

基于转动拉曼光谱的多普勒激光雷达灵敏度 测量新方法

陈 阳 吴松华 刘智深

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003)

摘要 提出了一种多普勒激光雷达测风灵敏度实时测量的方法, 解决测风时因气溶胶时空变化引入的灵敏度测不准问题。在多普勒测风激光雷达的接收系统中增加两个转动拉曼谱的接收通道, 利用分光片和干涉滤光片分离提取大气的弹性散射谱和大气分子的转动拉曼谱, 实时获取气溶胶后向散射比以测算灵敏度。系统采用 532.25 nm 波长的单纵模激光光源, 探测出中心波长为 531.3 nm 和 528.7 nm 两个转动拉曼谱。对系统进行了数值计算和模拟分析, 结果表明在脉冲能量 300 mJ, 望远镜口径 270 mm 的条件下, 可实时获取低空对流层(5~8 km 以下)的气溶胶后向散射比廓线, 在线定标, 提高了测风的准确度。

关键词 大气光学; 激光雷达; 转动拉曼光谱; 气溶胶后向散射比; 测风灵敏度

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100508

Novel Method to Measure Sensitivity of Doppler Lidar Using Rotational Raman Spectrum

Chen Yang Wu Songhua Liu Zhishen

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract A new method to measure real-time sensitivity of Doppler lidar is presented, to solve the sensitivity uncertainty problem caused by the spatial and temporal change of aerosol during wind detecting. Two receive channels of rotational Raman spectrum are added, system receives elastic scattering spectrum and rotational Raman spectrum respectively with beam splitters and interference filter so as to acquire the aerosol backscattering ratio for sensitivity calculation. The two rotational Raman spectrums, central wavelength of 531.3 nm and 528.7 nm, are detected with 532.25 nm wavelength single longitudinal mode laser. Data simulation and analysis show that the system is capable of measuring aerosol backscattering ratio profile of low-altitude troposphere (within 5~8 km) under conditions of laser energy of 300 mJ, 270 mm diameter telescope, and the on-line calibration can improve the accuracy of wind measurement.

Key words atmospheric optics; lidar; rotational raman spectrum; aerosol backscattering ratio; wind measurement sensitivity

OCIS codes 010.0010; 280.0280; 290.0290

1 引 言

大气风场是气象观测中的重要参数,多普勒激光雷达能够以很高的时间、空间分辨率,特别是在晴空干洁大气条件下测量大气三维风场^[1,2]。在天气,气候,海洋,环境以及交通,航空和航天等领域都

有重要的应用价值。基于碘分子滤波器的多普勒激光雷达利用碘分子的某一吸收谱线作为鉴别多普勒频移的滤波器^[3],通过检测大气散射光的多普勒频移确定大气的运动速度——风速,然而大气散射信号中包含光谱特性截然不同的气溶胶米氏(Mie)散

收稿日期: 2010-08-21; **收到修改稿日期**: 2010-10-27

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12Z101)资助课题。

作者简介: 陈 阳(1985—),男,硕士研究生,主要从事大气激光雷达方面的研究。E-mail:gates35@163.com

导师简介: 吴松华(1976—),男,博士,副教授,主要从事大气激光雷达方面的研究。E-mail:wush@ouc.edu.cn

(通信联系人)

射和大气分子 Cabannes 散射^[4],两种散射信号通过鉴频滤波器的响应各不相同,风速测量首先要确定两种散射的后向散射比 R_b 。当前的多普勒测风激光雷达系统先测定气溶胶后向散射比^[5],即先探测确定灵敏度^[6,7]之后再行风速测量,此方法需假定灵敏度测量与风速测量的时间间隔中大气状况稳定,但气溶胶时空变化十分剧烈,分时测量的灵敏度数据不能反应测风当时的大气状况,必然引入误差。

本文提出一种灵敏度实时测量方法,从大气分子的其他散射谱着手,不额外分配发射功率,在测风的同时测定 R_b 。方法是在基于碘分子滤波器的多普勒测风激光雷达系统中增加两个转动拉曼接收通道,利用大气分子转动拉曼(Raman)谱在一次探测中同步实时获取 R_b ,在线标定灵敏度,提高测风的准确性。对多普勒测风激光雷达系统进行了升级工作,设定完成各项系统参数,从激光雷达方程出发,引用标准大气模型,对系统的测风准确性进行了模拟分析和历史观测数据对比,为系统的硬件设计和实验奠定了理论基础。

2 工作原理

2.1 新光谱接收通道的增加

激光雷达光脉冲入射到大气中,产生气溶胶散射和大气分子散射,其中气溶胶散射为弹性散射 Mie 散射,大气分子散射包含弹性散射 Cabannes 散射和非弹性散射 Raman 散射。利用干涉滤光片分离提取弹性散射谱和大气分子的 Raman 散射谱^[8,9],并建立两者之间的联系,可在风速测量的同时获取气溶胶后向散射比 R_b 数据。考虑到 Raman 散射谱中,转动拉曼较之振动拉曼,其强度高出约 2 个数量级,且转动拉曼散射波长近似于入射中心波长,可免去波长变化所引入的大气透射率校正因子(消光系数改变)的繁琐计算,因而选择大气分子的转动拉曼谱。此外,转动拉曼谱包含波长红移的斯托克斯(Stokes)谱和波长蓝移的反斯托克斯(Anti-Stokes)谱,前者易受气溶胶荧光影响干扰测量,故提取接收转动拉曼 Anti-Stokes 谱。

转动拉曼谱的单根谱线强度均对温度敏感,靠近入射波长的低量子数谱线强度随温度的升高而降低,离入射波长较远的高量子数谱线强度随温度升高而增强。尽管对于气溶胶混合比反演,只需要测量 Anti-Stokes 转动拉曼谱的总体散射强度,但由于大气温度廓线也是风速反演的标定参数之一,光谱分光系统的设计考虑了后续温度测量的需要。利

用分光装置,分别提取转动拉曼的低量子谱和高量子谱,既可通过对两个通道进行简单的线性运算得到对温度不敏感的转动拉曼参考信号,用以演算 R_b ,又可根据两者的温度特性反演大气的温廓线^[10],为激光雷达的功能升级创造条件。

2.2 多普勒激光雷达风场反演的灵敏度问题

多普勒测风激光雷达,将接收的大气弹性散射光信号分为两路,一路为测量通道,经过碘分子滤波器进行频率检测;另一路为参考通道,用作能量测量。两路相比即可消除发射激光能量起伏的影响,将后向散射光的多普勒频移转化为透过碘分子滤波器时的光能量变化,通过能量探测获取多普勒频移信息。两通道接收光子数为

$$N_{EM}(\nu) = \frac{k_1 \Delta r}{r^2} [f_a(\nu)\beta_a + f_m(\nu)\beta_m] \times \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_m^\lambda(z) + \alpha_a^\lambda(z)] dz\right\}$$

$$N_{ER} = \frac{k_2 \Delta r}{r^2} (\beta_a + \beta_m) \times \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_m^\lambda(z) + \alpha_a^\lambda(z)] dz\right\}, \quad (1)$$

式中 N_{EM} 和 N_{ER} 分别为弹性散射的测量通道与参考通道的接收光子数, k_1 和 k_2 分别是测量通道和参考通道的系统常数, $\Delta r, r$ 为距离分辨力与探测距离, f_a 和 f_m 分别是气溶胶散射和大气分子散射通过碘分子滤波器时的透射率,均为后向散射光频率 ν 的函数, β_a, β_m 分别为气溶胶后向散射系数和大气分子 Cabannes 后向散射系数, $\alpha_m^\lambda, \alpha_a^\lambda$ 大气分子消光系数和气溶胶消光系数。无风时和有风时的两路通道风速比(即信号强度比)分别为

$$R_0 = R_w(\nu_0) = \frac{N_{EM}(\nu_0)}{N_{ER}} = \frac{k_1}{k_2} \frac{f_a(\nu_0) \left[\frac{\beta_a}{\beta_m} \right] + f_m(\nu_0)}{\left[\frac{\beta_a}{\beta_m} \right] + 1}, \quad (2)$$

$$R_w(\nu) = \frac{N_{EM}(\nu)}{N_{ER}} = \frac{k_1}{k_2} \frac{f_a(\nu) \left[\frac{\beta_a}{\beta_m} \right] + f_m(\nu)}{\left[\frac{\beta_a}{\beta_m} \right] + 1}. \quad (3)$$

灵敏度是指测量仪器对一个单位的被测值的响应率,定义测风灵敏度 s 为单位径向风速引起的风速比 R_w 的变化率。

$$s = \frac{d(R_w/R_0)}{dV_{LOS}} = \frac{2}{\lambda} \frac{d(R_w/R_0)}{d\nu} = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{f_a(\nu_0)R_b + f_m(\nu_0)} \frac{d[f_a(\nu)R_b + f_m(\nu)]}{d\nu}. \quad (4)$$

由(4)式可知不同 R_b 意味着不同的 s , 不同高度处径向风速 V_{LOS} 的计算首先需确定 R_b

$$R_b(r) = \beta_a(r)/\beta_m(r). \quad (5)$$

当前利用碘分子滤波器鉴频测风的激光雷达, 其灵敏度的确定主要有两种方法。1) R_b 标定法, 在测风前先独立地测量气溶胶混合比 R_b , 确定系统响应与径向风速的关系, 后将激光雷达转入风场探测模式测风^[11,12]。2) 灵敏度直接测量法, 考虑 R_b 较小以分子散射为主的条件下, 系统响应随风速近似呈线性变化, 通过改变发射激光频率来等效风速

引起的频移, 垂直入射大气直接测量当时的灵敏度值^[13]。这两种方法均需在测风前改变激光雷达工作模式进行参数测量, 此外方法二在 R_b 较大时需进行非线性校正。

2.3 R_b 的实时演算与灵敏度标定

多普勒测风激光雷达提取了大气的弹性散射谱, 其忽略的光谱中包含着大气分子的转动拉曼谱, 可用以获取 R_b 。

大气分子转动拉曼 Anti-Stokes 谱线的后向散射截面计算^[14]:

$$E_i(J) = [B_{0,i}J(J+1) - D_{0,i}J^2(J+1)^2]hc,$$

$$\Delta\nu_i(J) = B_{0,i}2(2J-1) - D_{0,i}[3(2J-1) + (2J-1)^3], \quad (6)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_\pi^i(J) = \frac{64\pi^4}{15} \frac{g_i(J)hcB_{0,i}[\nu_0 + \Delta\nu_i(J)]^4 \gamma_i^2}{(2I_i + 1)^2 kT} \frac{J(J-1)}{(2J-1)} \exp\left[-\frac{E_i(J)}{kT}\right], \quad (i = N_2, O_2; J = 2, 3, 4 \dots)$$

表 1 (6)式中的常数值

Table 1 Constants in formulas (6)

Molecule	$B_{0,i}/\text{cm}^{-1}$	$D_{0,i}/\text{cm}^{-1}$	$g_i(J)_{\text{even}}$	$g_i(J)_{\text{odd}}$	I_i	$\gamma_i^2/(10^{-48} \text{ cm}^6)$
N_2	1.9895	5.48×10^{-6}	6	3	1	0.51
O_2	1.4377	4.85×10^{-6}	0	1	0	1.27

大气分子 Cabannes 散射的后向散射截面计算^[4]

$$\sigma_{m-ER} = 5.45 \left[\frac{550}{\lambda} \right]^4 \times 10^{-23}. \quad (7)$$

弹性散射参考信号的光子数和转动拉曼参考信号的光子数可分别表示为

$$N_{ER} = \frac{C_1 \Delta r}{r^2} (\beta_a + \beta_m) \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_m^\lambda(z) + \alpha_a^\lambda(z)] dz\right\}$$

$$N_{RR} = \frac{C_2 \Delta r}{r^2} \beta_R \exp\left\{-\int_0^r [\alpha_m^\lambda(z) + \alpha_a^\lambda(z) + \alpha_m^{\lambda_R}(z) + \alpha_a^{\lambda_R}(z)] dz\right\}, \quad (8)$$

式中 $\beta_a, \beta_m, \beta_R$ 分别为气溶胶后向散射系数, 大气分子 Cabannes 后向散射系数, 大气分子转动拉曼后向散射系数, C_1 和 C_2 为两个通道折算的系统常数, $\alpha_m^\lambda, \alpha_a^\lambda, \alpha_m^{\lambda_R}, \alpha_a^{\lambda_R}$ 分别为入射光大气分子消光系数, 入射光气溶胶消光系数, 转动拉曼散射光大气分子消光系数和转动拉曼散射光气溶胶消光系数。由于转动拉曼散射的波长偏移仅为 $1 \sim 5 \text{ nm}$, 因此可近似认为 $\lambda_R \approx \lambda$, 得 $\alpha_m^{\lambda_R}(r) = \alpha_m^\lambda(r), \alpha_a^{\lambda_R}(r) = \alpha_a^\lambda(r)$, 将 N_{ER} 与 N_{RR} 联立, 作比值运算可得

$$\frac{N_{ER}}{N_{RR}} = \frac{C_1 (\beta_a + \beta_m)}{C_2 \beta_R} = \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{\beta_a}{\beta_R} + \frac{N_m \sigma_{m-ER}}{N_m \sigma_{m-RR}} \right), \quad (9)$$

式中 N_m 为单位体积大气分子个数, 大气分子 Cabannes 后向散射截面 σ_{m-ER} 和大气分子转动拉曼后向散射截面 σ_{m-RR} 均可由理论计算确定。系统常数 C_1 和 C_2 可以通过实验标定, 在晴朗干洁大气观测实验中, 利用高光谱分辨率激光雷达工作模式, 即

发射激光的中心波长在碘分子吸收峰值位置, 确定纯分子散射的大气回波距离^[15], 此处 $\beta_a \approx 0$, 通过(8)式则可标定出系统常数 C_1/C_2 。由此可演算得

$$R_b = \frac{\beta_a}{\beta_m} = \frac{C_2 \sigma_{m-RR} N_{ER}}{C_1 \sigma_{m-ER} N_{RR}} - 1. \quad (10)$$

预先设定一系列气溶胶后向散射比 R_b 的值, 根据大气散射模型和碘分子吸收线计算出不同 R_b 对应的风速灵敏度, 即不同 R_b 下系统响应与径向风速的关系, 实际测量时根据实时获得的 R_b 值确定灵敏度, 根据系统响应反演大气风场。

3 系统构建

实时定标多普勒测风激光雷达系统(如图 1 所示), 可同步获取近地面气溶胶信息和大气三维风场, 主要由激光发射系统、回波接收系统和数据采集系统三部分组成。

表 2 BS 和 IF 参数
Table 2 Parameters of BS and IF

Parameter	BS1	BS2	IF
CWL /nm	532.25	531.3	528.7
FWHM /nm	<0.2	0.8	1.6
AOI /(°)	5	5	0
Spectral profiles	Aiguille	Rectangular	Rectangular
Transmission τ	>60%	>60%	>80%
Reflectivity κ	>90%	>90%	
Reflection Range /nm	527.8~531.8	527.8~529.8	
* 532.25nm	$\kappa \approx 0.2$	$\tau < 10^{-5}$	$\tau < 10^{-5}$

3.3 数据采集系统

数据采集系统由八通道光子计数器(德国, PMM328)和计算机组成,经光电倍增管从四个通道出来的光电流进入到光子计数器中,采样率4 MHz,最高光子计数率 100 MHz,进行信号采集,而后输入计算机反演运算,最终同步获得大气 R_0 廓线和三维风场数据。系统总参数如表 3 所列。

表 3 系统参数

Table 3 Parameters of system

Parameters	Value
Wavelength /nm	532.25
Pulse energy /mJ	300
Pulse repetition /Hz	10
Telescope diameter /mm	270
Field of view / μ rad	200
Vertical resolution/m	37.5
Count rate of photon counter /MHz	100
Dark counts /s	80

4 模拟分析

4.1 转动拉曼信号的计算

转动拉曼 Anti-Stokes 谱线后向散射截面(cross section)经计算绘制于图 2 中,根据所定制的滤波器,框出所接收的低量子谱线和高量子谱线,其中低量子谱中氮气分子转动拉曼谱线为量子数3~6,氧气分子转动拉曼谱线为量子数 5~7;高量子谱中氮气分子转动拉曼谱线为量子数 13~19,氧气分子转动拉曼谱线为量子数 19~27。累加计算得随温度升高而减弱的低量子谱与随温度升高而增强的高量子谱,并线性

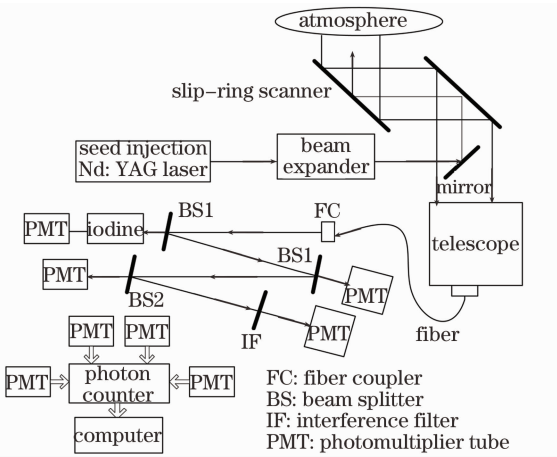


图 1 实时定标多普勒测风激光雷达系统框图

Fig.1 Schematic diagram of real-time calibration Doppler wind lidar system

3.1 激光发射系统

发射系统由激光器,扩束镜,反射镜和扫描转镜组成。采用美国 Continuum 公司的 Powerlite7000 灯抽运 YAG 脉冲激光器,种子注入实现 532.25 nm 单纵模输出,单脉冲能量 300 mJ,脉冲重复频率 10 Hz。经 10 倍扩束镜压缩发散角扩束后,入射到反射镜上导入扫描转镜进行大气风场探测。

3.2 回波接收系统

接收系统由望远镜,光准直器,光纤,干涉滤光片组和碘池和光电倍增管组成。激光入射到大气中被气溶胶和大气分子散射,回波信号由直径270 mm、发散角 0.2 mrad 的卡塞格林望远镜接收(激光的发射和接收采用同轴系统),通过光准直器导入光纤并进入由三片带滤色性质的分光片(BS)和一片干涉滤光片(IF)组成的光谱分离装置,作用类似于多色仪。BS1,BS2 和 IF 的参数如表 2 所示,其中透射率和反射率分别为 τ 和 κ 。如图 1 示,接收的信号光入射到 BS1 上,透射 532.25 nm 波长的 Cabannes 和 Mie 散射谱,进入弹性散射测量通道进行碘分子滤波鉴频,同时反射转动拉曼谱,反射光入射到与之相对的另一片 BS1 上,透射光谱进入弹性散射参考通道,经两次透射可大幅削弱弹性散射的强度,剩余弹性散射约为初始的 4%。BS1 的二次反射光入射到 BS2 上,透射光谱为转动拉曼低量子谱,BS2 的反射光经 IF 滤色提取转动拉曼高量子谱,BS2 和 IF 对入射波长 532.25 nm 的抑制比可达 10^5 ,保证转动拉曼信号的提取时对弹性散射的抑制累积可达 10^7 ,消除弹性泄漏对转动拉曼信号测算的影响。四个通道均采用光子计数型光电倍增管(PMT)(Hamamatsu H5783P)进行光谱接收。

叠加得出转动拉曼参考信号 $N_{RR} = N_{RL} + kN_{RH}$, $k = 0.8825$, 参考信号后向散射截面 $\sigma_{m-RR} = 2.5928 \times 10^{-34} \text{ m}^2/\text{sr}$ (如图 3 所示), 可见 N_{RR} 几乎不随温度发生变化, $\frac{\Delta N_{RR}(T)}{N_{RR}} = \frac{N_{RR}(T) - \overline{N_{RR}}}{\overline{N_{RR}}}$, $\left| \frac{\Delta N_{RR}(T)}{N_{RR}} \right| < 1.5 \times 10^{-3}$ (如图 4 所示)。

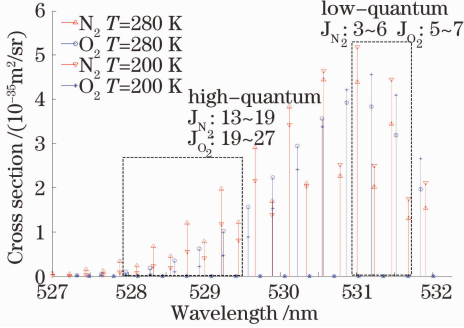


图 2 转动拉曼 Anti-Stokes 谱线

Fig. 2 Anti-Stokes lines of rotational Raman

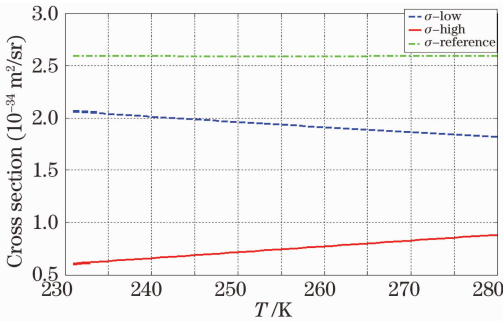


图 3 高,低量子与参克拉曼的后向散射截面

Fig. 3 High-quantum, low-quantum and Raman reference cross section

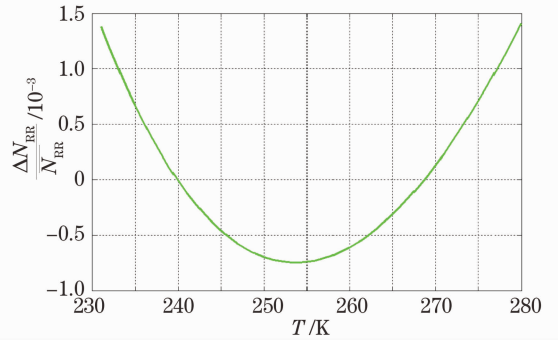


图 4 参克拉曼随温度的相对变化

Fig. 4 Relative change of Raman reference with temperature

4.2 R_b 引起的灵敏度变化

不同 R_b 下的测风灵敏度 s 如图 5 所示, 设定大气温度 $T = 250 \text{ K}$ 。实测海拔 3 km 处 R_b 的值如图 6(a) 所示, 随时间变化剧烈, 共测试 10 min, 均值 3.35, 标准差 2.83。反演得灵敏度如图 6(b) 所示, 均值 0.01024, 标准差 0.00161。灵敏度随 R_b 不断无规则地变化, 若采用非实时测量, 选用某一时刻的灵敏度数据, 将引入难以估测的误差。

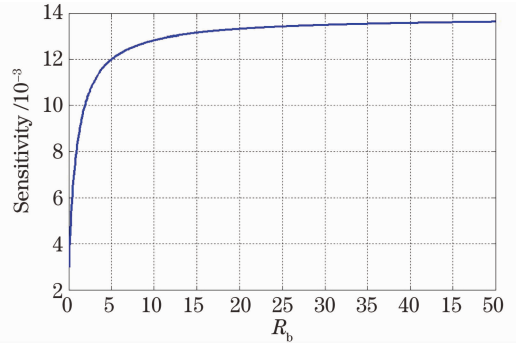


图 5 R_b 与测风灵敏度关系

Fig. 5 Relationship between R_b and sensitivity

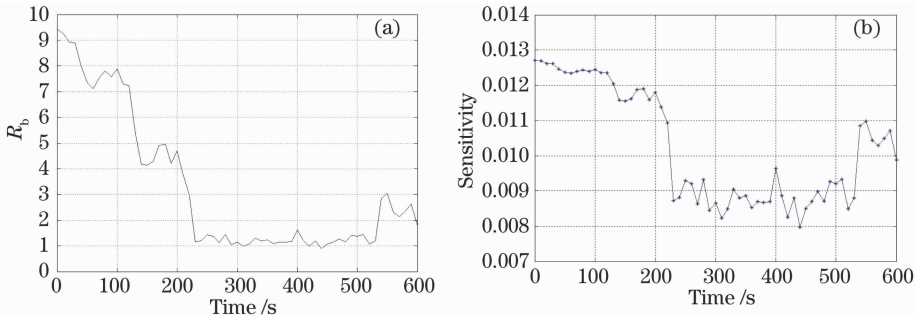


图 6 (a) R_b 和 (b) 灵敏度随时间变化

Fig. 6 Change of (a) R_b and (b) sensitivity with time

实测 R_b 时空变化温度-高度图像如图 7(a) 所示, 相应的测风灵敏度如图 7(b) 所示, 设定一个匀风速场(径向风速均为 $V_{LOS} = 6 \text{ m/s}$), 并由气溶胶

散射和大气分子散射通过碘分子滤波器的透射率数值计算出此状态的风速比 R_w 的变化率 $\Delta R_w / R_0 = (R_w - R_0) / R_0$ 如图 7(c) 所示。若未进行灵敏度标

定,则选取某一时刻如 $t=100$ s 时的灵敏度数据,由图 7(c)反演出新的风场图,并减去 $V_{LOS} = 6$ m/s 的

匀风速场得到图 7(d),可见标定前后的风速误差, R_b 随时间变化的高度处,风速误差较明显。

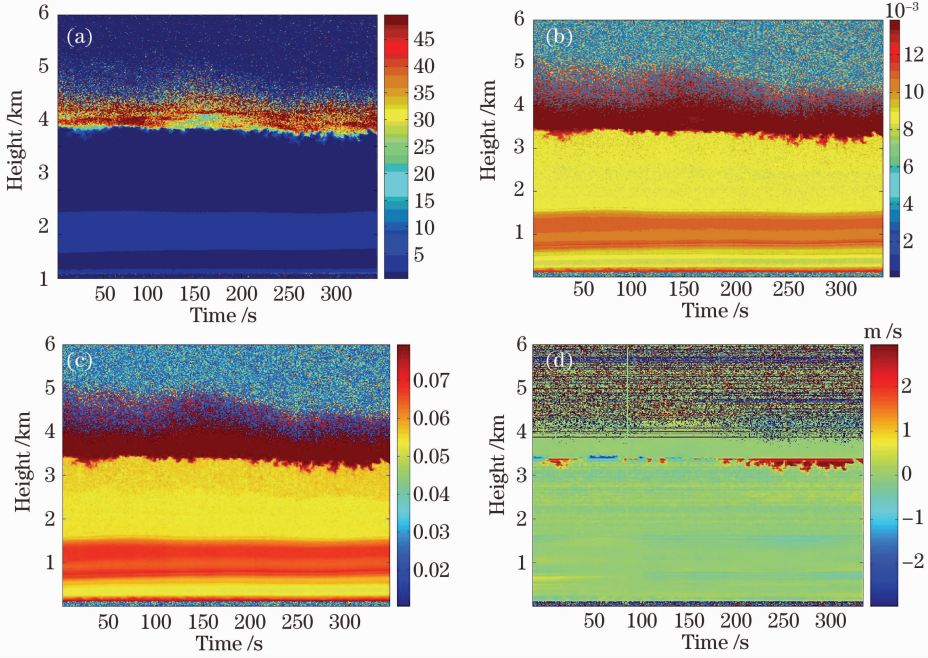


图 7 (a) 实测 R_b 时空变化, (b) 引起的灵敏度变化, (c) 风速比 R_w 的变化率, (d) 标定前后的风速误差

Fig. 7 (a) Spatial and temporal change of measured R_b , (b) corresponding change of sensitivity, (c) wind ratio derivative, (d) wind uncertainty between calibration and non-calibration

4.3 信噪比与误差分析

弹性参考通道的回波强度与信噪比分析计算时,假设 $R_b \geq 0$ 时回波强度与信噪比应均优于该条件假设。空气密度与温度的高度分布利用的是 1976 年美国标准大气模式,空间分辨率为 37.5 m。单脉冲激光能量的回波强度如图 8 所示。

$$\Omega = \frac{\pi f_{ov}^2}{4} \quad (11)$$

$$N_D = n_{dark} \Delta t.$$

式中 N_B 是用光子数表示的天空背景光的强度, η 为系统光学效率, $S_b(\lambda)$ 是天空背景辐射 $S_b(\lambda = 532 \text{ nm}) = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$, $\Delta\lambda$ 是窄带干涉滤光片的带宽, Ω 是接收立体角, f_{ov} 是视场角, 积分时间 Δt 等于单个距离库的采样时间 $2\Delta r/c$, n_{dark} 为 PMT 每秒暗计数。经计算,三通道的背景噪声(弹性参考 ER, 低量子谱 RL, 高量子谱 RH)分别为 $N_{B-ER} = 0.1$, $N_{B-RL} = 2.1$, $N_{B-RH} = 4.2$, 暗计数 $N_D = 2 \times 10^{-5}$ 远小于背景噪声,而且可以通过设置适当的光子计数器阈值电平滤除, N_D 的影响可忽略。各通道 M 个脉冲累积下的信噪比: $f_{SNRi} = \frac{N_i}{\sqrt{N_i + N_{B-i}}} \times \sqrt{M}$ 。实际风场测量中,采用一定仰角在东南西北以及垂直入射共 5 个方向进行探测,确定三维风场的风速风向,每个方向的测量约 2 min,共可累积 1200 个脉冲,3 个通道的信噪比如图 9(a) 示,信号强度较弱的转动拉曼高、低量子通道的信噪比在 5 km 处分别为 14 和 37,到 8 km 处降至 4 和 12。系统测量 R_b 的信噪比:

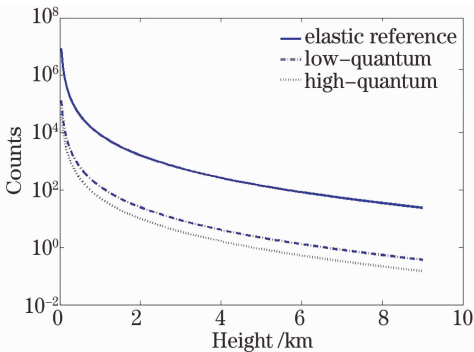


图 8 单脉冲,弹性参考与高、低量子三通道的回波光子数

Fig. 8 Counts of elastic reference, high-quantum and low-quantum under one pulse

探测的噪声主要来源于天空背景光和 PMT 的暗计数:

$$N_B = \frac{1}{h\nu} \eta S_b(\lambda) \Omega A \Delta t \Delta \lambda$$

$$f_{SNR} = \left[\frac{1}{(f_{SNR,ER})^2} + \frac{1}{(f_{SNR,RR})^2} \right]^{-1/2},$$

$$f_{\text{SNR,RR}} = \frac{N_{\text{RL}} + kN_{\text{RH}}}{\sqrt{N_{\text{RL}} + N_{\text{B-RL}} + k\sqrt{N_{\text{RH}} + N_{\text{B-RH}}}}}, \quad (12)$$

式中 $k=0.8825$ 。如图 9(b) 所示, 5 km 处测量信噪

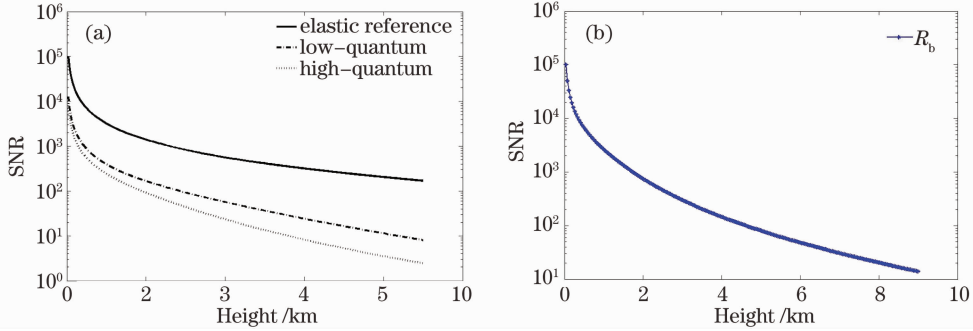


图 9 (a) 三通道信噪比, (b) R_b 测量信噪比

Fig. 9 (a) SNR of the three channels, (b) SNR of R_b measurement

令(10)式中常数 $C = \frac{C_2 \sigma_{\text{m-RR}}}{C_1 \sigma_{\text{m-ER}}}$, 得到

$$R_b = C \frac{N_{\text{ER}}}{N_{\text{RR}}} - 1. \quad (13)$$

若把气溶胶后向散射比定义为

$$R'_b = \frac{\beta_a + \beta_m}{\beta_m} = R_b + 1, \quad (14)$$

根据误差传递理论, 可得误差:

$$\Delta R'_b = C \left(\frac{\Delta N_{\text{ER}}}{N_{\text{RR}}} + \frac{N_{\text{ER}} \Delta N_{\text{RR}}}{N_{\text{RR}}^2} \right), \quad (15)$$

相对误差:

$$\frac{\Delta R'_b}{R'_b} = \frac{\Delta N_{\text{ER}}}{N_{\text{ER}}} + \frac{\Delta N_{\text{RR}}}{N_{\text{RR}}} = \frac{1}{f_{\text{SNR,ER}}} + \frac{1}{f_{\text{SNR,RR}}}, \quad (16)$$

计算结果如图 10 所示。

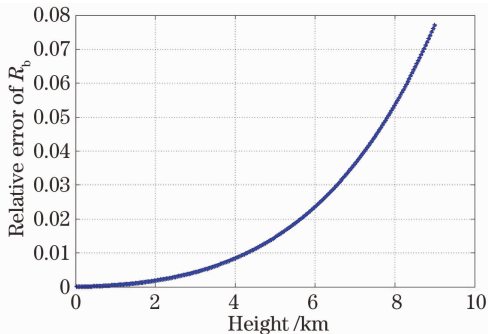


图 10 2 min 内气溶胶后向散射比的相对误差

Fig. 10 Relative error of aerosol backscattering ratio within 2 min

5 结 论

设计的实时定标多普勒测风激光雷达系统, 利用定制的分光片和干涉滤光片, 从大气回波中分离提取弹性散射谱与转动拉曼高、低量子谱, 利用各段

比为 80, 8 km 处降至 20, 能满足低空实时测量的要求, 根据探测范围需求和实时性酌情调整累积时间。

光谱的特性同步反演气溶胶后向散射比与风速。经理论分析和模拟计算, 结果表明该系统在脉冲能量 300 mJ, 望远镜口径 270 mm 的条件下, 结合窄带滤光片与视场角的匹配, 可在全天实时获取低空对流层(5~8 km 以下)的气溶胶后向散射比廓线, 在线定标测风灵敏度, 提高测风的准确度。

参 考 文 献

- 1 Zhishen Liu, Weibiao Chen, Tinglu Zhang C. Y. Wang An incoherent Doppler lidar for ground-based atmospheric wind profiling[J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **64**(5): 561~566
- 2 C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- 3 Zhishen Liu, Dong Wu, Jintao Liu *et al.* Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(33): 7079~7086
- 4 G. Tenti, C. D. Boley, R. C. Desai. On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases [J]. *Can. J. Phys.*, 1974, **52**(4): 285~290
- 5 Zhu Jinshan, Chen Yubao, Yan Zhaoai *et al.* Relationship between the aerosol scattering ratio and temperature of atmosphere and the sensitivity of a doppler wind lidar with iodine filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 449~453
- 6 Chiaoyao She, Jia Yue, Zhaoai Yan *et al.* Direct-detection Doppler wind measurements with a Cabannes-Mie lidar: A. Comparison between iodine vapor filter and Fabry-Perot interferometer methods [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4434~4443
- 7 Chiaoyao She, Jia Yue, Zhaoai Yan *et al.* Direct-detection Doppler wind measurements with a Cabannes-Mie lidar: B. Impact of aerosol variation on iodine vapor filter methods[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(20): 4444~4454
- 8 A. Behrend, J. Reichard. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman Lidar by use of an interference-filter-based polychromator[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1372~1378
- 9 A. Behrendt, T. Nakamura, T. Tsuda. Combined Raman lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(36): 2930~2939

- 10 G. Vaughan, D. P. Wareing, S. J. Pepler *et al.*. Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(15): 2758~2764
- 11 J. W. Hair, L. M. Caldwell, D. A. Krueger *et al.*. High-spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters measurement of atmospheric-state and aerosol profiles[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(30): 5280~5294
- 12 S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta *et al.*. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: Theory and instrumentation[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3716~3724
- 13 Zhishen Liu, Bingyi Liu, Zhigang Li *et al.*. Wind measurements with incoherent Doppler lidar based on iodine filters at night and day[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(2): 327~335
- 14 A. Behrendt, T. Nakamura. Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(16): 805~817
- 15 Bingyi Liu, Michael Esselborn, Martin Wirth *et al.*. Influence of molecular scattering models on aerosol optical properties measured by high spectral resolution lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(27): 5143~5154