

激光雷达精确修正对流层目标定位误差*

王 敏^{1)†} 胡顺星¹⁾ 方 欣^{1)‡} 汪少林^{1)‡} 曹开法¹⁾

赵培涛^{1)‡} 范广强^{1)‡} 王英俭¹⁾

1) 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 合肥 230031)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 9 月 17 日收到, 2008 年 11 月 16 日收到修改稿)

提出了一种利用纯转动拉曼激光雷达修正对流层目标定位误差的方法, 其基本思想是通过接收氮气和氧气的纯转动拉曼回波信号反演大气折射率垂直廓线, 根据目标定位误差理论修正不同高度处目标物的总折射角和高度定位修正值. 结果表明, 通过纯转动拉曼激光雷达反演大气折射率廓线, 可较好修正目标定位误差. 计算定位误差时得出相同高度处目标物的总折射角和高度定位修正值随视仰角的增加而减小. 当视仰角为 10° 时, 位于 8 km 高度处的目标物总偏折角可达 $3.15'$, 高度定位修正值为 14.55 m. 当视仰角为 30° 时, 相同高度处目标物总偏折角仅为 $0.98'$, 高度定位修正值为 1.19 m.

关键词: 激光雷达, 定位误差, 大气折射指数, 大气温度

PACC: 9265, 4262E

1. 引 言

对流层中下层物质与能量交换频繁, 空气对流现象明显, 大气的非线性分布和各向异性引起大气折射率的随机起伏^[1-3]. 激光定位系统发出的探测光在这种介质中传输时发生偏折产生定位误差^[4], 严重影响了激光定位系统的探测精度^[5,6]. 文献 [7] 表明大气折射率的随机起伏是影响激光定位系统测量误差的主要源之一. 提高定位精度的有效途径是确知大气折射率的真实分布. 由于低层大气温度、压强、水汽含量等大气参数变化的无规律性及对及时准确反演大气折射率廓线带来很大的困难. 目前, 国内外众多学者参与了大气折射率测量及修正理论的研究工作. 最新研制的折射率仪可以进行地面处折射率的测量, 也可装载在飞机上测量折射率的空间分布或涨落, 但其结构复杂, 不便推广和使用. 关于大气折射率的测量更多的是依据无线电探空仪或经验模型给出. 无线电探空仪探测气象要素的技术较为

成熟, 国外已用于海面空气层折射率特性的研究^[2,8]. 然而, 无线电探空仪存在费用昂贵、测量次数有限等弊端^[9], 在实际应用中更多的是采用经验模型代替实际测量. 众多的理论模型如伽马模型、指数模型等主要是根据某地区多年积累的气象资料拟合获得^[10], 一定程度上反应了折射率分布的近似趋势. 在测量精度要求不高的情况下可以用经验模型代替. 但实际大气状态变化较为复杂, 由经验模型给出的折射率廓线势必与真实廓线存在偏差, 无形中引入了不必要的订正误差. 对于高精密度定位系统来说是无法容忍的. 因此, 一种实时准确测量对流层大气折射率廓线方法的推出迫在眉睫.

本文提出了利用纯转动拉曼激光雷达信号反演对流层大气折射率修正目标定位误差的方法, 此方法具有实时性好、时空分辨率高、应用领域广等突出优点^[11], 实现了光波波段大气折射率垂直廓线的测量. 在激光定位系统探测光路折射率已知的情况下, 根据误差修正理论激光定位系统可及时调整定位参数等信息, 可有效提高定位精度.

* 科技部科技基础性工作专项基金(2007FY110700)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wm810320@mail.ustc.edu.cn

2. 测量原理

2.1. 折射率廓线测量理论

气象探空中常用折射指数 N 代替折射率 n 成为描述大气特性的常用物理量,其转化关系为

$$N = (n - 1) \times 10^6. \quad (1)$$

大气折射指数是由温度、压强、水汽和其他气体成分决定的,由于目前实验系统所能达到的测量精度有限,其他气体成分的变化导致折射指数在不同时间、地点产生 10^{-9} 量级的测量误差在实际测量中意义不大,主要考虑温度、压强、水汽对折射指数产生的影响.光波段任意气象条件下,大气折射指数近似表示为^[12]

$$N(\lambda) = 2.8438 \times 10^{-3} \times N_0(\lambda) \frac{P}{T} - 0.1127 \times \frac{e}{T}, \quad (2)$$

$$N_0(\lambda) = 272.5794 + 1.5832 \times \lambda_0^{-2} + 0.015 \times \lambda_0^{-4}, \quad (3)$$

$N_0(\lambda)$ 为由 Cauchy 模型给出的标准大气条件下的折射指数, λ_0 为真空中波长 (μm), 实验中 $\lambda_0 = 0.532 \mu\text{m}$, T 为温度 (K), P 为压强 (Pa), e 为水汽压 (Pa). 由 (2) 式可以看出,若知道大气温度 T 、压强 P 和水汽压 e 随高度的分布即可获得大气折射指数 N 的垂直廓线.

温度由纯转动拉曼激光雷达接收大气中 N_2 和 O_2 分子高低量子数回波信号的比值反演得到^[13]. 压强是温度的函数,根据纯转动拉曼激光雷达获得的温度廓线,应用压强的理论模型可获得压强的垂直廓线.温度 T 、压强 P 的函数关系分别表示为^[14-16]

$$T(z) = \frac{A}{\ln(N_L/N_H) - B}, \quad (4)$$

$$P(T) = P_0 \left(1 - \frac{r-1}{r} \times \frac{\mu g h}{RT} \right)^{\frac{1}{r-1}}, \quad (5)$$

式 (4) 中 N_H , N_L 为高低量子数回波信号,以光子数记录; A , B 为系统参数,可根据高低量子数回波信号比值与探空气球所测温度廓线拟合得出.(5) 式中 P_0 是标准大气压强, $P_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$; r 是大气比热比,实验中取 $r = 1.235$; μ 是大气平均摩尔质量, $\mu = 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg}$; g 是重力加速度, $g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; h 是高度 (m); R 是波尔兹曼常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; T 是大气温度 (K).

陆地水汽压强相对海面情况来说变化幅度较小,变化范围有限.在光波波段,水汽压强的变化对大气折射指数垂直廓线影响不大.实验中模拟计算得到:在标准大气状况下,水汽压强由 0 变化到 2000 Pa 时折射指数相对变化 -0.28%,实验中以夏季水汽模型代替实测水汽含量廓线.

2.2. 目标定位误差修正理论

目标定位误差主要涉及两方面:1) 激光在目标物处的总偏折角;2) 目标点真实高度的修正.假设整层大气是球形分层介质,水平方向大气折射率相同,层与层之间存在梯度,光线在界面处发生折射,光路如图 1 所示.图中激光发射站点位于距地面高度为 h_0 的 A 点,目标点位于距地面高度为 h_B 的 B 点, R_e 为地球半径,取 $R_e = 6731.004 \text{ km}$. θ_0 为大气折射导致的视仰角, τ 为 AB 两点之间射线的弯曲度,即总偏折角. L_0 为 AB 之间的真实距离, L 为探测光实际所经路径距离长度.

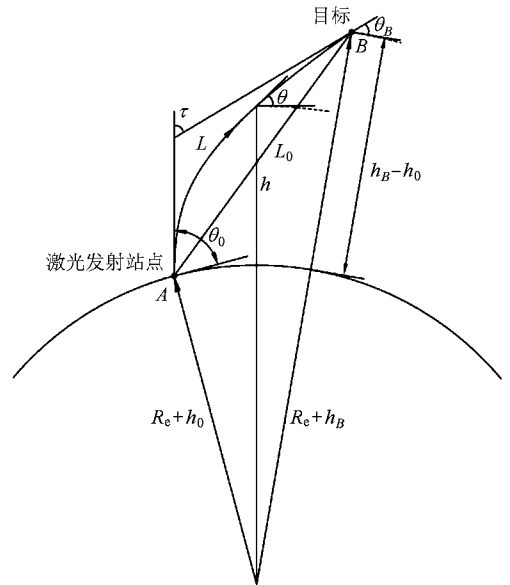


图 1 激光定位系统与目标之间几何光路图

由 Snell 定律可得

$$(R_e + h_0) n_0 \cos \theta_0 = (R_e + h) n \cos \theta. \quad (6)$$

利用图 1 所示的几何关系,激光在目标点 B 处的总偏折角可表示为^[12]

$$\tau \approx -10^{-6} \times \int_{N_0}^N \cot \theta dN, \quad (7)$$

式中 N_0 和 N 分别为 A 点和目标点处的大气折射指数.

在测量中,目标点实测高度与真实高度的误差可表示为^[12]

$$\Delta h \approx \frac{h^2 \cot^2 \theta_0 + h_0^2}{2(R_e + h_0)}(1 - k^{-1}), \quad (8)$$

式中 R_e 为地球半径, k 为等效折射系数, 表示为

$$k = [1 + R_e(dn/dh)\cos\theta_0]^{-1}. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式即可得到目标点高度定位修正值.

3. 实验结果与分析

3.1. 大气折射指数廓线的测量

纯转动拉曼激光雷达采集数据的空间分辨率为 30 m, 采样点数为 512 点, 采样脉冲数为 20000 次. 实验中利用最小二乘法, 将同天相近时间段探空气球测得的温度廓线与纯转动拉曼激光雷达高低量子数回波信号进行拟合, 确定系统参数 A, B . 把参数 A, B 代入(4)式获得纯转动拉曼激光雷达温度廓线如图 2 所示. 图中波动较大的为雷达原始信号测温廓线, \circ 表示去噪后结果. 从图中可以看出, 原始信号测温廓线在 2 km 以下存在明显的突起, 实验采用了滤波的方法消除弹性散射信号的影响.

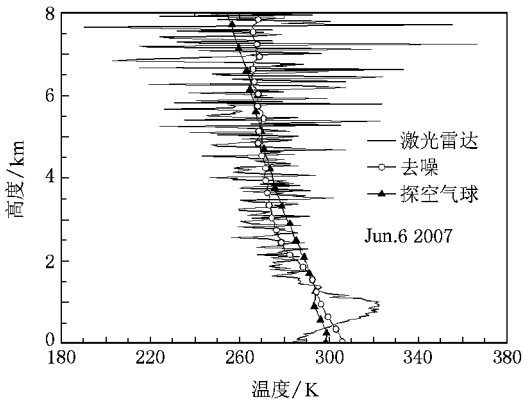


图 2 纯转动拉曼激光雷达与探空气球测温廓线

根据实测温度廓线反演得到大气压强廓线如图 3 所示. 图 4 显示了夏季水汽压强理论模型廓线. 图 5 为由大气温度、大气压强和水汽压强反演获得的纯转动拉曼激光雷达与探空气球的大气折射指数垂直廓线, Δ 为伽马模型给出的大气折射指数廓线. 图 5 中, 激光雷达与探空气球的折射指数廓线较为符合, 6 km 高度范围内, 两者最大相对偏差为 2.5%, 6—8 km 范围内最大相对偏差为 1.4%. 激光雷达与

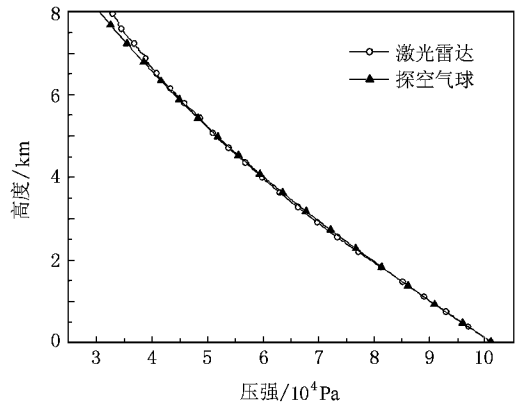


图 3 纯转动拉曼激光雷达与探空气球反演的压强廓线

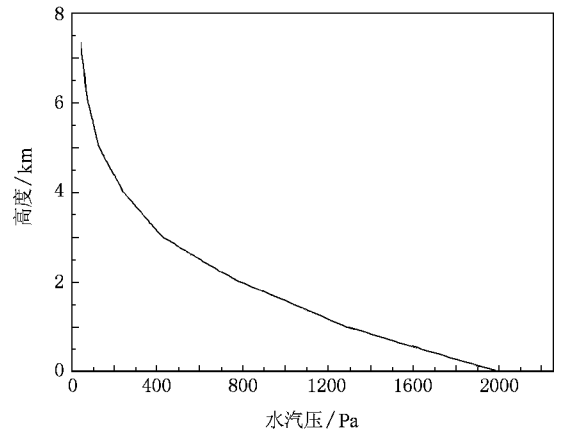


图 4 夏季水汽压强理论模型廓线

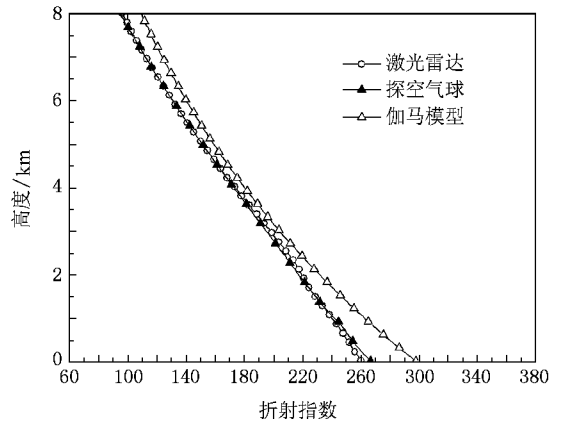


图 5 激光雷达、探空气球与伽马模型折射指数廓线

伽马模型的折射指数廓线在 2 km 以上高度有较好的一致性, 2 km 以下范围两者有较大差别, 地面处相对偏差为 14.4%. 这是由于低层大气温度、压强

和水汽波动频繁,昼夜变化幅度较大,导致折射指数廓线难以用理论模型模拟确定.

3.2. 目标定位误差的修正

对于探测波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的激光定位系统,由 (1)(6)(7) 式即可获得在不同视仰角 θ_0 时总折射角随高度的分布情况,如图 6 所示. 计算中取激光发射点高度 h_0 为 0, n_0 取地面处大气折射率. 纯转动拉曼激光雷达反演得到的折射指数廓线是间隔为 30 m 的等点廓线,与 Snell 定律成立的前提相符,在求解总偏折角时以求和的方法代替积分形式获得总折射角随目标物高度的变化曲线. 从图 6 可以看出,总偏折角随目标物所在高度位置的升高而加大;在相同大气介质中,探测光与目标定位点之间的总折射角 τ 随视仰角 θ_0 的增加而减小. 当视仰角为 10° 时, 5 km 处总偏折角为 $2.11'$, 8 km 处总偏折角可达 $3.15'$; 当视仰角为 30° 时, 5 km 处总偏折角为 $0.65'$, 8 km 处总偏折角为 $0.98'$. 当视仰角大于 30° 时, 8 km 以下高度总偏折角小于 $1'$, 若系统对定位精度要求不高时可忽略总偏折角的影响.

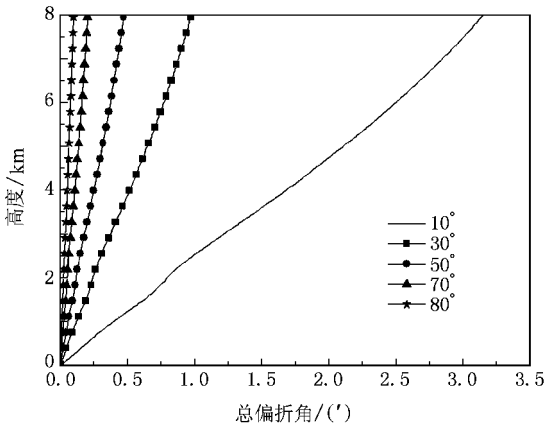


图 6 不同视仰角的总偏折角

图 7 显示了在不同视仰角情况下目标定位点所在高度定位修正值. 可以看出,大气折射率的随机起伏对测量目标点的真实高度影响比较严重. 同时,高度定位修正值随视仰角的增加而减小. 当视仰角为 10° 时,位于 8 km 处的目标点高度定位修正值可达 14.55 m; 当视仰角为 30° 时,相同高度处的定位修正值为 1.19 m; 当视仰角为 80° 时,其高度定位修正值为 0.0025 m,与 10° 视仰角时相比高度修正值约减小至六千分之一.

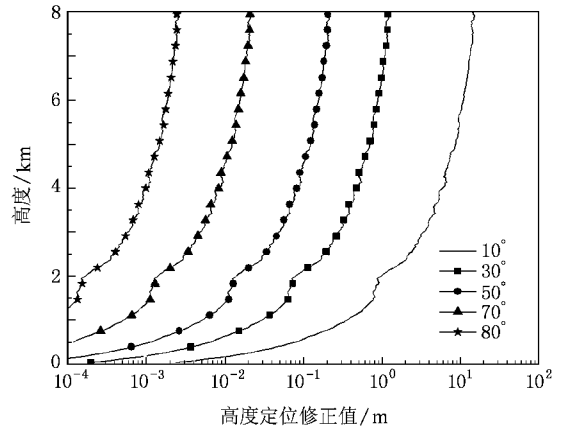


图 7 不同视仰角的高度定位修正值

3.3. 误差分析

目标定位点的总折射角和高度定位修正值与大气折射指数垂直分布密切相关,如果大气折射指数采用理论模型或测量值不能反应大气的真实特性,对于激光定位系统来说不可避免地引入修正误差,从而影响系统的探测精度. 下面主要讨论纯转动拉曼激光雷达方法的系统误差和大气折射指数测量误差对总偏折角和高度定位修正值产生的影响.

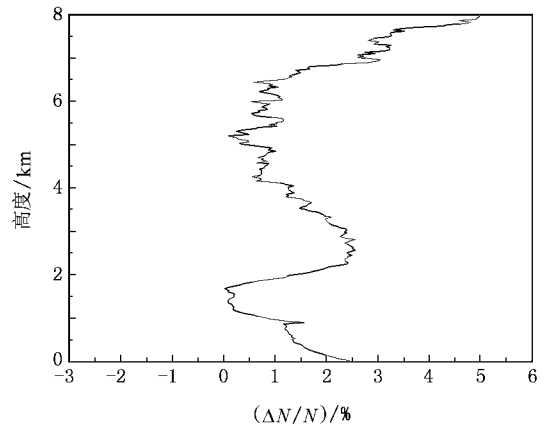


图 8 纯转动拉曼激光雷达系统相对误差图

由 (2) 式可知,大气折射指数是大气温度、大气压强和水汽压强的函数,可以表示为 $N = F(T, P, e)$. 由于大气压强是与温度有关的大气参数,纯转动拉曼激光雷达测量大气折射指数的系统误差可看作是由温度的相对不确定度引起的. 根据误差传递理论,纯转动拉曼激光雷达系统的相对误差 $\Delta N/N$ 随高度变化曲线如图 8 所示. 从中可以看出,纯转动拉曼激光雷达系统的相对误差是比较小的. 7 km 探测高度范

围内系统相对误差小于 3% ,随着探测高度的增加 ,高低量子回波信号信噪比逐渐减小 ,系统不确定度增加 8 km 高度处 ,系统相对误差约为 5%左右.

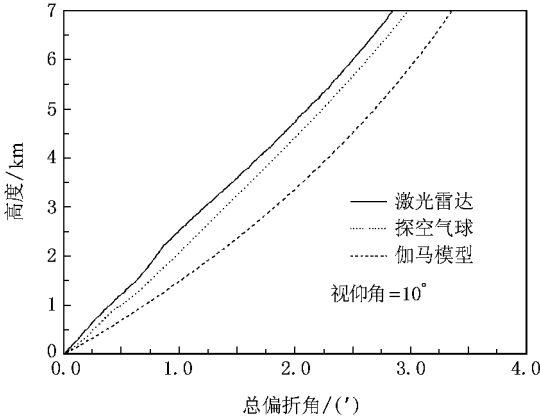


图 9 激光雷达、探空气球与伽马模型的总偏折角

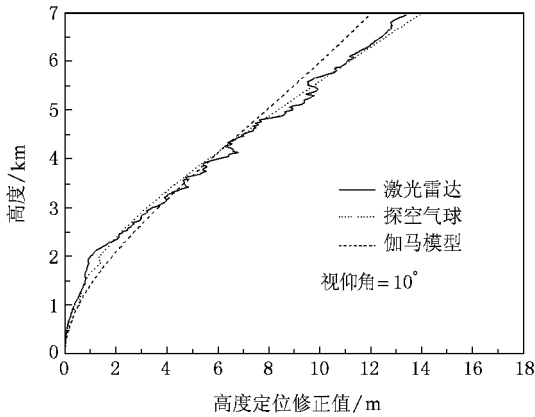


图 10 激光雷达、探空气球与伽马模型的高度定位修正值

图 5 显示了纯转动拉曼激光雷达、探空气球和伽马模型获得的大气折射指数廓线. 10° 视仰角情况下, $0.532 \mu\text{m}$ 的探测光在三种大气介质中传输时,经修正后空中目标物的总偏折角和高度定位修正值分别如图 9 和图 10 所示. 目前,探空气球在各类高空探测仪器中具有较高的测量精度(实验中释放的 GZZ 五九型转筒式探空气球 30 km 以下高度测温精度可以达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$). 相对探空气球来说,纯转动拉曼激光雷达在测量大气折射指数廓线时的偏差导致总偏折角修正误差和高度定位修正误差分别如图 11 和图 12 所示. 从图中可以看出, 10° 视仰角时, 7 km 以下高度两者的总偏折角修正误差和高度定位修正误差最大分别为 $0.20'$ 和 0.65 m . 考虑到探空气球在升过程中存在漂移,纯转动拉曼激光雷达方

法修正目标定位误差时, 7 km 高度范围内总偏折角修正误差和高度定位修正误差约为 $\pm 0.20'$ 和 $\pm 0.65 \text{ m}$. 从图 9 和图 10 可以看出,伽马模型在修正目标定位误差时存在较大的偏差. 对于精密激光定位系统来说,此时大气折射指数理论模型很难满足定位要求,实时探测大气折射指数真实分布是提高定位精度的关键.

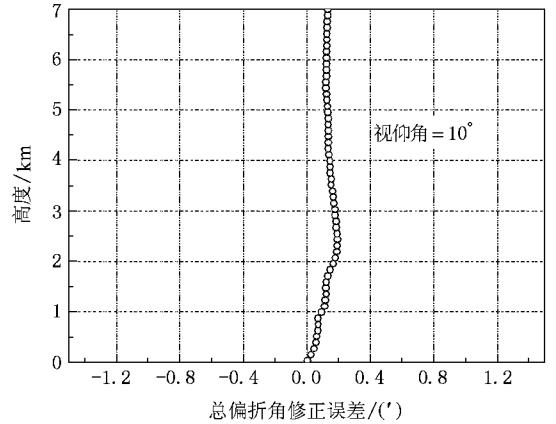


图 11 纯转动拉曼激光雷达与探空气球的总偏折角修正误差

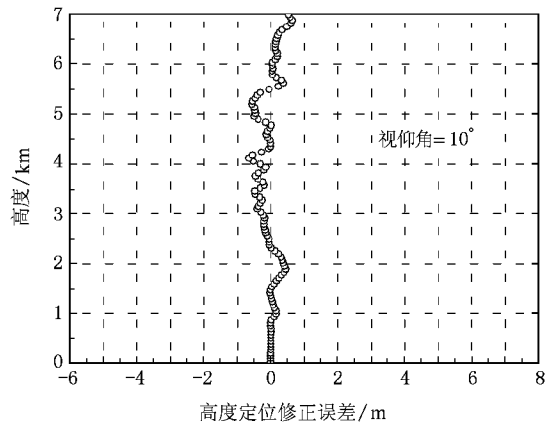


图 12 纯转动拉曼激光雷达与探空气球的高度定位修正误差

4. 结 论

纯转动拉曼激光雷达方法是基于目标定位修正理论上提出的一种修正光波波段(探测光波长限于 $0.532 \mu\text{m}$)目标定位误差的新方法. 此方法可实时、快速地获得大气折射指数廓线,弥补了传统测量方法的局限性和不足. 纯转动拉曼激光雷达在设计过程中的难点问题是分光系统的设计,纯转动拉曼谱线与强的瑞利-米散射光谱相距不过 3 nm,实现两者的有效分离在技术上是比较困难的. 实验中采

用了双光栅单色仪作为分光系统,其抑制比优于 10^{-7} ,可较好地抑制瑞利-米散射信号,得到纯度较高的转动拉曼谱线,使分光精度得到改善.目前,纯

转动拉曼雷达处于实验阶段,我们下一步的工作目标是改进纯转动拉曼激光雷达的光学发射系统和信号接收系统,提高系统的稳定性和探测距离.

- [1] Stephen D H , Dimitri T , Kenneth D , Kenneth D , Paul F 2003 *Proceedings of SPIE* **4884** 149
- [2] Förster J , Riechen J , Biegel G , Fuchs H H , Essen H 2004 *Proceedings of SPIE* , **5572** 281
- [3] Sun G , Weng N Q , Xiao L M , Ma C S , Wu Y 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1 (in Chinese) [孙刚、翁宁泉、肖黎明、马成胜、吴毅 2004 光学学报 **24** 1]
- [4] Rees W G , Roach C M , Glover C H F 1991 *Optical Society of America* **8** 330
- [5] Lye R S , Bufton J L 1977 *Appl. Opt.* **16** 1997
- [6] Gardner C S 1977 *Appl. Opt.* **16** 2427
- [7] Yan H J , Fu Y , Hong Z J 2006 *Modern atmosphere refraction theory* (Shanghai : Shanghai Scientific and Technological Education Press) preface (in Chinese) [严豪健、符养、洪振杰 2006 现代大气折射引论 (上海 : 上海科技教育出版社) 序言]
- [8] Förster J , Riechen J 2006 *Proceedings of SPIE* **6364** 1
- [9] Wu Y H , Hu H L , Hu S X , Zhou J , Zhang M 2000 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **17** 426 (in Chinese) [吴永华、胡欢陵、胡顺星、周军、张民 2000 量子电子学报 **17** 426]
- [10] Song Z F , Ding Q 1987 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **4** 335 (in Chinese) [宋正方、丁强 1987 量子电子学报 **4** 335]
- [11] Wu Y H , Hu H L , Hu S X , Zhou J 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 373
- [12] Song Z F 1990 *Applied atmospheric optics* (Beijing : China Meteorological Press) p2 (in Chinese) [宋正方 1990 应用大气光学基础 (北京 : 气象出版社) 第 2 页]
- [13] Wang S L , Su J , Zhao P T , Cao K F , Hu S X , Wei H L , Tan K , Hu H L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3941 (in Chinese) [汪少林、苏嘉、赵培涛、曹开法、胡顺星、魏合理、谭锐、胡欢陵 2008 物理学报 **57** 3941]
- [14] Arshimov Y F , Bobrovnikov S M , Zuev V E , Mitev V M 1983 *Appl. Opt.* **22** 2987
- [15] Su J , Zhang Y C , Zhao Y F , Liu Y L , Hong G L , Zhao P T , Qu K F , Xie J 2007 *Chinese Journal of Laser* **34** 93 (in Chinese) [苏嘉、张寅超、赵曰峰、刘玉丽、洪光烈、赵培涛、屈凯峰、谢军 2007 中国激光 **34** 93]
- [16] Liang Y G 2000 *Guangxi Physics* **21** 8 (in Chinese) [梁业广 2000 广西物理 **21** 8]

Precise correction for the troposphere target location error based on lidar^{*}

Wang Min^{1,2)†} Hu Shun-Xing¹⁾ Fang Xin^{1,2)} Wang Shao-Lin^{1,2)} Cao Kai-Fa¹⁾
Zhao Pei-Tao^{1,2)} Fan Guang-Qiang^{1,2)} Wang Ying-Jian¹⁾

1) *Centre of Atmospheric Optics, Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 17 September 2008 ; revised manuscript received 16 November 2008)

Abstract

In a laser target positioning system, to correct the location error is essential for improving the measurement precision. In this paper, a novel method of correcting the tropospheric target location error in utilizing pure rotation lidar is presented. The vertical profiles of atmospheric refractive index are deduced by the pure rotation return signals of N_2 and O_2 , which are detected by the pure Raman lidar. Then, the refraction angle and elevation orientation errors at different altitude are corrected based on error correcting theory. The results indicate that the target location error are well corrected by making use of the atmospheric refractive index which is detected by pure rotation lidar. At the same altitude, the target refraction angle and elevation orientation errors decrease as the visual angle increases. When the visual angle is 10° , the refraction angle of the target at 8 km reaches $3.15'$ and the elevation orientation error is 14.55 m. When it is 30° , the refraction angle of the target at the same altitude is only $0.98'$ and the elevation orientation error is 1.19 m.

Keywords : lidar, location error, atmosphere refractivity, atmosphere temperature

PACC : 9265, 4262E

^{*} Project supported by the Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology, China (Grant No. 2007FY110700).

[†] Corresponding author. E-mail : wm810320@mail.ustc.edu.cn