

紫外域波长选择对全天时水汽拉曼激光雷达探测性能的影响

石冬晨, 华灯鑫*, 黄波, 雷宁, 高飞

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 Nd:YAG 激光器三倍频输出的 354.7 nm 光和四倍频输出的 266.0 nm 光都位于紫外波段, 都可作为水汽拉曼激光雷达的激励光源; 从水汽拉曼激光雷达系统的实际建设出发, 分别从后向散射系数、消光系数、大气透过率、臭氧吸收和太阳背景噪声等方面对激光雷达系统的探测性能进行分析, 探讨 354.7 nm 和 266.0 nm 激光光源对拉曼激光雷达开展全天时大气水汽探测的影响。结果表明: 在水汽探测中, 266.0 nm 及其对应的氧气、氮气和水汽拉曼波长均位于日盲紫外区内, 不受太阳背景噪声的影响, 但会受到臭氧吸收的影响; 354.7 nm 波段无臭氧吸收, 但会受到太阳背景噪声的影响; 在分光系统参数一致的情况下, 激光雷达系统选用 266.0 nm 波段激光光源时, 白天水汽的有效探测距离为 2.7 km, 选用 354.7 nm 波段激光光源时, 有效探测距离仅为 0.6 km; 日盲紫外波长的选择可有效提高白天水汽拉曼激光雷达的探测距离, 实现水汽的全天时探测。

关键词 遥感; 水汽探测; 紫外波长选择; 拉曼激光雷达; 全天时测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1228003

Influence of Ultraviolet Wavelength Selection on Detection Performance of All-Day Water Vapor Raman Lidar

Shi Dongchen, Hua Dengxin*, Huang Bo, Lei Ning, Gao Fei

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

Abstract The third and fourth harmonic outputs at 354.7 nm and 266.0 nm for Nd:YAG pulsed laser are both within the ultraviolet wavelength band, and can be selected as the pump sources of a water vapor Raman lidar. Based on the practical construction of a water vapor Raman lidar system and from the aspects of backscattering coefficients, extinction coefficients, atmospheric transmissivity, ozone absorption and background noises, the detection performances of this lidar system are analyzed. The effects of the 354.7 nm and 266.0 nm laser sources on the daytime water vapor detection by this Raman lidar are investigated. The results show that the 266.0 nm laser and its corresponding vibrational Raman wavelengths of oxygen, nitrogen, and water vapor are all within the blind ultraviolet region, not affected by the solar background noise but affected by the ozone absorption. At 354.7 nm, there is no ozone absorption, but it is still influenced by the solar background noises. When the parameters for this wavelength selector system are kept the same, the effective detection range of daytime water vapor obtained by the designed Raman lidar is 2.7 km when the 266.0 nm is selected as the transmitter wavelength. In contrast, if 354.7 nm is selected, the effective detection range is only 0.6 km. The solar blind ultraviolet wavelength selection can effectively increase the detection range of daytime water vapor by Raman lidar and ensure the realization of all-day water vapor detection.

Key words remote sensing; water vapor detection; ultraviolet wavelength selection; Raman lidar; all-day detection

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 230.0250

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-07-22; 录用日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(41627807, 41775035)、中国博士后基金(2014M560799)、陕西省科技计划(2014KJXX-64)

* E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

1 引 言

水汽在大气中的含量及垂直分布特性与大气动力学、大气化学、气象学、全球水文循环等大气过程密切相关^[1-4]。大气中水汽含量的监测对大气环境和人类生产、生活具有重要意义。水汽拉曼激光雷达探测是近几年发展起来的一种新颖的水汽探测技术,发射波长多为 532.1 nm 的绿光或 354.7 nm 的紫外光。由于拉曼散射强度与激励波长的 4 次方成反比,所以发射波长越短,探测就越具有优势,因此紫外域 354.7 nm 拉曼激光雷达成为近年来最有效的水汽探测工具之一。国内外许多学者对 354.7 nm 波段拉曼激光雷达水汽探测进行了深入研究,成功研制了多台气象观测激光雷达系统,实现了多数地区夜间大气温湿度廓线的高精度探测^[5-7]。然而振动拉曼信号非常微弱,易淹没于白天的太阳背景噪声中,354.7 nm 激励波段白天仍会遭到少量太阳背景噪声的影响,因此多在夜间探测,故而白天利用 354.7 nm 激励波段实现水汽拉曼激光雷达探测的探讨较少。

波长为 220~280 nm 的紫外波段属于日盲区,该波段的光波几乎被大气层中的臭氧层完全吸收,故而该波段白天在对流层中不受太阳辐射噪声的影响,266.0 nm 波段属于日盲区波段,可以考虑作为白天水汽拉曼激光雷达探测技术的激励波长。虽然国外学者对日盲区水汽探测已有探讨,但由于臭氧对日盲区的衰减以及分光器件参数受限等,该方面的研究尚不成熟。2000 年,de Tomasi 等^[8]将 Nd:YAG 激光器的四倍频输出 266.0 nm 作为激励波长进行水汽的拉曼激光雷达探测,由于带宽为 0.5 nm 的窄带干涉滤光片(IF)透过率仅为 25%,因此水汽的探测距离很小。2014 年,Uesugi 等^[9]利用 Nd:YAG 激光器的四倍频输出 266.0 nm 为发射波长,以直径为 350 mm 的望远镜为接收器,搭建拉曼测量系统来反演大气水汽,探测高度约为 1.4 km,水汽探测相对误差小于 15%。目前,国内几乎没有关于日盲区白天水汽拉曼激光雷达探测的研究。因此,探讨不受太阳背景噪声影响的日盲紫外波段作为水汽拉曼激光雷达的激励光源,对实现拉曼激光雷达全天时大气水汽探测具有重要意义。

为破解全天时水汽拉曼激光雷达白天探测的困境,本文从水汽拉曼激光雷达系统的实际建设出发,选择 Nd:YAG 激光器三倍频输出的 354.7 nm 光和四倍频输出的 266.0 nm 光作为激励光源,研究紫外

域波长的选择对全天时水汽拉曼激光雷达探测性能的影响。从后向散射系数、消光系数、大气透过率、臭氧吸收、太阳背景噪声强度等方面详细分析与仿真两种紫外波段对水汽拉曼激光雷达探测系统性能的影响,以期实现高性能拉曼激光雷达全天时水汽探测。

2 拉曼激光雷达水汽探测原理

当激光射入大气时,光与气体分子发生散射效应,大气中的氮气、氧气、水汽的后向散射光谱如图 1 所示,其中,λ₀ 为激励波长,λ_k (k = N₂, O₂, H₂O) 为回程大气拉曼散射波长。氮气是稀有气体,在空气中的含量比较稳定(体积分数约为 78%),基本不随高度而变,因此在大气水汽探测中,通常选择氮气的振动拉曼散射回波信号作为参考信号。而水汽的振动拉曼散射回波信号与水汽的分子数密度相关,将其作为测量信号,通过对比水汽和氮气的振动拉曼散射回波信号就可实时反演水汽含量的时空廓线分布^[10-12]。

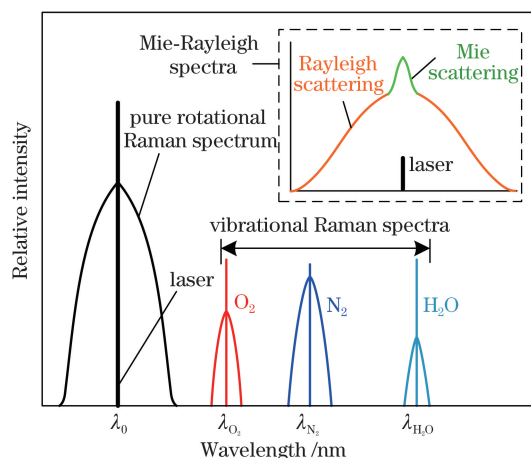


图 1 大气后向散射信号光谱

Fig. 1 Spectrum of atmospheric backscattering signal

氮气、水汽等通道在探测高度 z 处的振动拉曼激光雷达回波信号^[13] 为

$$P(z, \lambda_0, \lambda_k) = \frac{S(\lambda_k)O_k(z)}{z^2} \beta(z, \lambda_k) T_1(z, \lambda_0) \times T_2(z, \lambda_k) + P_b(\lambda_k), k = N_2, O_2, H_2O, \quad (1)$$

式中: S 为激光雷达系统常数; O_k 为通道 k 的激光雷达几何重叠因子,它们仅与激光雷达参数相关,为雷达项; β 为拉曼后向散射系数; T_1 和 T_2 分别为激光脉冲射程和回程的大气透过率,它们仅与大气参数相关,为大气项; P_b 为回程信号中掺杂的太阳背景噪声。

水汽混合比是探测大气湿度的关键物理量,是

给定探测高度 z 处同一体积内的水汽质量与干空气质量之比^[14],即

$$\omega(z) = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}}(z) M_{\text{H}_2\text{O}}}{N_{\text{dry}}(z) M_{\text{dry}}}, \quad (2)$$

式中: $N_{\text{dry}}(z)$ 与 $N_{\text{H}_2\text{O}}(z)$ 分别为高度 z 处干空气与水汽的分子数密度,可用约为 87% 的 N_2 的分子数密度 $N_{\text{N}_2}(z)$ 来代替 $N_{\text{dry}}(z)$; M_{dry} 与 $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 为已知的干空气与水汽的相对分子质量。假设激光雷达各通道系统常数重叠因子近似相等,利用(1)式求得氮气、水汽两通道振动拉曼回波信号后,就可反演出水汽混合比,即

$$W_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0.485 \frac{P(z, \lambda_0, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}) d\sigma(\lambda_{\text{N}_2}) / d\Omega}{P(z, \lambda_0, \lambda_{\text{N}_2}) d\sigma(\lambda_{\text{H}_2\text{O}}) / d\Omega} \times \Delta\tau(\lambda_{\text{N}_2}, \lambda_{\text{H}_2\text{O}}, z), \quad (3)$$

式中: P 为氮气、水汽等通道在探测高度 z 处的振动拉曼激光雷达回波信号; $d\sigma/d\Omega$ 为拉曼通道气体分子的拉曼后向散射截面; $\Delta\tau$ 为大气透过率修正项,根据所选发射波长不同, $\Delta\tau$ 略有不同。

在激光雷达探测过程中,系统的探测误差反比于系统的信噪比,而信噪比取决于各通道光电流对应的光子数^[15],当光电倍增管(PMT)在高灵敏度光子计数模式下工作时,光电探测器在采样时间间隔 Δt 内接收的各通道回波信号光子数 n_s 为

$$n_s(z, \lambda_0, \lambda_k) = \frac{\eta(\lambda_k) \lambda_k}{hc} P(z, \lambda_0, \lambda_k) \Delta t, \quad (4)$$

式中: $\eta(\lambda_k)$ 为光电探测器在波长 λ_k 处的量子效率; h 为普朗克常量 ($6.626276 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$); c 为光速。根据信噪比的定义,水汽拉曼探测系统各通道的信噪比为

$$r_{\text{SNR}}(z, \lambda_0, \lambda_k) = \frac{n_s(z, \lambda_0, \lambda_k) \sqrt{N}}{\sqrt{n_s(z, \lambda_0, \lambda_k) + n_e(z, \lambda_0) + 2[n_b(z, \lambda_k) + n_d]}}, \quad (5)$$

式中: N 为发射激光累积脉冲数; n_e 为通道中透过

的米-瑞利弹性散射光子数; n_b 为通道中的太阳背景噪声光子数; n_d 为探测器的暗电流光子数。

3 波长选择对紫外域水汽拉曼激光雷达探测性能的影响

Nd:YAG 脉冲激光器是大气探测激光雷达的主要激励光源,可提供基波 1064.1 nm 红外光、二倍频 532.1 nm 绿光、三倍频 354.7 nm 紫外光和四倍频 266.0 nm 日盲紫外光^[16]。考虑到大气分子散射强度与波长的 4 次方成反比,紫外光在大气水汽探测中占有优势;同时考虑到太阳光谱的分布特征,354.7 nm 紫外光的背景噪声为 $0.4685 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$, 266.0 nm 属于日盲紫外光波段,无太阳背景噪声^[17]。因此,本研究从水汽拉曼激光雷达系统的实际建设出发,分析紫外域光谱中 354.7 nm 紫外光和 266.0 nm 日盲紫外光作为激励光源的探测优势。

3.1 激励波长对拉曼后向散射光谱强度的影响

拉曼激光雷达回波散射信号中的拉曼后向散射系数 β 为

$$\beta(z, \lambda_k) = N_k(z) d\sigma(\lambda_k) / d\Omega, \quad (6)$$

式中: $N_k(z)$ 为相应通道 k 的氮气、氧气或水汽的分子数密度。根据 Placzek^[18] 的极化理论,拉曼后向散射截面强度与波长的 4 次方成反比,即

$$\frac{d\sigma(\lambda_{354.7k}) / d\Omega}{d\sigma(\lambda_{266.0k}) / d\Omega} = \left(\frac{\lambda_{266.0k}}{\lambda_{354.7k}} \right)^4. \quad (7)$$

根据拉曼频移和 Whiteman^[19] 关于 354.7 nm 波段拉曼后向散射截面的研究结果,计算激励波长为 354.7, 266.0 nm 时,氧气、氮气和水汽分子的振动拉曼散射中心波长和拉曼后向散射截面,结果如表 1 所示。

已知大气中氮气的体积分数为 78%,水汽的体积分数为 0.1%~3%。假定水循环密集的大气近场水汽的体积分数约为空气的 3%,依据美国标准大气模型^[20]可得出氮气、水汽的分子数密度,根据表 1

表 1 激励波长为 354.7nm 和 266.0 nm 时,氧气、氮气、水汽的振动拉曼频移、拉曼中心波长和后向散射截面

Table 1 Vibration Raman frequency shift, Raman central wavelength, and backscattering cross section of O_2 , N_2 , and H_2O with excitation wavelengths of 354.7 nm and 266.0 nm

Molecule k	Raman frequency shift / cm^{-1}	Raman central wavelength / nm		$\frac{d\sigma(\lambda_{354.7k})}{d\Omega} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$	$\frac{d\sigma(\lambda_{266.0k})}{d\Omega} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1})$
		Excitation wavelength 354.7 nm	Excitation wavelength 266.0 nm		
O_2	1555	375.8	277.5	2.25×10^{-30}	1.24×10^{-29}
N_2	2331	386.7	283.6	2.8×10^{-30}	9.68×10^{-30}
H_2O	3652	407.8	294.6	6.2×10^{-3}	2.28×10^{-29}

和(6)式可计算得出 354.7, 266.0 nm 波段激励下的拉曼后向散射系数 β , 如图 2 所示, 其中 $\Delta_{B(N_2)}$ 为 354.7 nm 与 266.0 nm 波段激励下氮气拉曼后向散射系数的差值, $\Delta_{B(H_2O)}$ 为 354.7 nm 与 266.0 nm 激励下水汽拉曼后向散射系数的差值。由图 2 可知, 日盲紫外波段 266.0 nm 拉曼后向散射系数远大于紫外光波段 354.7 nm 的拉曼后向散射系数, 即 $\beta_{266.0} > \beta_{354.7}$ 。

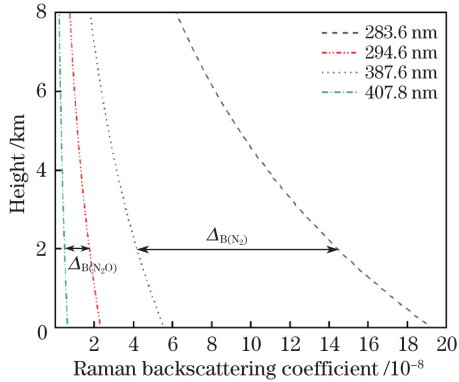


图 2 激励波长为 354.7 nm 和 266.0 nm 时, 氮气、水汽的拉曼后向散射系数

Fig. 2 Raman backscattering coefficients of N₂ and H₂O with excitation wavelengths of 354.7 nm and 266.0 nm

3.2 激励波长消光系数对大气透过率的影响

在水汽拉曼激光雷达探测系统中, 各拉曼通道大气的双程透过率为

$$T_1(z, \lambda_0) T_2(z, \lambda_k) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(z, \lambda_0) dz\right] \exp\left[-\int_0^z \alpha(z, \lambda_k) dz\right], \quad (8)$$

式中: α 为消光系数, 可根据标准大气模型得到。紫外域光谱波段 354.7 nm 和日盲紫外波段 266.0 nm 的氮气和水汽分子振动拉曼散射波长处的分子消光系数 α 和大气双程透过率如图 3(a) 所示。由于消光系数与波长成反比, 故而同一高度 z 处, 266.0 nm 波段激励下的氮气和水汽通道消光系数大于 354.7 nm 波段的, 即 $\alpha_{266.0} > \alpha_{354.7}$; 而大气透过率与消光系数成反比, 因此氮气和水汽拉曼通道大气透过率 $(T_1 T_2)_{266.0} < (T_1 T_2)_{354.7}$ 。已知前述日盲紫外波段 266.0 nm 拉曼后向散射系数远大于紫外光波段 354.7 nm 的拉曼后向散射系数, 即 $\beta_{266.0} > \beta_{354.7}$, 整体考虑与大气参数相关的拉曼激光雷达回波信号大气项 $\beta T_1 T_2$ 在 354.7 nm 和 266.0 nm 激励波长下的强弱, 如图 3(b) 所示, 在 5 km 以下, 266.0 nm 波段拉曼激光雷达回波信号大气项 $\beta T_1 T_2$ 强于 354.7 nm 波段拉曼激光雷达回波信号大气项。

3.3 臭氧对大气水汽反演结果的影响

紫外域存在臭氧吸收, 臭氧吸收截面系数如

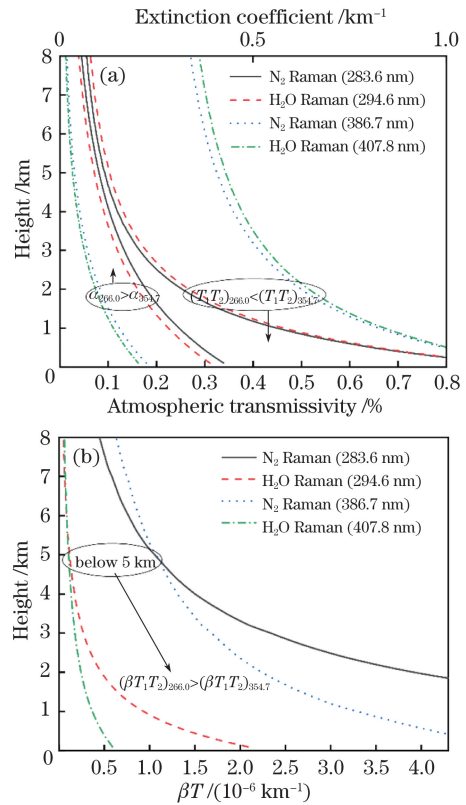


图 3 激励波长为 354.7 nm 和 266.0 nm 时, (a) 标准大气模型的消光系数廓线与大气透过率以及 (b) 拉曼后向散射系数与大气透过率的乘积

Fig. 3 (a) Extinction coefficient profiles and atmospheric transmissivity in standard atmosphere model, and (b) product between Raman backscattering coefficient and atmospheric transmissivity when excitation wavelengths are 354.7 nm and 266.0 nm

图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知, 大气近场处臭氧吸收截面系数随温度的变化不大, 随着波长增大, 臭氧的吸收截面变弱, 约在 310.0 nm 处近似为 0, 而 354.7 nm 波段水汽拉曼激光雷达探测系统各通道光谱范围内无臭氧吸收, 利用该波段探测水汽不需要考虑臭氧的影响。深紫外域 266.0 nm 波段各拉曼通道光谱均处于臭氧吸收区, 米-瑞利、氧气、氮气和水汽的单位分子臭氧吸收截面面积分别为 $(9.36 \pm 0.01) \times 10^{-18}$ 、 $(4.91 \pm 0.03) \times 10^{-18}$ 、 $(2.98 \pm 0.06) \times 10^{-18}$ 、 $(0.79 \pm 0.06) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 因此对于 266.0 nm 波段水汽拉曼激光雷达探测系统而言, 必须考虑臭氧吸收的影响。

266.0 nm 波段水汽探测系统各拉曼通道存在臭氧吸收, 则大气双程透过率需要改写为

$$T_{266.0}(z, \lambda_k) = T_1(z, \lambda_0) T_2(z, \lambda_k) T_{O_3}(z, \lambda_k), \quad (9)$$

式中: T_{O_3} 为大气双程透过率中的臭氧衰减因子,

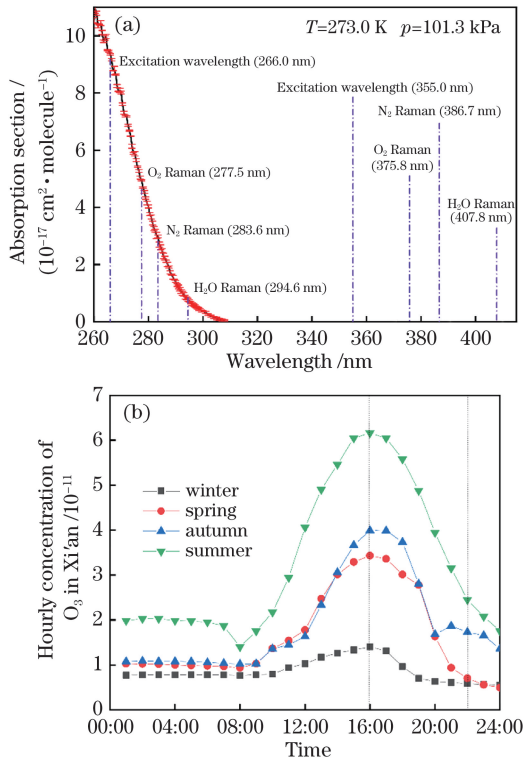


图 4 (a) 两种紫外波段臭氧吸收截面系数；
(b) 西安市主城区臭氧小时浓度季均值日变化规律
Fig. 4 (a) Ozone absorption coefficients for two kinds of ultraviolet wavelengths; (b) diurnal variation rule of ozone hourly concentrated in Xi'an main city

满足

$$T_{O_3}(z, \lambda_k) = \exp\left\{-\int_0^z [N_{O_3}(z)\chi(z, \lambda_0) + N_{O_3}(z)\chi(z, \lambda_k)] dz\right\}, \quad (10)$$

式中： χ 为臭氧吸收截面系数，如图 4(a) 所示； $N_{O_3}(z)$ 为大气中臭氧的分子数密度。本研究主要考虑西安地区臭氧浓度分布对深紫外域 266.0 nm 波段水汽拉曼激光雷达探测系统的影响。人类排放的大气污染物导致对流层中的臭氧含量逐渐增加，其中西安主城区近年来近地面臭氧小时浓度季均值时空分布^[21]如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知：16:00 左右臭氧浓度到达顶峰；22:00 至次日 8:00 臭氧浓度处于低值区，且变化不大。

为了讨论臭氧对 266.0 nm 波段探测系统大气近场透过率和激光雷达系统的影响，基于图 4(b) 中四季 16:00 时的臭氧分子数密度均值 3.5×10^{-11} ，以及 22:00 时的臭氧分子数密度均值 10^{-11} ，分别计算白天和夜晚臭氧对探测系统大气双程透过率的衰减吸收 T_{O_3} ，结果如图 5(a) 所示。 T_{O_3} 为小于 1 的因子，会对大气透过率产生衰减，白天臭氧浓度较

大，对 266.0 nm 波段探测系统大气透过率衰减的影响更大。同时，与 354.7 nm 波段对比，266.0 nm 水汽拉曼激光雷达探测系统经臭氧衰减后的总大气项 $(\beta T_1 T_2 T_{O_3})_{266.0}$ 如图 5(b) 所示，由关于图 3(b) 的分析可知，在 5 km 以下， $(\beta T_1 T_2)_{266.0} > (\beta T_1 T_2)_{354.7}$ ，而此时，266.0 nm 波段水汽拉曼激光雷达探测系统大气项仅在 1.2 km 以下大于 354.7 nm 波段。

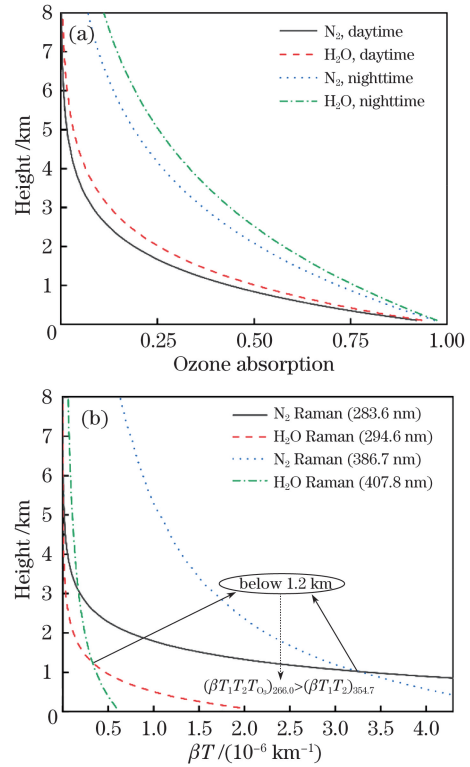


图 5 (a) 白天、夜晚臭氧对大气双程透过率的吸收；
(b) 含臭氧衰减的 266.0 nm 和 354.7 nm 波段拉曼后向散射系数与大气透过率的乘积

Fig. 5 (a) Ozone absorption of atmospheric two-way transmissivity during daytime and nighttime; (b) product between Raman backscattering coefficient and atmospheric transmissivity at 266.0 nm and 354.7 nm bands when ozone attenuation is considered

一般利用拉曼原理反演水汽混合比时，需要分光系统分离出氮气和水汽两个拉曼回波通道即可完成水汽的反演计算，如图 6(a) 所示，其中为 FL 为聚焦透镜，DM 为二向色镜。266.0 nm 波段水汽探测系统反演水汽混合比时，臭氧的衰减会影响各拉曼通道的大气透过率，因此水汽反演大气透过率修正项需要加入臭氧吸收作用项 $\Delta\tau_{O_3}$ ，即

$$W_{266.0, H_2O} \approx 0.207 \frac{P(z, \lambda_{266.0}, \lambda_{H_2O})}{P(z, \lambda_{266.0}, \lambda_{N_2})} \times \Delta\tau(\lambda_{N_2}, \lambda_{H_2O}, z) \Delta\tau_{O_3}(\lambda_{N_2}, \lambda_{H_2O}, z), \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{O_3}(\lambda_{N_2}, \lambda_{H_2O}, z) = \exp\left\{\int_0^z N_{O_3}(z)[\chi(z, \lambda_{H_2O}) - \chi(z, \lambda_{N_2})]dz\right\}. \quad (12)$$

因此,266.0 nm 波段水汽拉曼激光雷达探测系统需要再分离出氧气拉曼通道,如图 6(b)所示,由氧气与氮气通道的拉曼回波信号比即可反演出实际测量环境中的臭氧浓度^[22],完成水汽的精确探测。

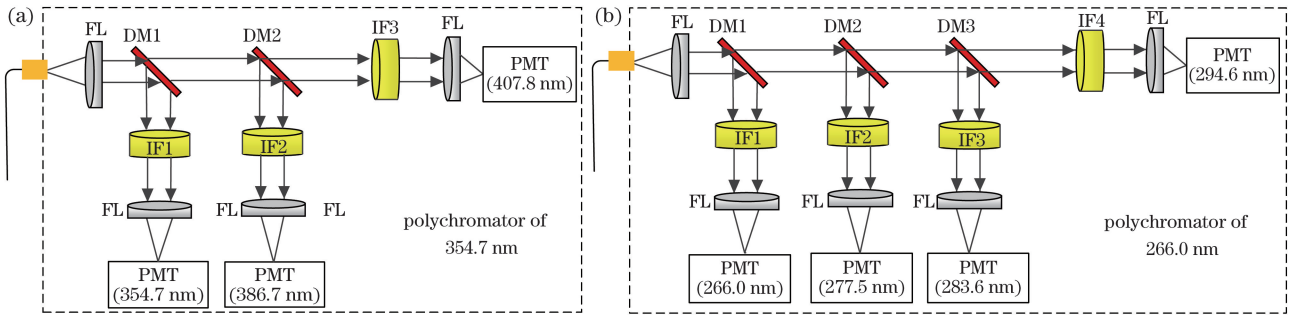


图 6 (a) 354.7 nm 分光系统;(b) 266.0 nm 分光系统

Fig. 6 (a) Polychromator at 54.7 nm; (b) polychromator at 266.0 nm

本研究采用结构简单、性能稳定的 DM 和超窄带 IF 搭建高效高光谱分光系统,对两种紫外波段分光系统的搭建进行分析和对比。分光系统所选的 DM 具有高的分辨率,其对波长小于某波段的光具有极高的反射率(大于 99%),对波长大于某波段的光具有很高的透射率(大于 90%)。窄带 IF 的带外抑制比光学密度(OD)为 7,因此对弹性散射米-瑞利散射信号的抑制至少可达到 7 个数量级,可实现各通道的高效精细分离和水汽的精细反演。

3.4 紫外波段太阳背景噪声的计算

紫外域太阳光照强度光谱如图 7 所示,其中黄色区域为大气层顶日射辐照度,红色区域为典型晴天天气团(AM)1.5 条件下到达地球表面的法向直接日射辐照度^[17]。在波长小于 0.3 μm 的深紫外区,臭氧的吸收使该区域的法向直接日射辐照度急剧下降至几乎为 0,白天使用该波段进行大气水汽探测不会受太阳背景噪声的影响,该波段也称为日盲区。266.0 nm 波段激励下的各拉曼通道波长均属于日盲区;354.7 nm 波段激励的各拉曼通道波长属于 0.3~0.4 μm 的紫外区,该区域仍有部分太阳背景光。

白天探测时,激光雷达每秒接收到的太阳背景辐射噪声为

$$P_b(\lambda_k) = \int_{\Delta\lambda} S_b(\lambda_k) A \frac{\pi}{4} \theta^2 d\lambda_k, \quad (13)$$

式中: A 为望远镜的接收面积; θ 为望远镜的接收视场角; $\Delta\lambda$ 为光谱透射窗口。由于望远镜口径与回波信号成正比,因此选择大口径(≥ 400 mm)、视场角 θ 为 0.5 mrad 的卡塞格林望远镜,高光谱分光系统中设 $\Delta\lambda$ 为 1 nm,根据标准 G 173(AM1.5)^[17] 中标准太阳光谱的法向直接日射辐照度分布数据得出

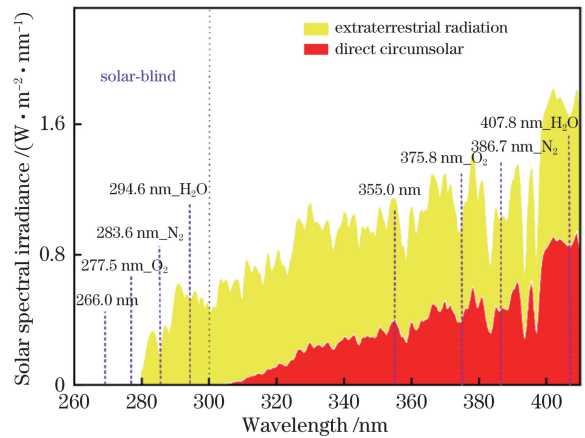


图 7 大气层顶和地球表面法向直接日射辐照度光谱

Fig. 7 Solar illumination spectra along normal directions on top of atmospheric layer and surface of earth

$S_b(\lambda_k)$ 。由此便可求得白天波长为 266.0,354.7 nm 时,激光雷达拉曼通道接收的太阳背景辐射噪声 $P_b(\lambda_k)$,结果如表 2 所示。白天探测时,相比 354.7 nm 波段各拉曼通道的背景噪声,266.0 nm 波段各拉曼通道的背景噪声几乎为 0,更有利于实现全天时探测。

4 全天时紫外域拉曼水汽探测系统的讨论与实现

白天微弱的拉曼信号易淹没在背景噪声中,而实现全天时水汽拉曼激光雷达探测,需要聚焦于何种激励波长能避免背景噪声对探测系统产生影响。266.0 nm 波段无太阳背景噪声,但存在臭氧吸收;354.7 nm 波段无臭氧吸收,但仍受到太阳背景噪声的影响。为了比较两种波段臭氧吸收和太阳背景噪声对水汽拉曼激光雷达探测系统的影响,假设分光

系统参数一致,设计激光器、望远镜、PMT 等激光雷达项参数,如表 3 所示。然后利用西安主城区近地面臭氧小时浓度季均值时空分布[如图 4(b)所示]和美国标准大气模型、有云模型构成的大气后向

散射比 R_b (如图 8 所示),取系统的采样间隔为 80 ns,累计平均脉冲数为 36000,分别计算不同天气状况下白天紫外域拉曼激光雷达各通道的信噪比。

表 2 激光雷达 266.0 nm 和 354.7 nm 各拉曼通道接收的太阳背景辐射噪声

Table 2 Sun irradiation background noises at 266.0 nm and 354.7 nm of all Raman channels of Raman lidar

Raman channel k	$S_b(\lambda_{266.0k}) /$ ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$)	$S_b(\lambda_{354.7k}) /$ ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$)	$P_b(\lambda_{266.0k}) /$ (10^{-14} J)	$P_b(\lambda_{354.7k}) /$ (10^{-8} J)
O ₂	0	0.4551	0	1.069
N ₂	1.46×10^{-19}	0.4685	0	1.100
H ₂ O	1.6×10^{-6}	0.8849	3.757	2.078

表 3 354.7 nm 和 266.0 nm 拉曼激光雷达系统参数

Table 3 Parameters of 354.7 nm and 266.0 nm Raman lidar system

Wave range of transmission and receiving system /nm	Nd:YAG laser	Pulse energy /mJ	Pulse repetition frequency /Hz	Pulse width /ns	Detector	Quantum efficiency /%
354.7	Injection-seeded	500	10	10	Hamamatsu R3896	26
266.0	Injection-seeded	150	10	10	Hamamatsu R3896	29

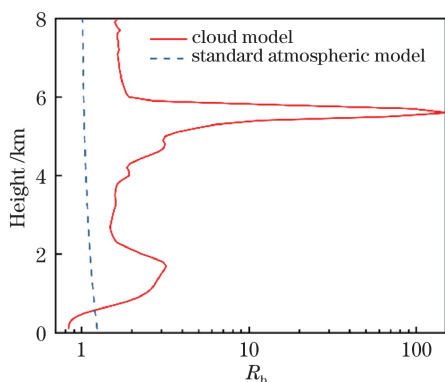


图 8 晴天标准大气模型和有云模型的大气后向散射比 R_b

Fig. 8 Atmospheric backscattering ratio R_b for standard atmospheric model and cloud model

白天探测时,将 354.7 nm 各拉曼通道背景光噪声 $P_b(\lambda_k)$ 降噪处理至 $0.01P_b(\lambda_k)$ 后,再与 266.0 nm 波段各拉曼通道 SNR 对比,结果如图 9 所示。由图 9 可知:晴天 266.0 nm 水汽探测距离可达 2.7 km (信噪比为 10);多云时受云层的影响,探测距离降为 1.4 km;不论是晴天还是多云,354.7 nm 波段水汽探测距离均不足 1 km。由此可知,266.0 nm 波段各拉曼通道的信噪比虽然遭受臭氧影响而衰减,但仍高于降噪后 354.7 nm 的,白天背景光噪声对紫外域 354.7 nm 水汽拉曼激光雷达探测系统的影响远大于臭氧吸收对 266.0 nm 激励波段的影响。由于 354.7 nm 波段水汽探测系统太阳背景噪声量级为 266.0 nm 波段的 6 倍,虽然 266.0 nm 波段存在

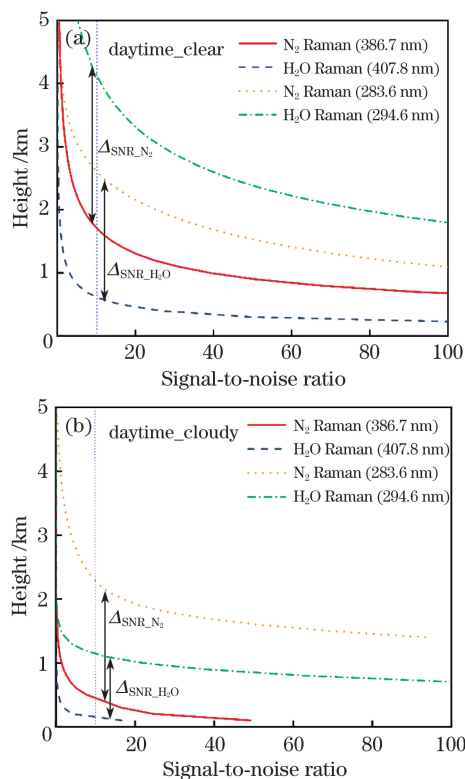


图 9 (a)晴天与(b)多云白天两种紫外波段氮气、水汽通道的信噪比

Fig. 9 (a) Clear and (b) cloudy daytime signal-to-noise ratio of N₂ and H₂O of two ultraviolet wavelengths

臭氧吸收,但经计算可知 354.7 nm 波段各拉曼通道背景光噪声被降噪处理至 $10^{-5}P_b(\lambda_k)$ 后,两者水汽通道才具有相同的信噪比,使得 354.7 nm 波段水汽

探测系统需要更高精度的去噪算法才能去除强烈的背景噪声,从而完成白天水汽探测。可见,选择不受太阳背景噪声影响的日盲紫外波段 266.0 nm 作为白天拉曼水汽探测系统激励波长,可满足全天时水汽拉曼激光雷达实现白天探测的需求。

在白天的强太阳背景噪声下,深紫外域 266.0 nm 波段具有探测优势,可作为白天水汽拉曼激光雷达探测系统的激发波长;在夜晚无背景噪声时,266.0 nm 波段受臭氧衰减影响且消光较强,与其他常用的激励波长相比不具有优势。依据波长越短拉曼散射越强的原理可知,夜晚 354.7 nm 激励波段具有探测优势。因此在本研究中设想将两种波段结合起来,构建全天时水汽拉曼激光雷达探测系统,选用单纵模种子注入四波长(1064.1, 532.1, 354.7, 266.0 nm) SGR-20 型纳秒脉冲调 Q 固体 Nd:YAG 激光器,设置倍频晶体切换开关,白天探测时开关切换至四倍频输出的 266.0 nm 波段,将其作为激励波长,夜晚探测时开关切换至三倍频输出的 354.7 nm 波段,将其作为发射系统的激励波长。利用当地气象局实时探空气球的温度和相对湿度数据,针对两者反演的探测盲区以上高度的拉曼激光雷达数据,通过函数关系式进行标定,完成数据的修正,从而保证数据质量的连贯性和一致性。

5 结 论

全天时水汽拉曼激光雷达实现的技术难点在于白天微弱的拉曼信号淹没于强烈的背景噪声中,从而导致白天探测比较困难。考虑到大气分子散射强度与波长的 4 次方成反比,同时考虑到太阳光谱的分布特征,本课题组提出利用大气水汽探测中占有优势的紫外光谱波段作为水汽拉曼激光雷达探测系统的激励波段,分析其对全天时水汽拉曼激光雷达探测性能的影响。

从水汽拉曼激光雷达系统的实际建设出发,选择紫外域波段 Nd:YAG 激光器三倍频输出的 354.7 nm 和四倍频输出的 266.0 nm 作为水汽拉曼激光雷达的激励光源。从后向散射系数、消光系数、大气透过率和臭氧吸收等方面,探讨 354.7 nm 和 266.0 nm 激励光源对拉曼激光雷达回波信号中大气参量的影响,其中 266.0 nm 激励光源及其对应的氧气、氮气和水汽拉曼波长会受到臭氧的吸收。分析紫外域太阳辐照度光谱后可知 266.0 nm 可作为探测波长,其对应的氧气、氮气和水汽拉曼波长均属日盲紫外波段,在水汽探测中不受太阳背景噪声的

影响,而若利用 354.7 nm 波段探测就会受到太阳背景噪声的影响。为了对比两种波段臭氧吸收和太阳背景噪声对全天时水汽拉曼激光雷达探测系统的影响,假设分光系统参数一致,设计了激光器、望远镜、PMT 等激光雷达项参数,利用西安主城区近地面臭氧小时浓度季均值时空分布以及美国标准大气模型、有云模型构成,分别计算不同天气状况下紫外域水汽拉曼激光雷达各通道的信噪比,其中 266.0 nm 波段白天的有效探测距离为 2.7 km,354.7 nm 波段的有效探测距离为 0.6 km。研究结果表明,将 266.0 nm 波段作为白天水汽拉曼激光雷达探测系统的激励波长,可有效提高白天水汽拉曼激光雷达的探测距离,实现水汽全天时探测。

本课题组结合紫外域两种波段的优势,对现有 354.7 nm 紫外水汽拉曼激光雷达探测系统进行升级,通过设置倍频开关转换,利用 Nd:YAG 激光器四倍频输出的 266.0 nm 波段在白天对水汽进行探测,利用三倍频输出的 354.7 nm 波段在夜间进行探测,可以实现高性能拉曼激光雷达水汽探测系统的全天时探测。

参 考 文 献

- [1] Sheng P X, Mao J T, Li J G, *et al.* Atmosphere physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 7-8.
盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:7-8.
- [2] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, *et al.* Stratosphere-troposphere exchange[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(4): 403-439.
- [3] Yan J X, Gong S S, Liu Z S. Laser radar for environment monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2001: 7-8.
阎吉祥,龚顺生,刘智深.环境监测激光雷达[M].北京:科学出版社,2001:7-8.
- [4] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.
吕立慧,刘文清,张天舒,等.基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J].激光与光电子学进展,2017,54(1):010101.
- [5] Sica R J, Haeefe A. Retrieval of water vapor mixing ratio from a multiple channel Raman-scatter lidar using an optimal estimation method[J]. Applied Optics, 2016, 55(4): 763-777.
- [6] Wang M, Hu S X, Fang X, *et al.* Variation

- characteristics of water vapor mixing ratio profile over Hefei[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s1): 156-161.
王敏, 胡顺星, 方欣, 等. 合肥上空水汽时空变化特征的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s1): 156-161.
- [7] Hua D X, Kobayashi T. UV Rayleigh-Mie Raman lidar for simultaneous measurement of atmospheric temperature and relative humidity profiles in the troposphere[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(3): 1287-1291.
- [8] de Tomasi F, Torsello G, Perrone M R. Water-vapor mixing-ratio measurements in the solar-blind region[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(10): 686-688.
- [9] Uesugi T, Tsuda T, Yabuki M, *et al.* Development of a 266 nm Raman lidar for profiling atmospheric water vapor[C]//AGU Fall Meeting. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2014: 2.
- [10] Zhu Z Y, Gu R A, Lu T H, *et al.* The application of Raman spectroscopy in chemistry[M]. Shenyang: Northeast University Press, 1998: 162-165.
朱自莹, 顾仁傲, 陆天虹, 等. 拉曼光谱在化学中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998: 162-165.
- [11] Cooney J. Remote measurements of atmospheric water vapor profiles using the Raman component of laser backscatter[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, 9(1): 182-184.
- [12] Sun P Y, Yuan K E, Hu S X, *et al.* Statistical analysis of lower-troposphere CO₂ vertical distribution measured by Raman lidar in Hefei western suburb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1101001.
孙培育, 苑克娥, 胡顺星, 等. 拉曼激光雷达探测合肥西郊低对流层大气二氧化碳垂直分布的统计分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1101001.
- [13] Cheng Z T, Liu D, Liu C, *et al.* Multi-longitudinal-mode high-spectral-resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401001.
成中涛, 刘东, 刘崇, 等. 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401001.
- [14] Gao F, Stanič S, Bergant K, *et al.* Application of the ultraviolet scanning elastic backscatter LiDAR for the investigation of aerosol variability[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 6320-6335.
- [15] Leblanc T, McDermid I S, Walsh T D. Ground-based water vapor Raman lidar measurements up to the upper troposphere and lower stratosphere for long-term monitoring[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5: 17-36.
- [16] Mao J D, Hua D X, Wang Y F, *et al.* Accurate temperature profiling of the atmospheric boundary layer using an ultraviolet rotational Raman lidar[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(15): 3113-3118.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard table for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface: G 173-03[S]. West Conshohocken: ASTM, 2003.
- [18] Placzek G. The Rayleigh and Raman scattering[M]//Marx E. *Handbuch der Radiologie: Vol VI*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1934: 209-374.
- [19] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2593-2608.
- [20] U.S. Government Printing Office. U. S. standard atmosphere[S]. Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1976.
- [21] Ma W J. The analysis for the spatial distribution characteristic of surface ozone concentration in the urban area of Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014: 28-29.
马文静. 西安主城区近地面大气中臭氧浓度时空分布特征分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014: 28-29.
- [22] Wang S L. Study on Raman lidar systems for detecting tropospheric temperature and boundary layer water vapor[D]. Anhui: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 149-150.
汪少林. 对流层温度与边界层水汽激光雷达系统研究[D]. 安徽: 中国科学院大学, 2010: 149-150.