0254-6124/2020/40(6)-1046–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CUI Honglu, YAN Zhaoai, ZHANG Bingyan, GUO Wenjie, HU Xiong. Research on atmospheric lidar signal simulation based on HITRAN database (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(6): 1046-1051. DOI:10.11728/cjss2020.06.1046

基于 HITRAN 数据库的大气激光雷达信号仿真 *

崔洪鲁[1,2,3] 闫召爱[1,2,3,4] 张炳炎[1,2,3]

郭文杰[1,2] 胡 雄[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘 要 信号仿真研究是大气激光雷达研究的重要环节, 结果可为激光雷达系统的设计和研制提供基础. 本文仿真系统可用于激光雷达回波信号模拟. 该仿真系统利用 HITRAN 数据库中的吸收谱线计算大气分子对激光的吸收光谱, 并采用大气辐射传输模型中的气溶胶模式模拟气溶胶对激光的衰减. 利用激光雷达方程, 数值模拟了 355 nm, 532 nm 以及 1064 nm 的回波信号, 并将 532 nm 的数值模拟结果与实测结果进行对比, 评估了激光雷达系统的光学效率.

关键词 大气探测, 激光雷达, 仿真计算

中图分类号 P 356

Research on Atmospheric Lidar Signal Simulation Based on HITRAN Database

CUI Honglu[1,2,3] YAN Zhaoai[1,2,3,4] ZHANG Bingyan[1,2,3]

GUO Wenjie[1,2] HU Xiong[1,2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing* 100190)

2(*Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Science, Beijing* 100190)

3(*University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049)

4(*Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

Abstract Signal simulation is very important for atmospheric lidar research. It provides a basis for the design and development of lidar system. The simulation system in this paper can be used to simulate the lidar echo signal based on the absorption line data in the HITRAN database. It

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17010303) 和国家重点研发计划项目 (2016YFB0501503) 共同资助

2019-04-12 收到原稿, 2020-05-31 收到修定稿

E-mail: yanza@nssc.ac.cn

can calculate the absorption spectrum of atmospheric molecules, and the attenuation caused by aerosols. This simulation system can also calculate molecules scatter coefficient with parameters built in LOWTRAN and it can simulate the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the echo signal. The echo signals of 355 nm, 532 nm and 1064 nm are simulated by the simulation system using the lidar equation and these signals agree well with the distribution of aerosols and atmospheric molecules. The simulation results of 532 nm are compared with a Rayleigh Doppler lidar measured results and their results are consistent, which shows that the simulation system is reliable. The optical efficiency of this lidar system is roughly evaluated and its value is reasonable. The measured SNR and the simulated SNR are calculated. Their results are similar, so simulated SNR can evaluate the reliability of echo signals.

Key words Atmospheric detection, Lidar, Simulation calculation

0 引言

大气激光雷达是一种利用激光与大气成分相互作用进行大气参数探测的雷达. 其发射的激光束在大气中传输时, 与大气成分发生吸收、散射等相互作用, 一部分激光被散射回来. 经过测量、分析散射激光的强度、频率变化、偏振态等, 可以获得大气成分的含量、温度、运动速度、偏振特性等信息.

根据不同的吸收、散射机制, 大气激光雷达主要分为差分吸收、米散射、拉曼散射、瑞利散射、荧光散射以及多种机制综合的类型 [1]. 利用这些激光雷达可以测量气溶胶和云的光学参数 [2−4], 水汽 [5]、二氧化碳 [6]、二氧化硫、二氧化氮 [7] 及臭氧的混合比 [8], 钠原子 [9]、钾原子、铁原子、钙原子数密度 [10], 大气分子密度、温度、风场等, 在大气环境监测、气象预报与保障、大气科学研究、空间物理科学研究等领域具有重要作用.

随着激光技术的发展, 越来越多的波长和探测方法将应用于大气激光雷达, 进行大气测量. 在大气激光雷达设计与使用等阶段, 需要利用仿真技术对信号进行模拟, 验证测量方法的可行性, 合理配置参数, 评估设备性能等. 大气激光雷达接收到的信号强度与大气的吸收和散射作用相关, 进行信号模拟计算时, 主要考虑大气对激光的吸收和散射. 为了精确地对信号进行模拟计算, 本文利用 HITRAN 数据库提供的大气吸收谱线数据, 计算激光在传输中由吸收引起的衰减, 结果适用于从紫外到远红外波段的任意波长, 这对于大气激光雷达的研究具有重要意义.

1 模拟方法

由于大气分子和气溶胶对激光的散射、吸收等作用, 激光在大气传输过程中逐渐衰减. 利用散射系数 $\alpha_{\rm sca}(\lambda,z)$ 表示单位距离下散射能量的概率, 吸收系数 $\alpha_{\rm abs}(\lambda,z)$ 表示单位距离下吸收能量的概率. 单位距离的相对衰减率为散射系数 $\alpha_{\rm sca}(\lambda,z)$ 与吸收系数 $\alpha_{\rm abs}(\lambda,z)$ 之和, 用消光系数 $\alpha(\lambda,z)$ 来表示, 可以写为

$$\alpha(\lambda,z)=\alpha_{\rm mol,sca}(\lambda,z)+\alpha_{\rm mol,abs}(\lambda,z)+\alpha_{\rm aer,ext}(\lambda,z). \tag{1}$$

在式 (1) 中, $\alpha_{\rm mol,sca}(\lambda,z)$ 表示大气分子的散射系数, $\alpha_{\rm mol,abs}(\lambda,z)$ 表示大气分子的吸收系数, $\alpha_{\rm aer,ext}(\lambda,z)$ 表示气溶胶粒子的消光系数.

假设波长 λ 的激光发射脉冲功率为 $P_{\rm L}(\lambda_0)$, 传输距离 z 后大气激光雷达接收到的信号强度可以由大气激光雷达方程给出, 即

$$N_{\rm R}(\lambda,z)=\Big[\frac{P_{\rm L}(\lambda_0)\Delta t}{hc/\lambda_0}\Big]\Big(\frac{A}{z^2}\Big)G(z)\eta\beta(\lambda,z)\Delta z\cdot \exp\Big\{-\int_0^z[\alpha(\lambda_0,r)+\alpha(r,\lambda)]{\rm d}r\Big\}+\Delta N\Delta t. \tag{2}$$

式中: λ_0 为发射激光的波长; λ 为接收激光的波长; $N_{\rm R}(\lambda,z)$ 为接收到的光子数; Δt 为积分时间; h 为普朗克常数; c 为光速; A 为接收望远镜的面积; $G(z)$ 为几何因子, 表示发射光束与接收视场的重合程度; η 为激光雷达系统的光学效率; $\beta(\lambda,z)$ 为大气分子后向散射系数和气溶胶后向散射系数之和; $\alpha(\lambda,r)$ 为大气的消光系数; Δz 为积分距离; ΔN 为噪声.

大气激光雷达多采用光子计数的方式采集信号, 即测量信号中的光子数目. 大气激光雷达发射出去的光子总数为 $\Big[\dfrac{P_{\rm L}(\lambda_0)\Delta t}{hc/\lambda_0}\Big]$. 传输至距离 z 处时, 剩余光子总数为 $\Big[\dfrac{P_{\rm L}(\lambda_0)\Delta t}{hc/\lambda_0}\Big]T_1(z)$, 其中 $T_1(z)$ 为去程的透过率, 可表示为

$$\exp\Big[-\int_0^z\alpha(\lambda_0,r){\rm d}r\Big].$$

在积分距离 Δz 内, 波长为 λ 的光的后向散射概率为 $\beta(\lambda,z)\Delta z$, 传输到接收系统时剩余光子数为

$$\Big[\frac{P_{\rm L}(\lambda_0)\Delta t}{hc/\lambda_0}\Big]\beta(\lambda,z)\Delta z T_1(z)T_2(z),$$

其中 $T_2(z)$ 为 z 位置处后向散射回来的光子大气透过率, 可表示为

$$\exp\Big[-\int_0^z\alpha(\lambda_0,r){\rm d}r\Big],$$

其中 $\Big(\dfrac{A}{z^2}\Big)G(z)$ 部分进入到接收系统, 并有 η 部分转化为光子脉冲信号被记录下来.

当对弹性散射 (米散射、瑞利散射等) 光进行测量时, $\lambda=\lambda_0$; 当对非弹性散射 (拉曼散射等) 光进行测量时, $\lambda\neq\lambda_0$. 影响接收光子数的大气因素主要表现在散射系数和吸收系数.

1.1 大气分子吸收系数

大气分子对光的吸收与大气分子能级结构有关. 每种大气成分都有丰富的吸收谱线. 20 世纪 60 年代美国空军剑桥研究实验室开始建设高分辨率传输分子吸收数据库 HITRAN (High-resolution Transmission), 目前已汇集大气中 47 种分子的吸收谱线位置和强度、大量分子的吸收截面以及气溶胶特性等数据 [11].

HITRAN 数据库给出了大气成分吸收谱线位置–波数 ν、参考温度 $T_{\rm ref}$ (296 K) 下的吸收谱线强度 S、跃迁的低态能量 E''、空气展宽半宽度 $\gamma_{\rm air}$、自展宽半宽度 $\gamma_{\rm self}$ 等参数. 利用这些谱线参数可以计算不同温度、压强时谱线的强度和半宽度. 温度为 T 时, 吸收谱线的强度 S 由下式计算 [12]:

$$S(T)=S(T_{\rm ref})\frac{Q(T_{\rm ref})}{Q(T)}\frac{\exp(-c^2E''/T)}{\exp(-c_2E''/T_{\rm ref})}\cdot\frac{[1-\exp(-c_2\nu_0/T)]}{[1-\exp(-c_2\nu_0/T_{\rm ref})]}. \tag{3}$$

式中: C_2 为第二辐射常数, 其值为 1.4388 cm·K; ν_0 为谱线跃迁的波数 ($\rm cm^{-1}$); $Q(T)$ 为分子的总体配分函数, 其值近似为 $\Big(\dfrac{T_{\rm ref}}{T}\Big)^n$, n 的取值随分子种类而异. 对于 CO_2, N_2O, CO, O_2 等线型分子, $n=1.0$; 对于 H_2O, O_3, CH_4 等非线型分子, $n=1.5$.

在 20 km 以下高度, 大气压强较大, 分子之间的碰撞是造成谱线展宽的主要因素. 在这种情况下, 谱线的线型可以使用 Lorentz 线型函数表示, 即

$$f_{\rm L}(\nu,\nu_0,T,P)=\frac{1}{\pi}\frac{\gamma_{\rm L}(P,T)}{\gamma_{\rm L}(P,T)^2+\{\nu-[\nu_0+\delta(P_{\rm ref})P]\}^2}. \tag{4}$$

$P_{\rm ref}$ 为参考温度 $T_{\rm ref}$ 时的大气压强, ν_0 为谱线中心位置, $\gamma_{\rm L}$ 为压强展宽半宽度, δ 为谱线的漂移量.

$$\gamma_{\rm L}=\Big(\frac{T_{\rm ref}}{T}\Big)^n[\gamma_{\rm air}(P_{\rm ref},T_{\rm ref})(P-P_{\rm S})+\gamma_{\rm self}(P_{\rm ref},T_{\rm ref})P_{\rm S}]. \tag{5}$$

式中: $P_{\rm S}$ 代表某一气体成分的分压; $\gamma_{\rm air}(P_{\rm ref},T_{\rm ref})$ 代表空气展宽半宽度; $\gamma_{\rm self}(P_{\rm ref},T_{\rm ref})$ 代表谱线自展宽半宽度.

在 50 km 以上高度, 大气比较稀薄, 分子之间的碰撞可以忽略, 主要考虑分子运动引起的展宽, 利用 Doppler 线型函数表示为

$$f_{\rm D}(\nu,\nu_0,T)=\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi\gamma_{\rm D}^2}}\exp\Big[-\frac{(\nu-\nu_0)^2\ln 2}{\gamma_{\rm D}^2}\Big]. \tag{6}$$

其中, $\gamma_{\rm D}$ 为谱线在 ν_0 处的多普勒展宽半宽度, $\gamma_{\rm D}=3.581\times10^{-7}\nu_0\sqrt{T/M}$, M 表示相对分子质量.

在 20~50 km 高度, Lorentz 展宽与 Doppler 展宽同时存在, 谱线线型可以用 Voigt 线型函数表示, 有

$$f(x,y)=\frac{y}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\exp(-t^2)}{y^2+(x-t)^2}{\rm d}t. \tag{7}$$

式中, $y=\dfrac{\gamma_{\rm L}}{\gamma_{\rm D}}\sqrt{\ln 2}$, $x=\Big[\dfrac{(\nu-\nu_0)}{\gamma_{\rm D}}\Big]\sqrt{\ln 2}$.

通过对各种分子吸收谱线强度 $S(T)$ 和线型 f 的计算, 可以得到波长 λ 处的吸收系数 $\alpha_{\rm mol,abs}(\lambda,z)$.

1.2 大气分子散射系数

对于弹性散射, 大气分子对激光的散射满足瑞利散射理论, 散射系数为 [13]

$$\alpha_{\rm mol,sca}(\lambda)=\frac{8\pi^3(m^2-1)^2}{3N\lambda^4}\cdot\frac{6+3\tau}{6-7\tau}. \tag{8}$$

式中: N 为单位体积的分子数密度; λ 为激光的波长; τ 为散射辐射的退偏因子, 一般取值为 0.035; m 为随高度和波长变化的大气折射率.

1.3 气溶胶的消光系数和散射系数

常用的大气辐射传输模型 LOWTRAN, MODTRAN, LBLRTM 等都给出了气溶胶消光系数计算方法. 这里也使用该方法进行计算. 大气辐射传输模型中提供了波长为 0.55 μm 时不同类型气溶胶的消光系数 e_{55}, 据此推算其他波长处的消光系数 (e_λ).

计算 e_{55} 时, 将气溶胶按高度划分为 4 个计算区间: 0~2 km, 2~10 km, 10~30 km, 30~100 km. 在 0~2 km 范围内, 气溶胶的类型可分为乡村型、城市型、海洋型、对流层气型. 这几种气溶胶提供了与 5 种能见度 (50 km, 23 km, 10 km, 5 km, 2 km) 有关的资料库, 其他能见度的消光系数由内插法得到. 在 2~10 km 范围内, 提供了 2 种能见度 (23 km, 50 km) 的资料库, 其他能见度的消光系数可由插值得到. 此区间的气溶胶消光系数与季节变化有关, 存在春夏季和秋冬季两种资料库. 在 10~30 km 范围内, 气溶胶的消光系数与能见度无关, 与季节相关, 此外提供了 4 个与火山相关的资料库: 背景平流层气溶胶、中等火山喷发时期气溶胶、强烈火山喷发时期气溶胶、极强火山喷发时期气溶胶.

根据大气辐射传输模型提供的波长范围在 0.2~300 μm 之间的 47 种波长的归一化消光系数 e_λ, 插值计算波长为 λ 的消光系数, 有

$$e_\lambda = c_\lambda e_{55}. \tag{9}$$

式中, c_λ 为与波长相关的常数, e_{55} 是 λ 为 550 nm 处的消光系数. 气溶胶后向散射系数 $\beta_{\rm aer}(\lambda)$ 可由消光系数 e_λ 和气溶胶激光雷达比 $S_{\rm a}$ 计算得到, 即

$$\beta_{\rm aer}(\lambda) = e_\lambda / S_{\rm a}. \tag{10}$$

气溶胶激光雷达比是一个与气溶胶类型有关的常数.

1.4 信噪比的计算

大气激光雷达的回波信号不仅包含了大气成分散射信号, 也包含了来自大气中的自然光背景噪声以及探测器产生的噪声. 信噪比 (SNR, 定义符号 $R_{\rm SN}$) 是探测器接收的有效信号与总噪声之比, 是度量回波信号质量的重要参数. 信噪比可以表示为 [14]

$$R_{\rm SN} = \frac{P_{\rm raw}(z) - P_{\rm bg}}{P_{\rm N}(z)}. \tag{11}$$

其中, $P_{\rm raw}(z)$ 为激光雷达的回波信号强度, $P_{\rm bg}$ 为背景噪声强度, $P_{\rm N}(z)$ 为信号中的总噪声强度. 探测器的统计特性使测量的信号具有不确定性, $P_{\rm N}(z)$ 可用 $P_{\rm raw}(z)$ 的标准偏差表示, 即

$$P_{\rm N}(z) = \Delta P_{\rm raw}(z).$$

因此, 信噪比公式可改写为

$$R_{\rm SN} = \frac{P_{\rm raw}(z) - P_{\rm bg}}{\Delta P_{\rm raw}(z)}. \tag{12}$$

在不考虑放大过程产生噪声的条件下, 激光雷达的回波信号服从泊松分布, 即 $\Delta P_{\rm raw}(z) = \sqrt{\bar{P}_{\rm raw}(z)}$. 但是, 经过光电倍增管和雪崩二极管的放大后, 会引入一些附加噪声, 回波信号不再满足泊松分布. 此时回波信号的均值与标准偏差的关系为

$$\Delta P_{\rm raw}(z) = F_{\rm ns}\sqrt{\bar{P}_{\rm raw}(z)}. \tag{13}$$

式中, $F_{\rm ns}(z)$ (Noise Scale Factor) 为噪声比例因子, 其与激光雷达的系统参数有关, 而这些参数很难被精确测量. 当背景噪声远大于暗电流噪声时, 通常使用背景噪声来计算噪声比例因子, 有 [15]

$$F_{\rm ns} = \frac{\Delta P_{\rm b}}{\sqrt{\bar{P}_{\rm b}}}. \tag{14}$$

其中, $\Delta P_{\rm b}$ 为背景噪声的标准偏差, $\sqrt{\bar{P}_{\rm b}}$ 为背景噪声的均方根.

2 仿真结果分析

利用 C++ 程序语言实现了大气激光雷达信号仿真系统的开发, 并使用图形界面库 Qt 开发了系统的人机交互界面, 配置环境参数和激光雷达系统参数. 表 1 给出了仿真 355 nm, 532 nm, 1064 nm 波长时的参数配置, 355 nm, 532 nm 波长的激光一般由 1064 nm 的激光倍频得到, 一次倍频将损失一半的激光功率. 因此, 激光的功率分别设定为 7.5 W, 15 W, 30 W. 系统效率为甄别到的光子数与进入接收望远镜的系统效率之比, 设定为 0.044, 可通过各个透镜的反射、透射系数以及光电探测器的光电效率等估算得到. 仿真结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 在 5 km 以下, 355 nm, 532 nm, 1064 nm 的信号强度相差不大, 这主要是因为其以气溶胶散射为主. 而传输到 5 km 时, 355 nm, 532 nm,

1064 nm 三个波长的往返双程透过率分别为 0.187, 0.416, 0.732. 355 nm 激光衰减比较大, 大部分能量消耗在 5 km 以下区域. 考虑到 532 nm 发射激光功率是 355 nm 发射激光功率的 2 倍, 在 5 km 以上, 532 nm 信号强度大于 355 nm 信号强度.

中国科学院国家空间科学中心于 2013 年研制了车载 532 nm 瑞利散射多普勒激光雷达, 用于测量 30~70 km 的大气温度、密度和风场. 该车载激光雷达在多个地区进行观测实验, 为工程项目提供了环境保障.

图 2 为大气激光雷达信号仿真结果与实测结果的对比, 二者具有较好的一致性, 表明了大气激光雷达信号仿真的可靠性. 基于该结果, 对此激光雷达的光学系统效率进行了估算. 将 45~55 km 区间内实测光子数的均值与同区间内仿真光子数的均值相比, 估算车载激光雷达的光学系统效率, 其实际值应为 0.0127. 以该车载激光雷达采集的 120 km 以上的回波信号作为背景噪声, 计算得到的噪声比例因子为 2.7139, 求得实测信号与模拟信号的信噪比如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 模拟信号与实测信号的信噪比结果相近, 可利用模拟信号的信噪比判断回波信号的可靠性.

表 1 大气激光雷达信号仿真参数配置

Table 1 Atmospheric lidar signal simulation parameters

参数	数值
激光波长/mm	355, 532, 1064
平均功率/W	7.5, 15, 30
距离分辨率/m	200
积分时间/s	1
系统效率	0.044
大气廓线模式	中纬度夏季大气模式
气溶胶配置	能见度为 23 km 的乡村气溶胶
气溶胶激光雷达比 [16]	60, 50, 30

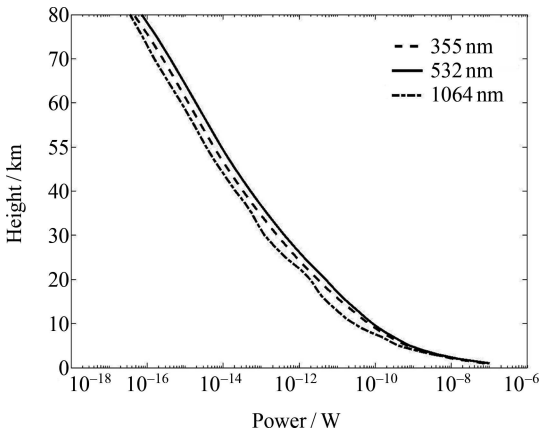


图 1 大气激光雷达信号仿真结果

Fig. 1 Atmospheric lidar signal simulations

3 结论

基于大气激光雷达方程, 利用 HITRAN 数据库中分子吸收谱线建立了大气激光雷达信号仿真系统, 可以模拟计算从紫外到红外波段任意波长的大气散

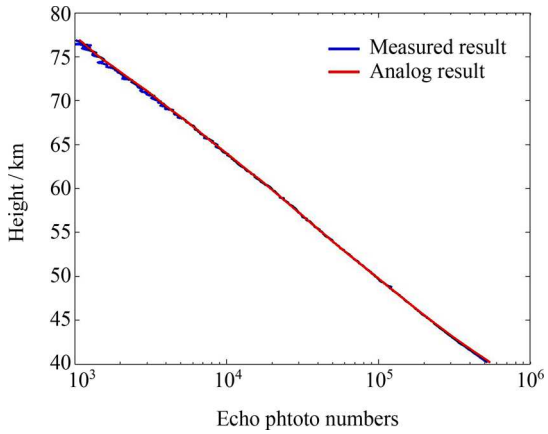


图 2 大气激光雷达信号仿真结果与实测结果比较

Fig. 2 Comparison of atmospheric lidar signal simulations and measurements

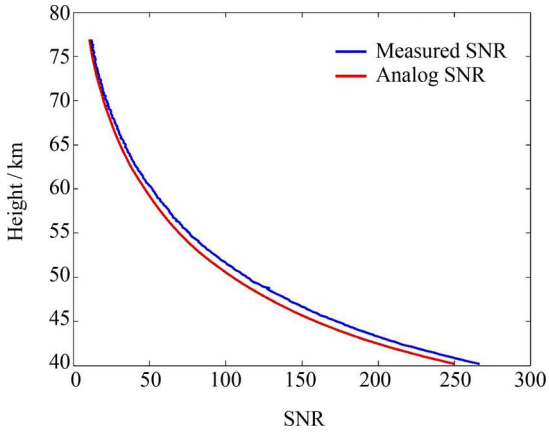


图 3 模拟信噪比与实测信噪比

Fig. 3 Simulated signal-to-noise ratio and measured signal-to-noise ratio

射信号强度. 利用仿真系统模拟了 355 nm, 532 nm 以及 1064 nm 处的回波功率, 分析了这三种回波信号强度的关系. 通过与中国科学院国家空间科学中心研制的车载 532 nm 瑞利散射多普勒激光雷达的实测结果对比, 得出该激光雷达系统效率为 0.0127, 计算了实测信号与模拟信号的信噪比, 证明模拟信号的信噪比可用于判定实测信号的可靠性, 为开展大气探测研究提供了重要依据.

参考文献

[1] FUJII T, FUKUCHI T. Laser Remote Sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005

[2] SONG Xiaoquan, GUO Jinjia, YAN Zhaoai, *et al*. Research on high spectrum resolution lidar detection of atmospheric aerosol optical parameters [J]. *Prog. Nat. Sci.*, 2008, **18**(9): 1009-1015 (宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究 [J]. 自然科学进展, 2008, **18**(9): 1009-1015)

[3] QIU Jinheng, ZHENG Siping, HUANG Qirong, *et al*. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2003, **27**(1): 1-7 (邱金恒, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测 [J]. 大气科学, 2003, **27**(1): 1-7)

[4] CHI Ruli, LIU Houtong, WANG Zhenzhu, *et al*. Observations of cirrus clouds using polarization Mie lidar [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2009, **21**(9): 1295-1300 (迟如利, 刘厚通, 王珍珠, 等. 偏振–米散射激光雷达对卷云的探测 [J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(9): 1295-1300)

[5] LI Tao, QI Fudi, YUE Guming, *et al*. Raman lidar system for the measurements of water vapor mixing ratio in the atmosphere [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2000, **24**(6): 843-854 (李陶, 戚福第, 岳古明, 等. 大气中水汽混合比的 Raman 激光雷达探测 [J]. 大气科学, 2000, **24**(6): 843-854)

[6] ZHAO Yuefeng, ZHANG Yinchao, HONG Guanglie, *et al*. Lidar system for detecting the atmospheric CO_2 [J]. *Chin. J. Quantum Electron.*, 2006, **23**(3): 355-359 (赵曰峰, 张寅超, 洪光烈, 等. 大气 CO_2 含量分布激光雷达监测 [J]. 量子电子学报, 2006, **23**(3): 355-359)

[7] HU Shunxing, CHEN Yafeng, LIU Qiuwu, *et al*. Differential absorption lidar system for background atmospheric SO_2 and NO_2 measurements [J]. *Chin. J. Lasers*, 2018, **45**(9): 09110091 (胡顺星, 陈亚峰, 刘秋武, 等. 差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO_2 和 NO_2 [J]. 中国激光, 2018, **45**(9): 09110091)

[8] YUAN Ke'e, ZHANG Shiguo, HU Shunxing, *et al*. Measurements of ozone using ultraviolet differential absorption lidar in low troposphere [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2013, **25**(3): 553-556 (苑克娥, 张世国, 胡顺星, 等. 对流层低层臭氧的差分吸收激光雷达测量 [J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(3): 553-556)

[9] HU Xiong, YAN Zhaoai, GUO Shangyong, *et al*. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, **56**(3): 247-253 (胡雄, 闫召爱, 郭商勇, 等. 钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度 [J]. 科学通报, 2011, **56**(3): 247-253)

[10] CHENG Xuewu, YANG Guotao, YANG Yong, *et al*. Na Layer and K Layer simultaneous observation by lidar [J]. *Chin. J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0214001 (程学武, 杨国韬, 杨勇, 等. 高空钠层、钾层同时探测的激光雷达 [J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0214001)

[11] GORDON I E, ROTHMAN L S, HILL C, *et al*. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quant. Spectrosc. Ra. Trans.*, 2017, **203**: 3-63

[12] SHI Guangyu. Atmospheric Radiology [M]. Beijing: Science Press, 2007 (石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007)

[13] YANG Ruike, MA Chunlin, HAN Xiang'e, *et al*. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, **36**(z2): 415-418 (杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(z2): 415-418

[14] DENG Pan, ZHANG Tianshu, CHEN Wei, *et al*. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2016, **45**(S1): 88-93 (邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算 [J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(S1): 88-93)

[15] LIU Zhaoyan, WILLIAM Hunt, MARK Vaughan, *et al*. Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4437-4447

[16] ZHANG Chaoyang, SU Lin, CHEN Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chin. J. Lasers*, 2013, **40**(5): 227-232 (张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演分析 [J]. 中国激光, 2013, **40**(5): 227-232)