

doi:10.3788/gzxb20184704.0401003

全天时喇曼激光雷达探测大气水汽的技术 实现及分光系统设计

高飞, 雷宁, 黄波, 朱青松, 石冬晨, 汪丽, 王玉峰, 闫庆, 刘晶晶, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要:为实现大气水汽的全天时测量, 选用 Nd:YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励光源, 设计日盲紫外喇曼激光雷达系统. 由于低层大气污染造成的臭氧污染, 通过增加大气氧气的振动喇曼散射信号测量通道, 实时反演近地表臭氧浓度的分布, 为修正激光雷达方程中的臭氧吸收提供解决方案. 同时, 选用高光谱分辨率光栅和窄带宽激光反射镜设计光栅光谱仪作为激光雷达的分光系统. 仿真计算表明, 入射角为 10° 时, 设计的光栅光谱仪可有效分离并提取氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射回波信号, 日盲紫外喇曼激光雷达系统可实现全天时状态下 2 km 高度范围内大气水汽的廓线探测.

关键词:喇曼激光雷达; 大气水汽; 全天时; 臭氧吸收; 光栅光谱仪

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)04-0401003-9

Design of Polychromator and Technical Implementation of Daytime Raman Lidar for Atmospheric Water Vapor Measurement

GAO Fei, LEI Ning, HUANG Bo, ZHU Qing-song, SHI Dong-chen, WANG Li,
WANG Yu-feng, YAN Qing, LIU Jing-jing, HUA Deng-xin

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

Abstract: In order to achieve the water vapor measurement in day and night time, the quadruple frequency of Nd:YAG pulsed laser is selected as the transmitter in the construction of solar-blind Raman lidar. Due to the Ozone pollution in the lower atmosphere, besides the detection of the vibrational Raman signals of nitrogen and water vapor, exmaination of the vibrational Raman signal of oxygen is necessary for retrieving the Ozone concentraiton from the ground to the height of interest, which can be used as the solution for correcting the Raman lidar equation. Meanwhile, the high-resolution grating and tunable laser mirrors are selected to construct the grating spectrometer for the separation of the vibrational Raman signals of oxygen, nitrogen and water vapor. The simulation results show that the vibrational Raman siganls of oxygen, nitorgen and water vapor can be extracted finely when the incident angle of the grating spectrometer is set to be 10 deg, and the solar blind Raman lidar can achieve the water vapor measurement up to the height of 2 km.

Key words: Raman lidar; Water vapor; Daytime; Ozone absorption; Grating spectrometer

OCIS Codes: 010.3640; 280.3640; 010.0280; 230.0250; 040.5250

0 引言

大气水汽含量仅占空气质量的 0.1%~3%, 但它却是大气中时空变化最为活跃的一种气体成分^[1]. 水汽

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41775035, 41627807, 41305023), 中国博士后基金(No. 2014M560799)和陕西省科技计划项目(Nos. 2014KJXX-64, 2014JQ5174)资助

第一作者: 高飞(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术. Email: gaofei@xaut.edu.cn

通讯作者: 华灯鑫(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术. Email: dengxinhua@xaut.edu.cn

收稿日期: 2017-11-15; 录用日期: 2017-12-21

<http://www.photon.ac.cn>

能够强烈吸收红外线,对地面的回波有很明显吸收作用,对温室效应有显著的贡献.水汽的扩散与运动也是地球水循环的重要环节^[2].作为重要的大气气象及物理参数,水汽含量的数据可描述大气精细结构,与气溶胶、云、温度和风场等参量具有相互依存的特性,直接影响天气和气候的变化^[3].因此,实现水汽柱分布特征及时空变化的全天时监测对天气预报、大气运动规律研究和大气模型的建立有重要作用.

激光雷达技术在大气参量的遥感探测方面正扮演越来越重要的角色.差分吸收激光雷达和喇曼激光雷达是大气水汽探测的两种重要激光雷达形式^[4-5].差分吸收激光雷达通过分别探测两条对大气水汽具有强烈吸收和不吸收谱线的回波信号进行大气水汽密度的探测^[6].在此系统中,选择对于水汽具有吸收和不吸收光谱的激光发射器是研究的重点,也是引起系统探测误差的主要原因.而喇曼激光雷达通过同时探测大气中水汽和氮气的振动喇曼散射回波信号进行大气水汽密度的探测^[7].由于氮气是惰性气体,且其分子数随高度的变化恒定,因此选择其作为参考信号.喇曼激光雷达可选择 Nd:YAG 激光器作为光源,因此其在大气水汽探测中应用越来越广泛^[8].在喇曼激光雷达系统建设中,如何精确分离氮气和水汽的振动喇曼散射回波信号并进行探测是系统实现的关键.目前应用在水汽探测中的光谱分离器件主要有光栅、滤光片、棱镜等^[9-11].同时,由于喇曼散射信号非常微弱,在强太阳背景下分离提取极微弱的喇曼散射回波信号非常困难,因此如何实现全天时下的大气水汽探测也是喇曼激光雷达系统研究的关键所在.

为了实现大气水汽时空分布的全天时探测,本文选择 Nd:YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励波长,设计日盲紫外域喇曼激光雷达系统,并利用全息衍射光栅结合窄带宽激光反射镜构建高效率喇曼分光系统,实现米-瑞利散射回波信号以及氮气、氧气和水汽的振动喇曼散射回波信号的高精细分光和高效率提取.

1 喇曼激光雷达探测大气水汽原理

瑞利散射是大气分子散射的主要成分,其散射光子的频率与发射光子的频率相同,因此也称为弹性散射.喇曼散射在大气分子散射中只占有很小的部分,其散射光子的频率与发射光子的频率不同,因此也称为非弹性散射.在非弹性散射—喇曼散射中,分子的量子状态被改变了.喇曼散射的强度与产生振动状态的分子数有关,而喇曼散射的频移 $\Delta\nu$ 是散射分子的特性,即

$$\Delta\nu = \Delta E/hc_0 \quad (1)$$

式中, ΔE 表示振动状态之间的能级差, h 为普朗克常量 ($h = 6.6261 \times 10^{-34}$ Js), c_0 为真空中的光速.

喇曼散射激光雷达主要利用喇曼散射效应.激光雷达发射短脉冲激光射向大气,光与大气中的气体分子发生散射效应.通过建立高光谱分辨率的光学分光系统,高精度分离激光回波信号中氮气分子和水汽分子的振动喇曼散射回波信号,并以氮气分子的振动喇曼散射回波信号作为参考信号,实现大气中水汽分子数密度的精细探测.

2 喇曼激光雷达全天时探测大气水汽的技术实现

2.1 激光雷达激励波长的选择

目前 Nd:YAG 脉冲激光器技术非常成熟,其基波 1 064.1 nm 红外光及其二倍频 532.1 nm 绿光、三倍频 354.7 nm 紫外光已经成为激光雷达发射子系统的主流选择波长.图 1 为不同波长下的太阳光照强度光谱图.从图 1 中可以看出,532.1 nm 可见光的太阳光照强度最强,达到 $2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,而 355 nm 紫外光和 1 064 nm 近红外光的太阳光谱强度虽然有所减弱,但是也分别达到 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 和 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$.然而,当仔细审视此太阳光照强度光谱图时,发现太阳光谱在小于 300 nm 时是无光照强度的,也称其为日

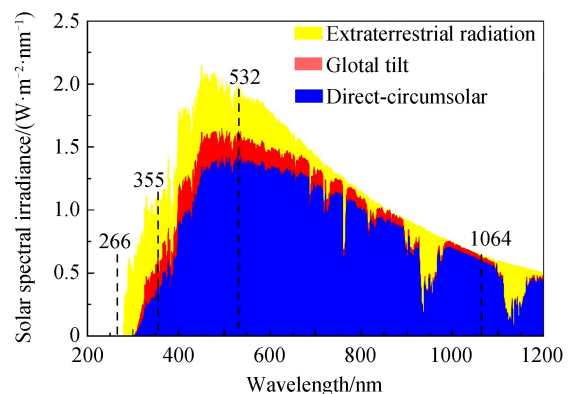


图 1 不同波长下的太阳光照强度光谱图

Fig.1 Solar illumination spectrum at different wavelengths

盲紫外光谱,而 Nd : YAG 激光器的四倍频输出 266.0 nm 正处于日盲紫外光谱范围内.因此为了实现激光雷达的全天时工作,振动喇曼激光雷达系统选用 Nd : YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励波长,以此避免较强的太阳辐射对系统探测所带来的影响.

激励波长 266.0 nm 的日盲紫外脉冲激光射向大气时,会与大气中的气溶胶及大气分子等产生喇曼散射光谱,如图 2.大气分子中氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射光谱波长分别为 277.5 nm,283.6 nm 和 294.6 nm,全部在日盲光谱范围内.因此从原理上讲,选择 Nd : YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励波长,没有太阳背景光的影响,可以实现大气水汽的全天时探测.

2.2 臭氧对日盲紫外波段的吸收

波长小于 300 nm 时太阳光谱的光照强度急剧下降,主要是由于地球大气层的臭氧对紫外线具有很强的吸收作用.因此当选择 Nd : YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励波长时,需要仔细考虑大气层臭氧对激励波长及喇曼散射光谱的吸收作用.图 3 为臭氧在标准大气压和 243 K 温度时波长为 260~300 nm 波段的吸收截面曲线,从图中可以看出,臭氧在喇曼激光雷达激励波长及氧气、氮气和水汽的喇曼散射光谱下的吸收截面分别为 $(9.36 \pm 0.01) \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$, $(4.91 \pm 0.03) \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$, $(2.98 \pm 0.06) \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$ 和 $(0.79 \pm 0.06) \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$.因此日盲紫外域喇曼激光雷达的系统建设必须考虑臭氧吸收对系统探测性能的影响.表 1 为大气氧气、氮气和水汽分子在 266.0 nm 激励波长下产生的振动喇曼散射光谱中心波长及其对应的后向散射截面和臭氧吸收截面.

表 1 激励波长 266.0 nm 下的氧气、氮气和水汽分子的振动喇曼散射波长及其对应的后向散射截面和臭氧吸收截面
Table 1 Central wavelength of Raman spectra at exciting wavelength of 266.0 nm, and its corresponding backscattering cross section and Ozone absorption cross section

Property	Air	O ₂	N ₂	H ₂ O
Frequency shift/cm ⁻¹	0	1 556	2 331	3 654
Wavelength/nm	266.0	277.5	283.6	294.6
Cross section/($\times 10^{-30} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$)	/	12.4	9.71	22.7
Ozone absorption cross section/($\times 10^{-17} \text{ cm}^2 \cdot \text{molecule}^{-1}$)	0.936	0.491	0.298	0.079

2.3 日盲紫外域喇曼激光雷达的大气水汽探测技术

日盲紫外域喇曼激光雷达系统结构如图 4.Nd : YAG 脉冲激光器的四倍频输出 266.0 nm 的窄脉冲激光射向大气,与大气中的氮气、氧气和水汽分子等产生散射效应.大口径卡塞格林望远镜接收后向散射光,并耦合进入光纤后传输到高分辨率的分光系统中.分光系统主要由高分辨率的光栅组成,并将激光雷达后向散射光信号中的米-瑞利散射以及氧气、氮气和水汽分子的振动喇曼散射信号进行光谱分离,经光电倍增管进行光电转换.最后数据记录仪进行数据采集.

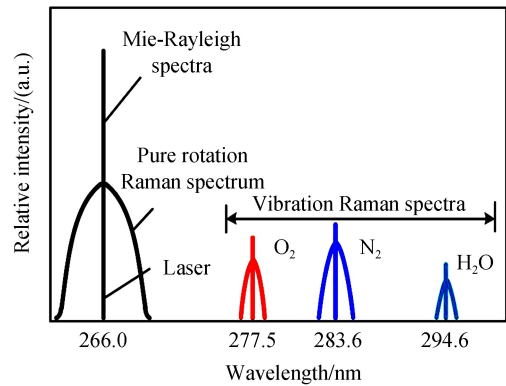


图 2 日盲紫外波段 266.0 nm 激励下的振动-转动喇曼散射光谱

Fig.2 Vibrational-rotational Raman spectra at the exciting wavelength of 266.0 nm

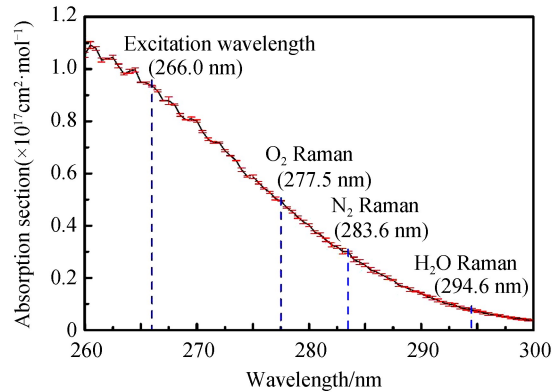


图 3 臭氧吸收截面曲线图,误差棒表示温度变化所产生的臭氧吸收截面变化

Fig.3 Curves of the cross section of Ozone at different wavelengths, the uncertainty presents the variation of cross section of Ozone due to the change of temperature

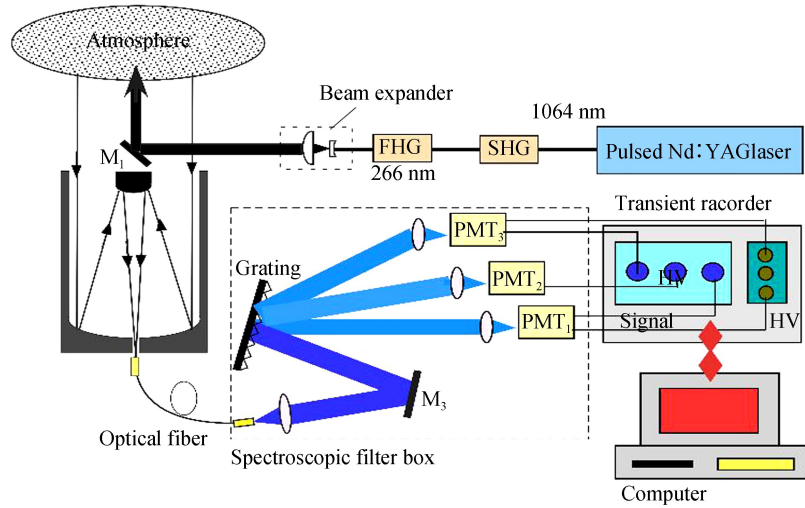


图4 日盲紫外域喇曼激光雷达系统结构
Fig.4 Schematic diagram of the solar-blind Raman lidar

单次散射的激光雷达方程表示为

$$P(r, \lambda_0, \lambda_x) = \frac{K_x Y_x(r)}{r^2} \beta(r, \lambda_0) T_1(r, \lambda_0) T_2(r, \lambda_x) \quad (2)$$

式中, λ_0 表示激光发射波长(266.0 nm), λ_x 表示回程大气散射光谱波长, 对于弹性米-瑞利散射来说, 与激光发射波长相同, 对于氧气、氮气和水汽喇曼散射来说, 分别为 266.0 nm 激励下的氧气、氮气和水汽喇曼散射光谱波长(277.5 nm、283.6 nm 和 294.6 nm). K_x 表示通道 x 的激光雷达系统常数, 包含激光发射功率、望远镜面积、光电倍增管量子效率和系统光学效率等. $Y_x(r)$ 表示通道 x 的激光雷达几何重叠因子. $\beta(r)$ 表示大气后向散射系数, 对于弹性散射信号来说, 包含气溶胶米散射和大气分子瑞利散射两部分 ($\beta(r) = \beta_m(r) + \beta_a(r)$), 对于瑞利散射以及氧气、氮气和水汽喇曼散射来说, 其为大气分子数密度 $N_x(r)$ 与对应分子喇曼散射截面 $d\sigma_x/d\Omega$ 的乘积, 即

$$\beta_x(r, \lambda_0) = N_x(r) \frac{d\sigma_x(\lambda_0, \pi)}{d\Omega} \quad (3)$$

T_1 和 T_2 分别表示激光脉冲射程和回程的大气透过率. 考虑到臭氧对激光脉冲信号的吸收, 大气透过率表示为

$$T_1(r, \lambda_0) = \exp \left\{ - \int_0^r [\alpha(r', \lambda_0) + N_{O_3}(r') \sigma(\lambda_0)] dr' \right\} \quad (4)$$

$$T_2(r, \lambda_x) = \exp \left\{ - \int_0^r [\alpha(r', \lambda_x) + N_{O_3}(r') \sigma(\lambda_x)] dr' \right\} \quad (5)$$

式中, α 为大气消光系数, 包含气溶胶和大气分子两部分贡献 ($\alpha(r) = \alpha_m(r) + \alpha_a(r)$). $N_{O_3}(r)$ 为 O_3 的体积浓度(绝对量: 单位体积的分子个数), $\sigma(\lambda_x)$ 为 O_3 对相应激光波长 λ_x 的吸收截面. 由于臭氧的吸收作用, 激光雷达方程中大气透过率会有所降低, 因此当选择日盲紫外光作为激励光源时, 激光雷达各通道的激光回波信号强度都有不同程度的减弱, 从而影响系统探测性能, 尤其是探测高度. 可以说, 臭氧是日盲紫外域喇曼激光雷达探测大气水汽的绝对干扰.

大气中臭氧浓度的测量可采用喇曼差分法实现^[12], 也就是通过同时测量 266.0 nm 激光激发的大气氮气和氧气分子的振动喇曼散射光谱信号来反演得到, 即

$$N_{O_3}(r) = \frac{1}{\Delta\sigma_{O_3}} \frac{d \ln [N_{N_2}(r) P_{O_2}(r) / N_{O_2}(r) P_{N_2}(r)]}{dr} \frac{\alpha(\lambda_{N_2}, r) - \alpha(\lambda_{O_2}, r)}{\Delta\sigma_{O_3}} \quad (6)$$

式中 $N_{N_2}(r)$ 和 $N_{O_2}(r)$ 分别为大气中氮气和氧气的分子数密度, $P_{N_2}(r)$ 和 $P_{O_2}(r)$ 分别为激光雷达所接收的氮气和氧气振动喇曼散射信号的强度, $\alpha(\lambda_{N_2}, r)$ 和 $\alpha(\lambda_{O_2}, r)$ 分别为氮气和氧气振动喇曼光谱下的大气消光系数, $\Delta\sigma_{O_3} (= \sigma(\lambda_{N_2}) - \sigma(\lambda_{O_2}))$ 表示臭氧在氮气和氧气喇曼散射光谱(283.6 nm 和 277.5 nm)下的吸收截面差. 从传统意义上来说, 喇曼激光雷达测量大气水汽, 仅需要选择氮气和水汽的振动喇曼光谱信号即

可实现大气水汽混合比的测量^[13].然而,当选用日盲紫外光 266.0 nm 作为激励光源时,需要得到实时的臭氧浓度廓线数据,因此日盲紫外域喇曼激光雷达探测大气水汽至少需要三个测量通道,即需要同时测量大气氧气、氮气和水汽分子的振动喇曼散射回波信号,如图 4.

臭氧是地球大气中一种微量气体,是大气中氧分子受太阳辐射分解成氧原子后,又与周围的氧分子结合而形成的具有 3 个氧原子的分子气体.大气中 90% 以上的臭氧存在于离地表 10~50 km 的大气层上部或平流层内,成为大气臭氧层.随着人类活动的发展,汽车和工业排放的增加,地面臭氧污染在欧洲、北美、日本以及我国的许多城市中成为普遍现象,近地面大气臭氧层也是影响我国空气质量的主要污染物^[14].为了讨论臭氧对大气回波信号的干扰,根据测量对象选为对流层内大气水汽分布以及空气污染物主要存在于大气边界层内的情况,建立了如图 5(a)所示的臭氧浓度分布廓线,即 0~5 km 臭氧浓度为 30 PPb,而 5~10 km 臭氧浓度为 5 PPb.基于此模型计算得到的臭氧对激光雷达双程透过率的影响如图 5(b)所示.波长越长,臭氧吸收截面越小(表 1),因此日盲紫外波的米-瑞利散射信号相比氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号对大气透过率的影响要大得多.

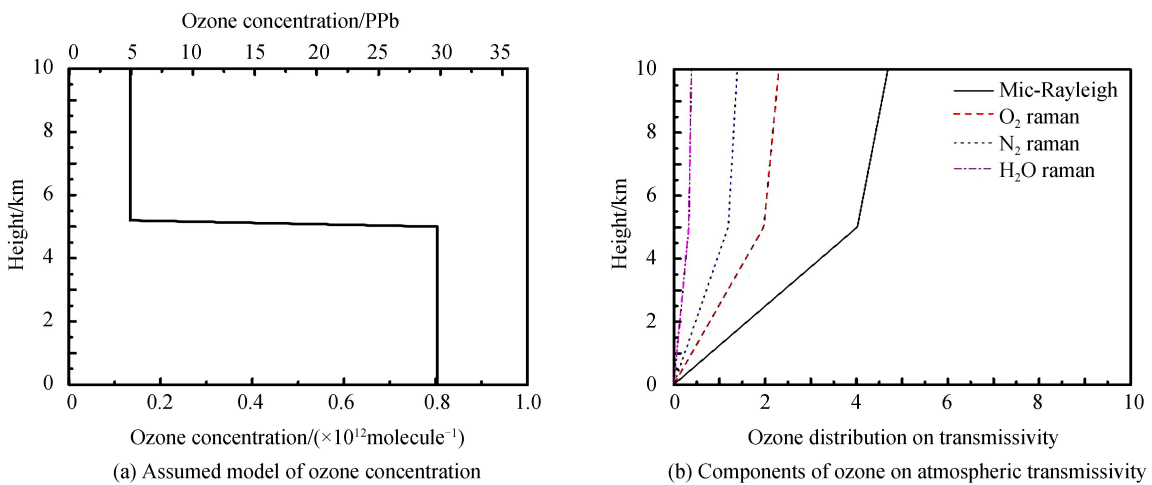


图 5 臭氧对大气透过率的影响
Fig.5 Effect of Ozone on atmospheric transmissivity

在选择日盲紫外光 266.0 nm 作为喇曼激光雷达的激励光源时,大气双程透过率不仅需要考虑气溶胶和大气分子的消光影响,还要考虑臭氧的吸收作用.图 6 分别为在美国标准大气模型和臭氧浓度分布模型(图 5)下的有无臭氧吸收的大气射程/回程透过率.从图 6 可以看出,臭氧对大气透率的影响还是非常大的.

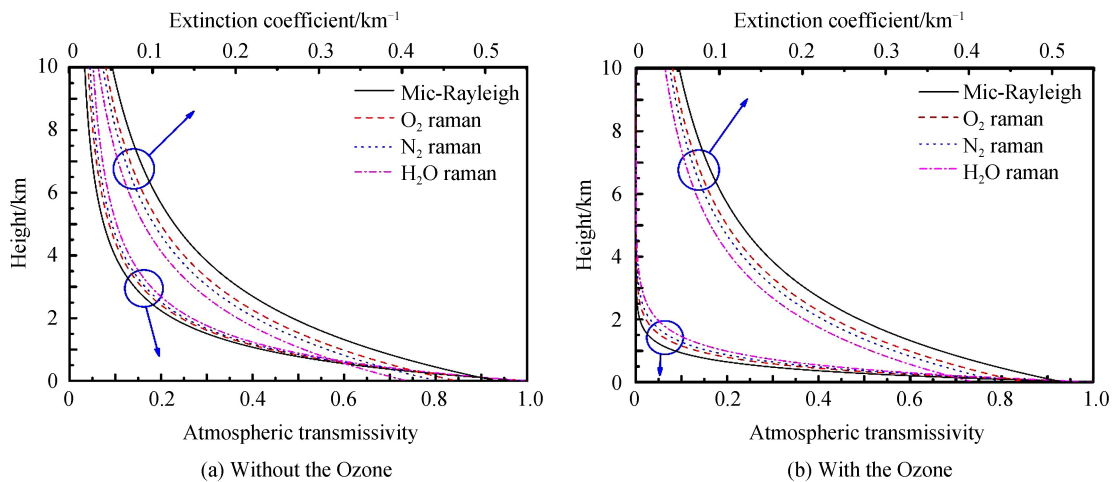


图 6 激励波长 266.0 nm 下的大气透过率
Fig.6 Atmospheric transmissivity at the laser wavelength of 266.0 nm

3 日盲紫外喇曼光谱的分离提取

如何高精度分离提取激光雷达回波中的大气氧气、氮气和水汽分子的振动喇曼散射光谱信号是喇曼激光雷达建设的重点,因此分光系统是系统建设的核心.窄带干涉滤光片、法布里-珀罗标准具、光栅等都是激光雷达常用的光谱分离器件^[15-17].考虑到带宽及透过率的问题,系统选择高光栅作为日盲紫外域喇曼激光雷达分光系统的关键光学器件.

3.1 高光栅分光系统的设计

为了高精度分离激光雷达回波信号中的氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射光谱信号,系统借鉴测量大气气溶胶的紫外域喇曼激光雷达的系统建设经验^[17],选用高光栅分辨率光栅和窄带宽激光反射镜,设计日盲紫外域喇曼激光雷达的分光系统,如图7.望远镜接收的激光雷达回波混合光谱信号经光纤传输并经透镜准直后,以一定的入射角入射到光栅上,发生一级衍射.由于氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射光谱信号的波长不同,根据光栅方程可知,在入射角一定的情况下,三者谱线的衍射角具有较大的差异,能够实现光谱的分离.系统还选用两个窄带宽激光反射镜构成一个高效率窄带带通滤波器,以进一步净化和提取氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号.因此,从某种意义上来说,日盲紫外域喇曼激光雷达的分光系统为一台光栅光谱仪.

3.2 光栅入射角的选择及光谱带宽的确定

对于平面衍射光栅来说,由于干涉零级主极大与单缝衍射主极大重合,零级主极大占有很大一部分能量.而且当垂直入射平面反射光栅时,其零级条纹垂直反射回来,会对入射光产生影响.因此必须选择合适的入射角度,使其既可以以光谱的形式分离激光大气回波信号的各成分(米-瑞利散射以及氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号),又要使得各光谱之间相互无影响,尤其是减小零级主极大对光路的影响.图8(a)为大气回波信号各成分的衍射角随光栅入射角的变化情况,图8(b)为氧气、氮气和水汽振动喇曼散射信号的一级衍射光谱与米-瑞利散射信号的一级衍射光谱之间的角色散情况.为了尽可能地把各光谱分离,应使得角色散越大越好.系统选择入射角为 10.0° ,即 0.174rad .通过计算,可以得到此时各光谱的衍射角:米-瑞利散射一级光谱衍射角为 51.6° ,氧气的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 55.6° ,氮气的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 57.9° ,水汽的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 62.5° .

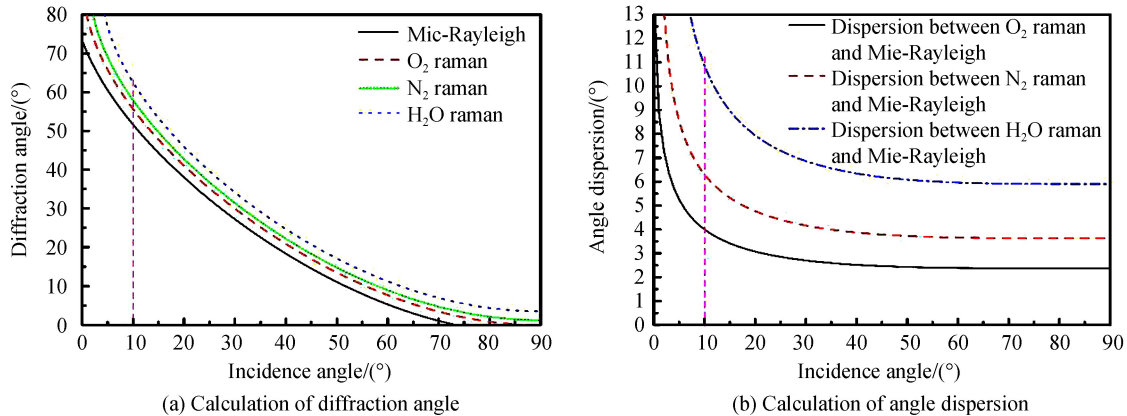


图8 光栅衍射角和角色散特性的计算

Fig.8 Calculation of diffraction angle and angle dispersion of grating

色散、分辨率和带宽都是衡量光栅光谱仪分离光谱能力的重要指标.其中色散包括角色散 $d\theta/d\lambda$ 和线色

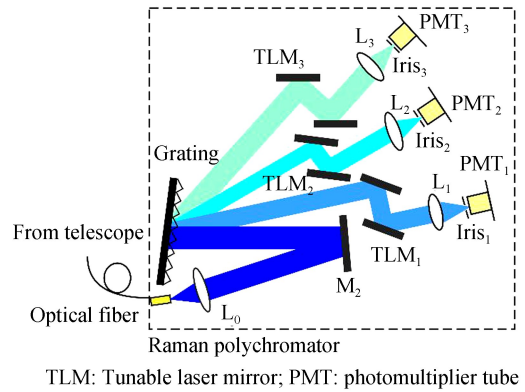


图7 日盲紫外波段喇曼激光雷达的分光系统

Fig.7 Polychromator of the solar-blind Raman lidar

散 $dl/d\theta$, 其计算公式为

$$\frac{dl}{d\theta} = f \cdot \frac{d\theta}{d\lambda} = f \cdot \frac{m}{d \cos \theta} \quad (6)$$

式中, m 为衍射光谱级次, d 为光栅常数, f 为透镜焦距, θ 为衍射角. 显然, 长焦距物镜的选择会使得不同波长的光分得更开一些. 系统选择焦距为 100.0 mm 的平凸透镜作为聚焦透镜, 对于氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号来说, 其线色散可分别达到 6.38×10^5 、 6.78×10^5 和 7.79×10^5 . 光栅光谱仪的分辨率表示分开两条临近谱线的能力, 其结果为光谱级次和光栅有效总刻痕数的乘积. 对于本系统来说, 光纤传输望远镜接收的激光回波信号经平凸透镜 ($f=100.0$ mm, $d=25.4$ mm) 准直后, 光斑有效直径约为 20 mm, 所以光栅的有效总刻痕数为 $20 \times 3\ 600 = 7.2 \times 10^4$, 计算得到光栅光谱仪的分辨力 $\Delta\lambda$ 为 3.7 pm. 带宽是在忽略光学像差、衍射、扫描方法、探测器像素宽度、狭缝高度和照明均匀性等因素后, 从光谱仪输出的给定波长的波长宽度, 在数值上是线色散的倒数和狭缝宽度的乘积. 图 9 为系统设计的光栅光谱仪带宽随小孔光阑孔径的变化趋势 (从 0 mm 到 12 mm 发生变化). 从图 9 可以看出, 此光谱仪的带宽可在 0~20.7 nm 之间变化. 为了分离激光大气回波信号中的氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号, 在不影响激光回波信号强度的前提下, 尽可能减小光阑口径, 降低其他噪音信号的干扰. 经综合考虑, 本系统选择小孔光阑口径为 2 mm, 其对应带宽为 3.5 nm.

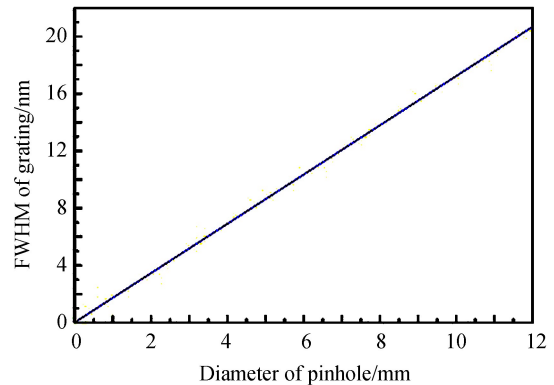


图 9 光栅光谱仪带宽随小孔光阑孔径的变化趋势
Fig.9 Variation of bandwidth of grating with the diameter of pinhole

4 讨论

大气水汽的探测无论采用差分吸收法还是喇曼光谱法都要遭受太阳光的影响, 使得现有探测技术基本上只能在夜间进行. 而日盲紫外喇曼激光雷达技术就是为解决大气水汽的全天时探测需求而提出来的. 从原理上讲, Nd: YAG 脉冲激光器四倍频输出 266.0 nm 激励所产生的米-瑞利弹性散射信号以及氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射回波信号全部都位于日盲紫外光谱范围内, 因此日盲紫外喇曼激光雷达能够实现大气水汽的全天时探测. 然而, 相比于激励波长为 354.7 nm 的紫外域喇曼激光雷达系统来说, 日盲紫外域喇曼激光雷达尽管不需要遭受太阳背景光的影响, 却受到臭氧吸收的影响. 因此, 从夜晚测量来说, 毋庸置疑是激励波长为 354.7 nm 的喇曼激光雷达会更好些; 而白天的测量, 需要对激光雷达系统进行仔细分析研究, 是太阳背景光对激光雷达探测性能影响更大还是臭氧吸收的影响更大, 这将是课题组下一步的工作.

由于日盲紫外喇曼激光雷达的光谱范围为 250~300 nm, 因此需要对激光器、望远镜、光学分光系统以及光电转换系统进行仔细的选择与设计, 使得其能够满足日盲紫外波段的使用要求. 表 2 为所设计的激光雷达系统参数. 为验证日盲紫外域喇曼激光雷达的探测性能, 系统选用标准大气模型和前面假设的臭氧浓度廓线数据, 分别计算得到了紫外域喇曼激光雷达各通道所接收到的激光回波信号强度以及信噪比, 如图 10. 同时为计算方便, 水汽含量占空气的比重为恒定的 0.3%. 从仿真结果可以看出, 由于氮气的分子数密度最大, 其振动喇曼散射回波信号的强度要远大于氧气和水汽的振动喇曼散射回波信号. 同时由于臭氧吸收的影响,

表 2 日盲紫外喇曼激光雷达系统参数

Table 2 Specifications of the solar-blind Raman lidar

Parameter		Value	Parameter		Value
Transmitter Nd: YAG pulsed laser	Wavelength	266.0 nm	Receiver cassegrain telescope	Diameter	400 mm
	Repetition frequency	10 Hz		Focal length	3 000 mm
	Pulse energy	150 mJ		Field of view	0.2 mrad
Grating spectrometer	Groove number	3 600 gr/mm	Detector PMT (Hamamatsu R7154)	Quantum efficiency	0.23
	Bandwidth of TLM	10 nm		Gain	1.0×10^7

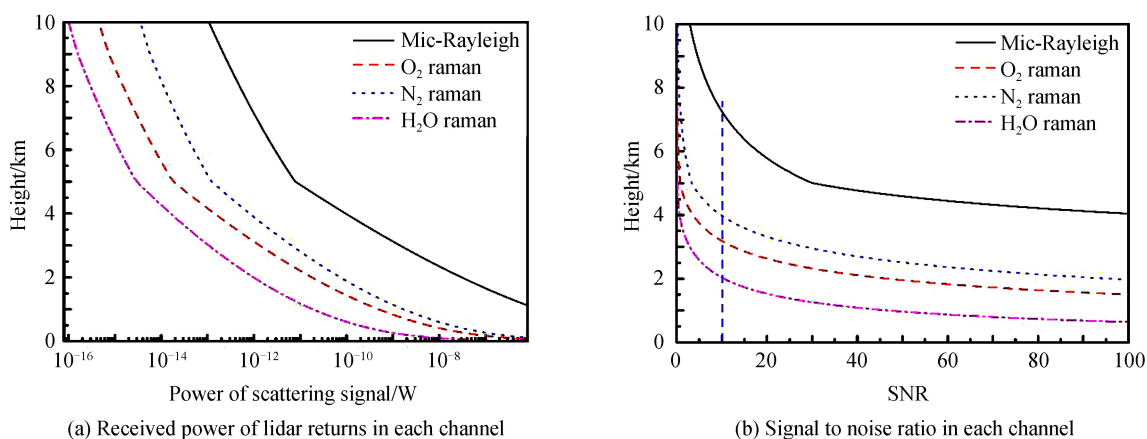


图 10 日盲紫外喇曼激光雷达系统仿真
Fig.10 Simulation of the solar-blind Raman lidar

系统可探测水汽高度(SNR>10)不是很高,仅有 2.0 km,因此系统还存在很大的优化空间。

5 结论

喇曼激光雷达分别利用氮气和水汽的振动喇曼散射回波信号可实现大气水汽廓线的测量.为实现大气水汽的全天时探测需求,选用日盲紫外光 266.0 nm 作为激励光源.然而由于汽车和工业排放等造成的近地表臭氧污染,臭氧吸收是日盲紫外喇曼激光雷达应用最主要的干扰.在激光雷达分光系统中,增加大气氧气的振动喇曼散射信号测量通道,以实时反演近地表臭氧浓度的分布,进而修正激光雷达方程中的臭氧吸收,提高探测精度.计算表明,尽管臭氧吸收截面随波长的增大而减少,但是对喇曼激光雷达中的氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射信号都具有较大的影响,进而影响激光雷达的探测性能。

日盲紫外域喇曼激光雷达系统选用高光谱分辨率光栅和窄带宽反射镜来设计高光谱的光栅光谱仪,以高精度地分离氧气、氮气和水汽的振动喇曼散射光谱.系统选择入射角为 10.0° ,经计算得到米-瑞利散射一级光谱衍射角为 51.6° ,氧气的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 55.6° ,氮气的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 57.9° ,水汽的振动喇曼散射一级光谱衍射角为 62.5° .光栅光谱仪的线色散可达到 6.38×10^5 ,分辨力 $\Delta\lambda$ 达到 3.7 pm,带宽达到 3.5 nm,能够满足系统测量的需求.系统仿真结果表明,设计的日盲紫外喇曼激光雷达系统可实现 2 km 高度范围内全天时大气水汽的垂直廓线测量。

参考文献

- [1] XIE Chen-bo, ZHOU Jun, YUE Gu-ming, *et al.* New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Acta Optiac Sinica*, 2006, **26**(9): 1281-1286.
谢晨波, 周军, 岳古明, 等. 新型车载式喇曼激光雷达测量对流层水汽[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1281-1286.
- [2] SHINE K P, SINHA A. Sensitivity of the Earth's climate to height dependent changes in the water vapwe mixing ration [J]. *Nature*, 1991, **354**(6352): 382-384.
- [3] WANG Yu-feng, GAO, Fei, HUA Deng-xin, *et al.* Raman Lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Optiac Sinica*, 2015, **35**(03): 378-387.
王玉峰, 高飞, 华灯鑫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的喇曼激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2015, **35**(03): 378-387.
- [4] BOSENBERG J. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: methodology[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**: 3845-3860.
- [5] GOLDSMITH J E M, FOREST H B, SCOTT E B, *et al.* Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aero sols[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(21): 4979-4990.
- [6] GE Ye, SHU Rong, HU Yi-hua, *et al.* System design and performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(20): 203-210.
葛焯, 舒嵘, 胡以华, 等. 大气水汽探测地基差分吸收激光雷达系统设计与性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, **63**(20): 203-210.
- [7] MATTIS I, ANSMANN A, ALTHAUSEN D, *et al.* Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**: 6451-6462.
- [8] DIONISI D, KECKHUT P, COURCOUX Y, *et al.* Water vapor observations up to the lower stratosphere through the

- Raman lidar during the Maïdo lidar calibration campaign[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(3): 1425-1445.
- [9] WANG Yu-feng, HUA Deng-xin, MAO Jian-dong, *et al.* A detection of atmospheric relative humidity profile by UV Raman lidar[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, **112**(2): 214-219.
- [10] LI Tao, QI Fu-di, ZHOU Jun, *et al.* Raman lidar system for measurement of water vapor mixing ratio in the atmosphere.[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, **24**(06): 843-854.
李陶, 戚福第, 周军, 等. 大气中水汽混合比的 Raman 激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2000, **24**(06): 843-854.
- [11] WANG Shao-lin, CAO Kai-fa, TAO Zong-ming, *et al.* Study for an optical splitting system of water vapor ultraviolet Raman lidar[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(08): 1171-1175.
汪少林, 曹开法, 陶宗明, 等. 水汽紫外喇曼激光雷达分光系统研究[J]. *光电子.激光*, 2010, **21**(08): 1171-1175.
- [12] WANG Shao-lin, XIE Jun, CAO Kai-fa, *et al.* Monitoring O₃ in atmosphere by Raman-differential absorption method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35** (5): 739-743.
汪少林, 谢军, 曹开法, 等. 喇曼差分法探测大气中的臭氧[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 739-743.
- [13] WHITEMEN D N, MELFI S H, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Applied. Optical*, 1992, **31**(16): 3068-3082.
- [14] LI G, BEI N, CAO J, *et al.* Widespread and persistent ozone pollution in Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, **17**(4): 1-39.
- [15] HAMMANN E, BEHRENDT A, MOUNIER F L, *et al.* Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD(CP)2 observational prototype experiment[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, **15**(5): 2867-2881.
- [16] HUA Deng-xin, KOBAYASHI T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar by use of a multicavity Fabry-Perot filter for accurate temperature profiling of the troposphere[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(30): 6474-6478.
- [17] GAO Fei, SONG Xiao-quan, HUA Deng-xin, *et al.* Ultraviolet Raman lidar for high-accuracy profiling of aerosol extinction coefficient [J]. *Chinese Optical Letters*, 2009, **7**(2): 95-97.