光电信号检测单元设计达到了设计指标。

参 考 文 献

- 1 M. R. Gross, T. J. McGee, R. A. Ferrare *et al.*. Temperature measurements made with a combined Rayleigh-Mie and Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5987~5995
- 2 M. Alpers, R. Eixmann, C. Fricke-Begemann *et al.*. Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and rotational Raman scattering [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, **4**: 793~800
- 3 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
- 4 Y. Sasano, T. Kobayashi. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [R]. No. 4 Final Report, F-82, 1995/NIES 1995, (3): 33~34, 60~66
- 5 Wu Yonghua. Lidar measurements of temperature and aerosol of atmosphere [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2002
吴永华. 激光雷达探测大气温度和气溶胶[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2002
- 6 Wu Yonghua. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmosphere temperature profiles measurements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851~856
吴永华. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 851~856
- 7 Wang Qingyou. *Optoelectronic Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
王庆有. 光电技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005