

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.004

基于微脉冲激光雷达的能见度反演算法^{*}

李红旭¹ 常建华^{1,2} 朱玲嫵¹ 刘秉刚¹ 徐 帆¹

- (1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;
2. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

摘 要:在基于后向散射原理的大气能见度测量过程中,大气消光系数边界值的选取对反演精度具有较大影响。提出一种基于弦截法的大气消光系数边界值的确定方法,并利用迭代的思想对边界值的选取结果进行修正。通过理论仿真和实地测量对本方法的可行性进行验证,结果表明,弦截法具有较快的收敛速度,且迭代次数较少,经过比对迭代修正之后的消光系数边界值可以更准确的反演出大气消光系数,进而实现大气能见度的高精度测量,具有较强的实际应用价值。

关键词:能见度;消光系数;边界值;弦截法

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Visibility inversion algorithm based on micro pulse lidar

Li Hongxu¹ Chang Jianhua^{1,2} Zhu Lingyan¹ Liu Binggang¹ Xu Fang¹

- (1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:In the process of atmospheric visibility measurement based on the backscattering principle, the selection of atmospheric extinction coefficient boundary value has a great influence on the inversion accuracy. In this paper, a method for determining the boundary value of atmospheric extinction coefficient based on secant method is proposed, and the selection result of boundary value is modified by iterative idea. The validity of the method is verified by theoretical simulation and actual measurement. The results show that this approach has faster convergence and fewer iteration times. The extinction coefficient boundary value after iteration can be used to retrieve the atmospheric extinction coefficient more accurately and realize the high precision measurement of atmospheric visibility. And it has great practical application value.

Keywords:visibility; extinction coefficient; boundary value; secant method

0 引 言

大气能见度的测量是进行气象分析的一个重要因素,能见度可以反映当时大气的物理光学状态,预示天气的变化,不仅可以为气象观测部门提供重要分析数据,而且在航空、水上交通、陆上交通以及军事活动等领域都有重要影响^[1-2]。目前,这些领域对能见度测量的需求也越

来越高^[3]。根据柯西米德方程可知,计算大气能见度的关键是实现大气消光系数的反演。现今,基于微脉冲激光雷达回波信号反演大气消光系数常采用 Klett 法^[4]和 Fernald 法^[5],实现这两种算法反演的前提是对消光系数边界值进行确定^[6]。2014 年,曹念文证实了不同的消光系数边界值反演出的消光系数廓线具有明显的差异^[7]。可见,消光系数边界值的合理选定关系到最终大气能见度的精确求解。目前,边界值的确定方法主要有斜率法

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(11374161)、江苏省重点研发计划(BE2016756)、江苏高校优势学科Ⅱ期建设工程、江苏省高校品牌专业建设工程资助项目

和迭代法。斜率法是将距离平方回波信号中的某一段线性区域(一般选取高空洁净区域的大气回波信号段)的斜率作为边界值,这种方法不适用于大气非均匀分布的情况,容易导致较大的反演误差^[5]。迭代法在边界值的确定中应用更为广泛,其大多是根据经验给出消光系数的初始边界值,然后基于反演方法得出测量通道上的大气消光系数廓线^[8],该方法的精度严重依赖于经验值的选定。Marchant 等人^[9]提出一种通过对多次测量信号曲线拟合构建方程组的方法,无需获得边界值,直接进行牛顿迭代反演大气消光系数。然而,该方法需要进行矩阵相乘和矩阵求逆等复杂运算,当激光雷达采样点较多时,计算量较大。

本文提出了一种可用于微脉冲激光雷达测量大气能见度的反演方法。首先,根据 Fernald 后向积分模型,建立最大探测距离处的消光系数(即消光系数边界值)与整个探测通道上消光系数平均值之间的关系函数,并生成迭代公式;其次,根据对分法和弦截法的收敛性原理,选取两个合适的迭代初值;然后,基于迭代公式生成迭代序列并与设置的误差限进行比对;不断重复上述过程,直至满足终止条件,得到消光系数的初始边界值。基于 Fernald 后向积分法反演探测通道上的大气消光系数廓线;设定近地面某一参考高度为比对点,将该高度的反演结果与 Collis 斜率法^[10]求得的水平消光系数值进行对比。当两者的偏差大于设定的误差限时,则对边界值进行修正,并重新反演出新的消光系数廓线。不断重复上述过程,直至两者的偏差在设定的误差限以内。计算探测通道上消光系数分布的平均值,代入柯西米德方程求

得大气能见度值。仿真分析和实测试验表明,利用该反演方法,可以在迭代次数较少的情况下,得到较为准确的消光系数边界值,进而更准确地反演出大气的能见度值。

1 Fernald 反演算法的基本理论

激光在大气中传输过程中,会同时受到气溶胶微粒和大气分子的散射、吸收影响^[11]。Fernald 法将在传统的激光雷达方程的基础上将气溶胶和大气分子的贡献分别进行了考虑。此时,在探测距离 r 处的大气回波信号可由如下激光雷达方程表示^[12]:

$$P(r) = P_0 C r^{-2} [\beta_a(r) + \beta_m(r)] T_a(r) T_m(r) \quad (1)$$

式中: $P(r)$ 为探测距离 r 处回波信号的功率,单位为 W; C 为激光雷达的系统常数; $\beta_a(r)$ 为 r 处的气溶胶后向散射系数,单位为 $\text{km}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$; $\beta_m(r)$ 为 r 处的大气分子后向散射系数,单位为 $\text{km}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$; $T_a(r) = \exp[-\int_0^r \sigma_a(r) dr]$ 为气溶胶透过率, $T_m(r) = \exp[-\int_0^r \sigma_m(r) dr]$ 为大气分子透过率,其中 $\sigma_a(r)$ 和 $\sigma_m(r)$ 分别代表气溶胶和大气分子的消光系数。由 Fernald 法可知,气溶胶的消光后向散射比为 $S_a = \frac{\sigma_a(r)}{\beta_a(r)}$,大气分子的消光后向散射比为 $S_m = \frac{\sigma_m(r)}{\beta_m(r)}$ 。

因此,对于小于标定高度 r_m 的气溶胶消光系数可以表示为:

$$\sigma_a(r) = -\frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r) + \frac{X(r) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_m} \sigma_m(r) dr\right]}{\frac{X(r_m)}{\sigma_a(r_m) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r_m)} + 2 \int_r^{r_m} X(r) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_m} \sigma_m(r) dr\right] dr} \quad (2)$$

式中: $X(r) = p(r) \cdot r^2$ 为距离平方信号。

根据 Fernald 后向积分公式可以看出,若要通过激光雷达返回的信号反演出气溶胶消光系数廓线 $\sigma_a(r)$,需要预先知道 S_a 、 S_m 、 $\sigma_m(r_m)$ 和 $\sigma_a(r_m)$ 的取值^[13]。气溶胶的消光后向散射比 S_a 与探测器的波长、空气折射系数等因素有关,一般在 20 ~ 70 Sr 进行取值^[14]。在反演的过程中,通常认为气溶胶粒子的尺度谱分布以及化学成分不随高度变化,可以假设 $S_a = 50$ 。大气分子的消光后向散射比通常认为是一个常数, $S_m = \frac{8\pi}{3}$ ^[15]。因为大气分子的尺度和密度等分布情况基本不变,故大气分子的消光系数分布 $\sigma_m(r)$ 可以由美国标准大气分子模型得到。

通过式(2)计算大气消光系数廓线,然后利用柯西

米德能见度方程求得当前大气能见度值。能见度方程为:

$$V = \frac{3.912}{\sigma} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q \quad (3)$$

式中: V 为能见度值, σ 为探测区域内各点消光系数的平均值, λ 为发射的激光波长, q 为校正因子。

关于校正因子 q 的取值,结合 Kim 和 Kruse 能见度求解模型中关于校正因子 q 情况的划分,给出了校正因子 q 的取值范围如下:

$$q = \begin{cases} 0, & V \leq 0.5 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V \leq 1 \text{ km} \\ 0.16 V + 0.34, & 1 \text{ km} < V \leq 6 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V \leq 50 \text{ km} \\ 1.6, & V > 50 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

2 大气能见度反演算法

该算法的主要分为 3 个部分:消光系数初始边界值的确定、消光系数的反演和能见度的求解。该算法的主要流程如图 1 所示。

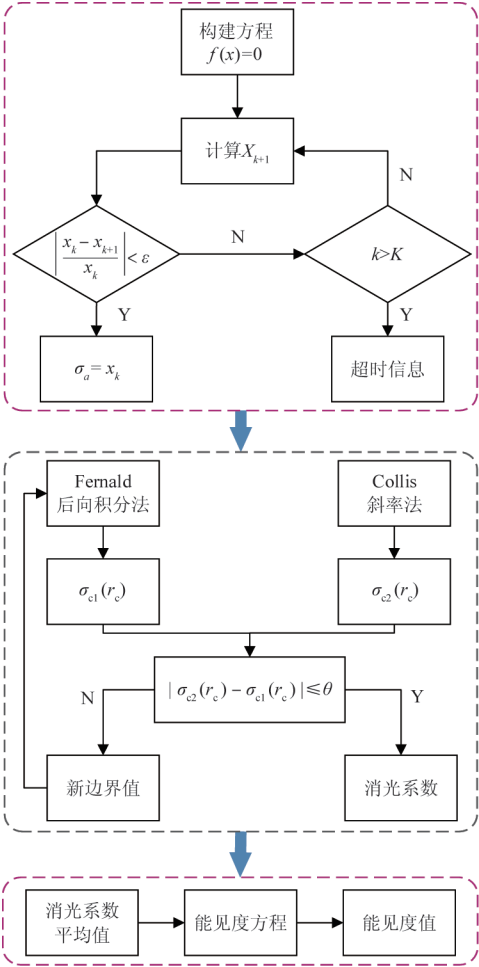


图 1 大气能见度迭代反演算法流程

Fig. 1 Flow chart of atmospheric visibility iterative inversion algorithm

1) 非线性方程的构建:假设有效测量距离 r_m 处的消光系数作为气溶胶消光系数的边界值 $\sigma_a(r_m)$, 并设置为 x 。从 r_m 处向前选取较小一段区间 (r_b, r_m) 。由于相隔距离较短,该区间内大气消光系数一般不会发生剧烈变化。

通过 Fernald 反演模型构建一个关于边界值 x 的非线性方程 $f(x) = 0$ 。由式(2)可推得该方程为:

$$f(x) = x - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_a(r_i, x) \tag{5}$$

式中: $n = \text{floor}\left(\frac{r_m - r_b}{\Delta r}\right)$, Δr 为激光雷达的距离分辨率。

2) 迭代公式的确定:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}(x_k - x_{k-1}) \tag{6}$$

3) 迭代序列的生成:利用迭代公式进行迭代,获得迭代序列 $\{x_k\}$ 。

4) 迭代停止条件的设置:设定迭代停止的条件如式(7)。

$$\left| \frac{x_k - x_{k-1}}{x_k} \right| < \varepsilon \text{ 和 } k > K \tag{7}$$

最后的迭代结果作为消光系数的初始边界值。

5) 消光系数的反演:以近地面某一高度 Collis 斜率法计算的水平大气消光系数为判定依据,比对该高度处边界初始值反演出的消光系数,迭代修正初始边界值。如果误差大于 θ ,则说明该边界初始值不合理,需要继续修正;如果误差小于 θ ,停止进行迭代,获得消光系数。

6) 能见度的求解:计算探测通道上消光系数的平均值,代入柯西米德方程求解大气能见度。

3 仿真与实验对比验证分析

针对微脉冲激光雷达测量大气能见度的应用背景,根据安装在中国气象局南京综合观测基地(32.2°N, 118.7°E)的微脉冲激光雷达的系统参数(表 1)^[16]结合美国标准大气分子消光模式和气溶胶粒子的消光模式进行数值仿真和实验分析。

表 1 微脉冲激光雷达的系统参数

Parameter	Index
波长/nm	532
脉冲能量/μJ	3.8
分辨率/km	0.03
脉皮重复频率/kHz	5

美国标准大气分子消光模式和气溶胶粒子的消光模式分别由式(8)和(9)表示。

$$\beta_m(r) = 1.54 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-r}{7}\right)$$
$$\sigma_m(r) = \beta_m(r) \times \frac{8\pi}{3} \tag{8}$$

$$\beta_a(r) = 2.47 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-r}{2}\right) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(r - 20)^2}{36}\right]$$
$$\sigma_a(r) = \beta_a(r) \times 50 \tag{9}$$

3.1 大气消光系数的仿真实验验证

图 2 所示是根据美国标准大气模型和式(1)得出的

0 ~ 8 km 的模拟回波信号。

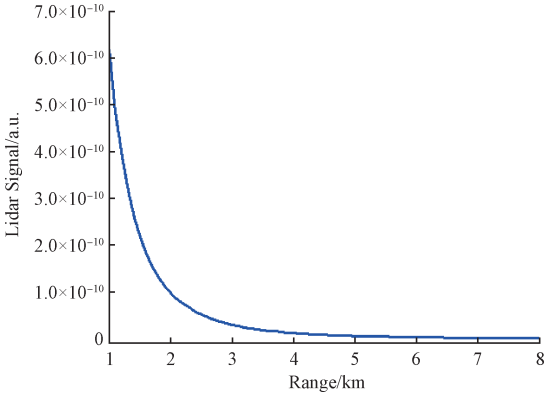


图 2 激光雷达仿真信号
Fig. 2 Lidar simulation signal

根据得到的激光雷达仿真回波信号,分别利用本文算法(Method01)和文献[8]中的算法(Method02)计算大气消光系数,并使用文献[5]中的 Fernald 算法,反演消光系数作为检测算法有效性的理论值。按照参考文献[6]中所提出的评价指标 AARE,对 Method01 和 Method02 所得到的结果进行比较。

评价指标 AARE 定义为:

$$AARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\sigma_i - \sigma'_i}{\sigma_i} \right| \tag{10}$$

式中: σ_i 为大气消光系数的理论假设值, σ'_i 是大气消光系数的实际反演值。

利用上述 3 种方法进行消光系数的反演,得到的结果如图 3 所示。此时,设置的边界值为 $0.003\ 1\ \text{km}^{-1}$,该值作为理论真值。Method02 的边界初值设置为 $0.09\ \text{km}^{-1}$,通过 9 次迭代确定满足条件的边界值为 $0.004\ 5\ \text{km}^{-1}$ 。Method01 设置的边界初值为 0.09 和 $0.08\ \text{km}^{-1}$,通过 6 次迭代之后边界值为 $0.005\ 6\ \text{km}^{-1}$,再经过两次修正确定最终的边界值为 $0.003\ 6\ \text{km}^{-1}$ 。如

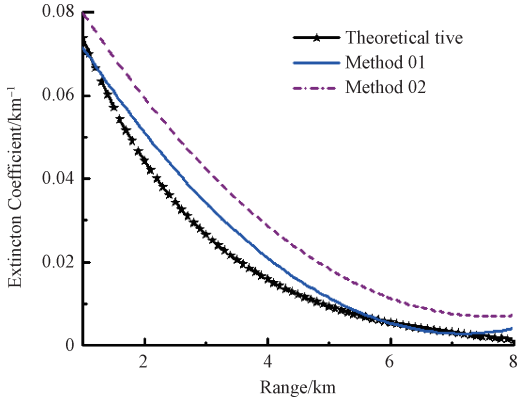


图 3 3 种大气消光系数反演算法的结果对比
Fig. 3 Comparison of three algorithms for atmospheric extinction coefficient inversion

图 3 所示,Method01 和 Method02 的反演结果与理论值的变化趋势基本一致,利用 Method02 反演出的消光系数廓线与理论值偏差较大,AARE 为 56.39%,而 Method01 的 AARE 为 17.75%。

3.2 大气能见度的实际测量

为验证本文方法在能见度测量的方面的可行性,使用南京综合观测基地 2009 年 1 月 1 日微脉冲激光雷达回波信号进行验证。根据系统的测量情况,设置有效探测范围起点 r_0 为 0.3 km,终点 r_m 为 6.89 km,距离分辨率为 $0.03\ \text{km}^{[17]}$ 。图 4 所示为回波信号,图 5 所示为本激光雷达系统的重叠因子。

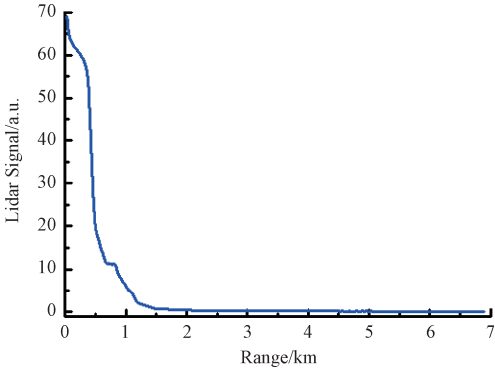


图 4 激光雷达回波信号
Fig. 4 Lidar echo signals

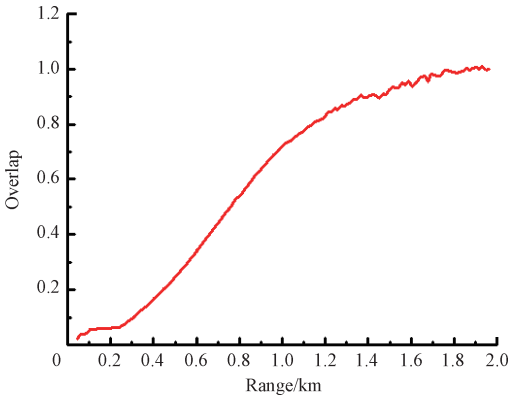


图 5 激光雷达系统的几何重叠因子
Fig. 5 Geometric overlap factor of lidar system

根据激光雷达回波信号和系统的重叠因子^[18],分别利用上述 3 种方法对消光系数进行反演,消光系数廓线如图 6 所示。此处选取的有效测量距离 r_m 为 6.89 km,利用传统的 Fernald 方法,得到的边界值为 $0.030\ \text{km}^{-1}$,该方法得到的反演结果为理论值。Method02 的边界初值设置为 $0.09\ \text{km}^{-1}$,通过 3 次迭代得到满足条件的边界值为 $0.025\ \text{km}^{-1}$ 。Method01 设置的边界初值为 0.09 和 $0.08\ \text{km}^{-1}$,通过 2 次迭代和 1 次修正确定最终的边界值

为 0.031 km^{-1} 。Method01 比 Method02 减少了 1 次迭代, 却多了 1 次修正过程。但是, 从图 6 反演的结果上, 利用 Method02 反演出的消光系数廓线与理论值偏差较大, AARE 为 75.41%, 而 Method01 的 AARE 为 19.64%, 本文方法在反演的精度上更具有优势。

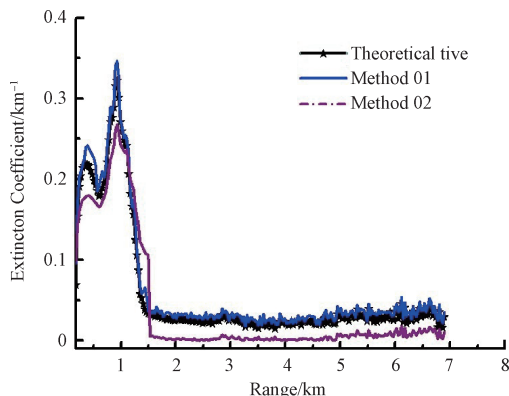


图 6 实测信号的反演结果对比

Fig. 6 Comparison of inversion results of measured signals

本文所提出的方法, 通过弦截法确定消光系数边界初值, 并利用比对迭代的方法修正该初值, 获得更为准确的边界值, 运用此方法在相同的情况下, AARE 为 19.64%, 比 Pan 提出的方法降低了 55.77%, 具有较高的准确性。

图 7 所示为根据观测基地 2009 年 1 月 1 日的测量数据利用本文方法得到的该地从 0 点到 23 点的能见度变化曲线。

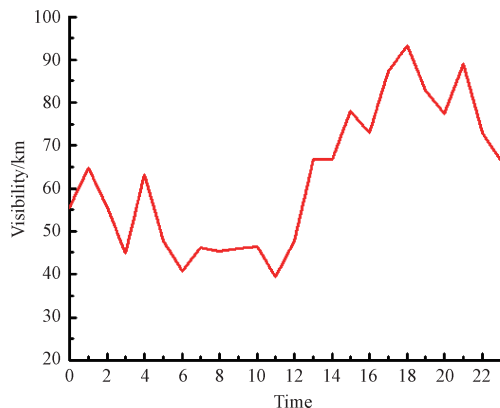


图 7 观测周期内能见度的变化趋势

Fig. 7 Visibility variation trend during the observation period

4 结 论

本文提出了一种基于微脉冲激光雷达的大气能见度反演方法, 通过构建非线性方程利用弦截法求解气溶胶消光系数边界值, 迭代次数少, 收敛速度快, 经过对比迭

代修正边界值, 获得更准确的大气消光系数廓线, 进而计算得到较为精确的大气能见度值。通过理论仿真和对实时测量数据的反演, 证实了本方法的有效性和可行性, 具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 赵太飞, 康博伦. 日盲紫外光霾粒子光散射测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1432-1437.
ZHAO T F, KANG B L. Research on light scattering measurement method of haze particles at blind UV[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(9): 1432-1437.
- [2] 李辰宇, 程智, 陈锋, 等. 基于 LabVIEW 的大气气溶胶实时监测系统的设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 87-91.
LI CH Y, CHENG ZH, CHEN F, et al. Design of atmospheric real-time monitoring system based on LabVIEW[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 87-91.
- [3] 卢家亮, 鲁昌华, 蒋薇薇, 等. 数字摄像法测量白天能见度算法设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1262-1267.
LU J L, LU CH H, JIANG W W, et al. Design of measuring daytime visibility algorithm of digital photography[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(11): 1262-1267.
- [4] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211.
- [5] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652.
- [6] 熊兴隆, 冯师, 蒋立辉, 等. 一种新的大气消光系数边界值确定方法[J]. 光电. 激光, 2011, 22(11): 1699-1705.
XIONG X L, FENG SH, JIANG L H, et al. A novel method for determining the boundary value of the atmospheric extinction coefficient[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(11): 1699-1705.
- [7] CAO N W, YANG F K, ZHU C X. Improving the accuracy of aerosol extinction coefficient inversion[J]. Optics & Spectroscopy, 2014, 116(4): 699-703.
- [8] PAN Y B, LU D R, PAN W L. A new method for aerosol retrieval based on lidar observations in Beijing[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2014, 7(3): 203-209.
- [9] MARCHANT C C, MOON T K, GUNTHER J H. An iterative least square approach to elastic lidar retrievals

- for well characterized aerosols[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48 (5): 2430-2444.
- [10] COLLIS R T H, FERNALD& F G, LIGDA M G H. Laser radar echoes from a stratified clear atmosphere[J]. Nature, 1964, 203(4951):1274-1275.
- [11] YAN Q, HUA D, WANG Y, et al. Observations of the boundary layer structure and aerosol properties over Xián using an eye-safe mie scattering lidar [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 122(83):97-105.
- [12] LI M, JIANG L H, XIONG X L, et al. A method based on iterative morphological filtering and multiple scattering for detecting layer boundaries and extinction coefficients with lidar[J]. Optical Review, 2016, 23(4): 646-656.
- [13] JI H Z, CHEN S Y, ZHANG Y C, et al. Calibration method for the reference parameter in Fernald and Klett inversion combining Raman and Elastic return [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016, 188(2017): 71-78.
- [14] OMAR A H, WINKER D M, KITAKA C, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2009, 26(10): 1994-2014.
- [15] SASANO Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993 [J]. Applied Optics, 1996, 35(24):4941-4952.
- [16] 祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5):16-22.
- ZHU C X, CAO N W, YANG F K, et. al. Micro pulse lidar observations of Aerosols in Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5):16-22.
- [17] CAO N W. New Lidar technology for aerosol measurements and extinction coefficient inversion [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(21): 3053-3057.
- [18] TANG F, MA S, YANG L, et al. A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments [J]. Atmospheric Environment, 2016, 143:229-236.

作者简介



李红旭, 2014 年于西安外事学院获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为激光大气探测。

E-mail: terrylee62@163.com

Li Hongxu received B. Sc. from Xi'an International University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest is laser atmospheric detection.



常建华(通讯作者), 分别在 2000 年和 2005 年于东南大学获得学士学位和博士学位, 现为南京信息工程大学教授, 主要研究方向为激光大气探测、固体激光器、光电传感器等。

E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

Chang Jianhua (Corresponding author) received B. Sc. and Ph. D. both from Southeast University in 2000 and 2005, respectively. Now he is a professor in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes laser atmospheric detection, solid state lasers and photoelectric sensor.