

# 激光雷达观测斜程能见度反演方法

田飞<sup>1,2</sup>, 罗佳<sup>1</sup>, 胡大平<sup>3</sup>, 叶一东<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088;  
3. 四川中物科技集团有限公司, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**目前基于激光雷达测量能见度的反演算法可以较为准确地反演均匀大气条件下的水平能见度,对云雨雾等非均匀大气条件下斜程能见度的准确反演较为困难。为了准确探测复杂大气条件下的斜程能见度,分析了激光雷达探测大气能见度的反演算法,重点针对非均匀大气条件下能见度难以准确反演的问题,提出了一种将 Collis 斜率法与 Klett 后向法相结合的能见度反演迭代算法,适用于不同天气条件下不同倾角路径平均能见度的反演。利用车载式激光雷达系统对能见度进行了实际测量,实验表明:在均匀大气条件下,该迭代算法与广泛使用的 Collis 斜率法和 Klett 后向法完全吻合;对于非均匀大气条件,该迭代算法也可克服 Collis 斜率法和 Klett 后向法的局限,更为快速稳定准确地反演出需要的大气能见度信息。

**关键词:**激光雷达;斜程能见度;消光系数;气溶胶;迭代算法

**中图分类号:** TN958.98    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.008

## Inversion algorithm for slant visibility based on lidar technique

TIAN Fei<sup>1,2</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, HU Da-ping<sup>3</sup>, YE Yi-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;  
2. Graduate School of China Academy of Engineering and Physics, Beijing 100088, China;  
3. Sichuan SINOEP Group Co., LTD, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Present inversion method for atmospheric visibility based on lidar technique is only able to inverse horizontal visibility accurately. Many disadvantages exist for slant visibility inversion in condition of inhomogeneous atmosphere such as rainy, cloudy and foggy. In order to measure slant visibility accurately, the principles of atmospheric visibility measurement with lidar was investigated, and experiments for visibility measurement with mobile lidar were conducted, especially a new iteration algorithm used for visibility inversion was posed. The algorithm is a combination of the well-known Collis slope method and Klett backward method, and it is able to retrieve the value of atmospheric visibility in different weather condition. The comparison experiment results show that this iteration algorithm agrees with Collis slope method and Klett backward method completely in condition of homogeneous atmosphere. For inhomogeneous atmosphere, this iteration algorithm can make up the shortages of Collis slope method and Klett backward method and retrieve the value of atmospheric visibility quickly, stably and accurately.

**Key words:** lidar; slant visibility; extinction coefficient; aerosol; iteration algorithm

## 1 引言

能见度的好坏直接影响人们的工作生活、水陆空交通运输、工农业生产、天文观测以及空间遥感遥测等,快速准确地探测不同天气条件下不同倾角路径的能见度具有十分重要的意义。目前基于激光雷

达的能见度反演算法能较为准确地反演均匀大气条件下的水平能见度<sup>[1-3]</sup>,对非均匀大气条件下斜程

作者简介:田飞(1986-),女,硕士研究生,主要从事激光技术与应用研究。E-mail:tianfeiwuli@sina.com  
收稿日期:2012-04-07;修订日期:2012-04-21

能见度的准确反演较为困难,但这些条件下能见度的准确探测具有很大的实际需求,如飞机起降路径能见度的观测、云雨雾天能见度的测量等。因此,本文重点针对非均匀大气条件下能见度难以准确反演的问题,提出了一种将 Collis 斜率法与 Klett 后向法相结合的能见度反演迭代算法,可快速稳定准确地反演出不同天气条件下不同倾角路径的平均能见度,并利用激光雷达的实际测量数据对该算法进行了对比验证。

## 2 基于激光雷达原理的能见度反演方法

根据激光雷达基本原理,单次米散射雷达接收到探测距离  $R$  处的回波信号功率可表示为<sup>[4-5]</sup>:

$$P(R) = \frac{CP_0}{R^2} \beta(R) \exp[-2 \int_0^R \sigma(R') dR'] \quad (1)$$

式中,  $P(R)$  为激光雷达接收到距离  $R$  处的回波信号功率;  $P_0$  为激光脉冲平均功率;  $C$  为雷达常数;  $\beta(R)$  为大气后向散射系数;  $\sigma(R')$  为大气消光系数。

求解上述米散射激光雷达方程,进一步求出测量路径上的大气消光系数  $\sigma$ ,即可反演出大气能见度  $V$ :

$$V = \frac{3.91}{\sigma} \left( \frac{550}{\lambda} \right)^q \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为测量波长,单位为 nm;  $q$  一般由以下经验公式给出<sup>[6]</sup>:

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V \leq 50 \text{ km} \\ 1.6, & V > 50 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

值得注意的是,当大气不均匀时,消光系数在测量路径上不均匀,计算能见度时应代入消光系数在测量路径上各点数据的算术平均值,所求能见度为测量路径上的平均能见度。

常用的能见度反演方法主要有以下两种:

### 2.1 Collis 斜率法

Collis 斜率法假设大气分布均匀,则方程(1)可写为<sup>[7-8]</sup>:

$$P(R) = \frac{CP_0}{R^2} \beta(R) \exp(-2\sigma R) \quad (4)$$

令  $S(R) = \ln[R^2 P(R)]$ , 上式两边取对数并对距离  $R$  求导,可得:

$$\frac{dS}{dR} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dR} - 2\sigma \quad (5)$$

在大气均匀分布的情况下,  $d\beta/dR = 0$ , 从而可求得大气消光系数:

$$\sigma = -\frac{1}{2} \frac{dS}{dR} \quad (6)$$

此方法可较为准确地反演出均匀大气条件下的能见度,且简单易行,从而得到了广泛的应用。但该方法存在严重缺陷,对非均匀大气条件下能见度的反演存在较大误差,不能满足实际需求。

### 2.2 Klett 后向法

Klett 方法首先假设大气消光系数  $\sigma$  和后向散射系数  $\beta$  之间存在如下关系<sup>[9-12]</sup>:

$$\beta = C_0 \sigma^k \quad (7)$$

式中,  $C_0$  为常数,与反演结果无关;  $k$  的取值范围一般为  $0.67 \sim 1$ <sup>[9]</sup>,与激光雷达的测量波长和气溶胶的性质有关。如果再假定  $k$  为常数,将假设式(7)代入米散射激光雷达方程(1)求解,可得到  $R \leq R_m$  处大气消光系数的稳定解:

$$\sigma(R) = \frac{\exp[(S - S_m)/k]}{\left\{ \sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_R^{R_m} \exp[(S - S_m)/k] dR' \right\}} \quad (8)$$

式中,  $R_m$  为参考距离,一般选取最大的有效探测距离,  $S_m = S(R_m)$ ,  $\sigma_m = \sigma(R_m)$ 。Klett 提出可以用 Collis 斜率法对  $\sigma_m$  进行估算:

$$\sigma_m \approx \frac{1}{2} \frac{S_0 - S_m}{R_m - R_0} \quad (9)$$

该反演方法对 Collis 斜率法进行了改进,成功克服了均匀大气条件的限制,但消光系数的反演结果依赖于  $\sigma_m$  的初值,初值偏小则反演的消光系数偏小,初值偏大则反演的消光系数会偏大,准确地给出  $\sigma_m$  的初值是该反演方法的难点,目前尚无有效的方法能准确地给出实际测量条件下  $\sigma_m$  的初值。

### 3 稳定的能见度反演迭代算法

为了快速准确稳定地反演出复杂天气条件下不同倾角路径的平均能见度,本文在 Collis 和 Klett 的工作基础之上,提出了一种稳定的能见度反演迭代算法,计算流程如图 1 所示。

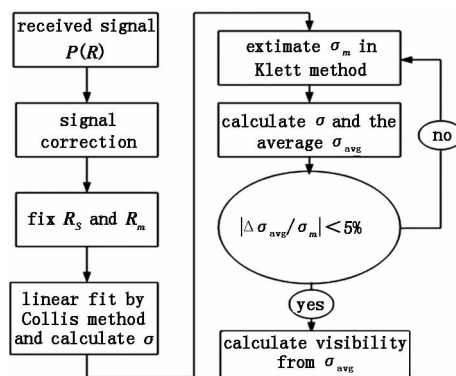


图1 迭代算法流程图

Fig. 1 flow chart of the iteration algorithm

(1) 读入原始雷达回波信号  $P(R)$ , 据雷达几何

重叠因子修正原始数据,去除本底(无激光回波时信号平均值作为背景噪声),确定有效数据起点  $R_s$ , 给定阈值信噪比计算阈值信号,确定最大反演距离  $R_m$ ;

(2)用 Collis 斜率法处理距离  $R_s$  至  $R_m$  修正后的回波信号,初步估算测量路径上的平均消光系数  $\sigma$ ,将估算的  $\sigma$  赋值给  $\sigma_m$ ,并根据  $\sigma$  估算能见度确定常数  $k$  的取值;

(3)将  $k$  的取值和  $\sigma_m$  的初值代入公式(8),计算各点的消光系数,再求得有效测量路径上( $R_s$  至  $R_m$ )的平均消光系数  $\sigma_{avg}$ ;

(4)将  $\sigma_{avg}$  与  $\sigma_m$  做差值,若误差大于设定的迭代误差(本文取5%),将  $\sigma_{avg}$  赋值给  $\sigma_m$  重新进行迭代;若误差满足要求,则输出  $\sigma_{avg}$  作为测量路径上的平均消光系数,进一步反演出需要的能见度信息。

该能见度反演迭代算法选取 Klett 后向法作为迭代主程序,使其具有了 Klett 后向法简单可靠、稳定性好、待定参数少以及误差来源少等优点,同时该算法还将 Collis 斜率法与 Klett 后向法相结合,使其较单一的 Collis 斜率法和 Klett 后向法具有明显的优势。首先,克服了 Collis 斜率法均匀大气假设的限制,适用于不同天气条件下不同倾角路径能见度的反演;其次,降低了能见度反演结果对消光系数初值  $\sigma_m$  的依赖程度,通过控制迭代精度,经过有限次迭代可求得大气消光系数的稳定解;最后,选用 Collis 斜率法估算 Klett 后向法的迭代初值  $\sigma_m$ ,可实现快速迭代。

4 激光雷达结构及技术参数

本激光雷达系统为车载式,可方便地用于外场测量,其基本结构如图2所示,该系统主要由激光发射光源、光学接收系统和信号接收采集系统三部分组成,各部分主要性能参数如表1所示。

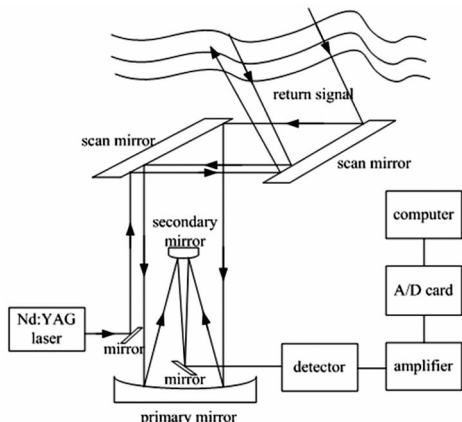


图2 车载式激光雷达结构示意图  
Fig.2 schematic diagram of the mobile lidar

表1 车载式激光雷达主要技术参数

Tab.1 key parameters of the mobile lidar

laser transmitting part	optical receiving part	data acquisition part
laser:Nd:YAG	telescope:Cassegrain type	PMT:R7400U-04
wavelength:532 nm	diameter:450 mm	range:185 ~ 850 nm
pulse energy:300 mJ	blind range:200 m	peak wavelength:400 nm
repetition rate:10 Hz	scanner:two-mirror scanner	A/D card:CompuScope 14100
pulse width:60 ns	horizontal:0° ~ 360°	conversion rate:50 MHz
	vertical:-10° ~ 90°	dynamic range:16 bit

激光光源为 Nd:YAG 激光器,可输出 1064 nm, 532 nm,355 nm 和 266 nm 的激光,测量能见度时发射 532 nm 激光。雷达采用共孔径发射接收,扫描平面镜可进行俯仰和方位转动,以实现三维空间立体扫描。被测大气的后向散射光由卡塞格林望远镜接收,信号由扫描平面镜反射到接收主镜,经次镜聚焦,通过反射镜反射到探测器中,在探测器中依次通过聚焦透镜、小孔光阑、窄带滤光片等到达光电倍增管,再用前置放大器和数据采集卡对光电倍增管输出的微弱电信号进行处理,获取测量数据,并传送到计算机,进一步对数据进行处理,可获得需要探测的信息。

5 典型实验结果及对比分析

5.1 均匀大气条件下反演算法对比

图3给出了2011年3月29日16:14的雷达回波信号实验数据,路径倾角为8°。当日天气晴朗,大气中气溶胶粒子较少且分布较为均匀,雷达回波信号平缓衰减,可探测距离约为2 km。

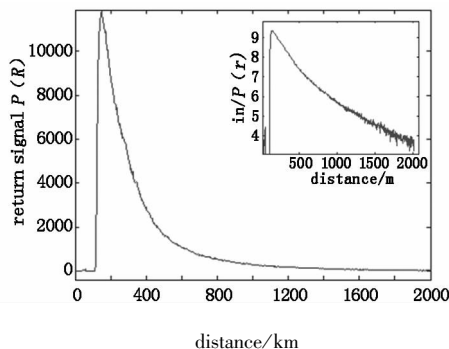


图3 车载式激光雷达回波信号

Fig.3 return signal of the mobile lidar

采用 Collis 斜率法对数据进行处理,最小二乘拟合结果如图4所示,结果显示在大气较为均匀的情况下, $S(R)$ 随距离  $R$  几乎线性减小,线性拟合残差较小,路径平均消光系数  $\sigma$  约为  $3.45 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,对应能见度为 11.82 km。

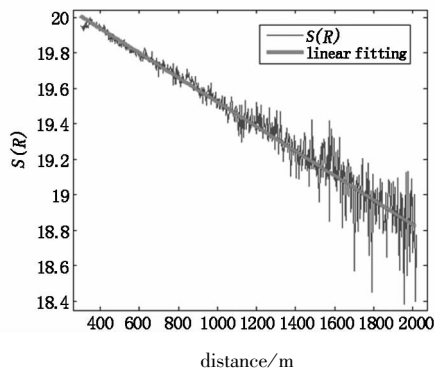
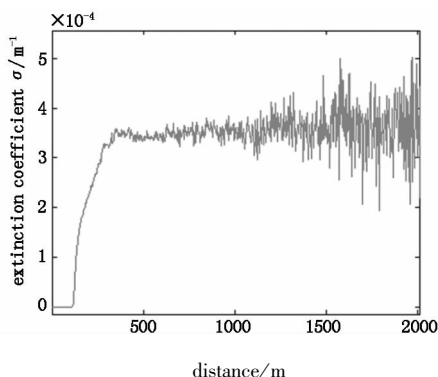


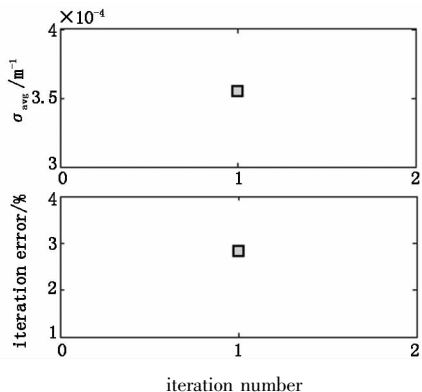
图4 S(R)和距离R线性拟合图

Fig. 4 linear fit of S(R) and distance

将 Collis 斜率法估算的消光系数代入公式(9)进行迭代,经一次迭代误差就小于预先设定的5%,迭代结果如图5所示,可以看出,在大气较为均匀的情况下,消光系数随距离均匀分布,最终算得测量路径上的平均消光系数  $\sigma$  约为  $3.55 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,对应能见度约为 11.50 km,与 Collis 斜率法估算的能见度 11.82 km 较为接近,相对误差仅为 2.7%。



(a) iteration results of extinction coefficient



(b)  $\sigma_{\text{avg}}$  and iteration error

图5 均匀大气条件下迭代结果及误差分析

Fig. 5 iteration results and error of homogeneous atmosphere

实验结果表明,对于均匀大气条件,该迭代算法与广为使用的 Collis 斜率法和 Klett 后向法(该算法一次迭代即为 Klett 后向法)具有良好的一致性,在均匀大气条件下是适用的。

### 5.2 非均匀大气条件下反演算法对比

同年 8 月 11 日,天气多云,图 6 为当日 15:39 的雷达回波信号,路径倾角为  $39^\circ$ 。由图 6 可见,多云天气溶胶分布不均匀,雷达回波信号不平滑,在 1.35 km 处有明显的增强,可探测距离约为 1.6 km。

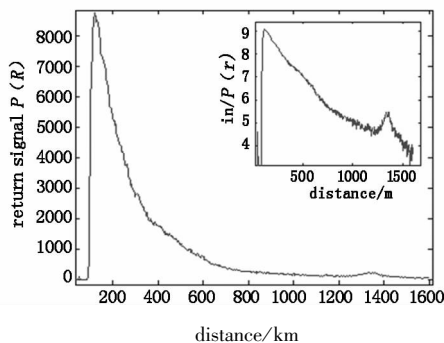


图6 车载式激光雷达回波信号

Fig. 6 return signal of the mobile lidar

Collis 斜率法处理结果如图 7 所示,估算的消光系数  $\sigma$  约为  $2.13 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,对应能见度为 19.26 km,此时 S(R) 与距离 R 线性相关性小,该反演方法存在较大的误差,不适用于非均匀大气条件下能见度的探测。

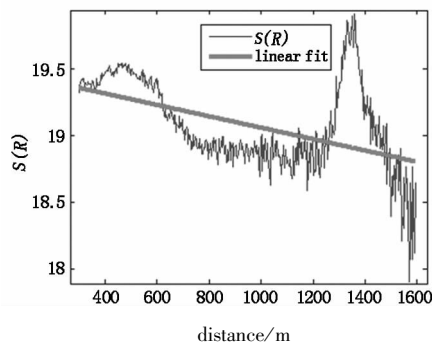


图7 S(R)和距离R线性拟合图

Fig. 7 linear fit of S(R) and distance

用该迭代算法对上述数据处理的结果如图 8 所示,消光系数随距离分布并不均匀,1.35 km 处消光系数明显增加,采集数据时在红外相机中观察到此处有云朵飘过,应该是造成此处消光系数增加的主要原因。局部消光系数增加时,Collis 斜率法估算的平均消光系数会偏小,使其反演的能见度大于实际值。同时该迭代算法  $\sigma_m$  的初值也会偏小,需五次迭代误差才小于 5%,首次和第五次迭代算得的消光系数分布如图 8(a) 所示,消光系数随迭代次数的增加而逐渐增加且趋于稳定。第一次迭代(Klett 方法)的平均消光系数  $\sigma_1$  约为  $2.70 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,对应能见度约为 15.12 km,最终算得的平均消光系数  $\sigma_5$

约为  $3.82 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ , 对应能见度约为 10.69 km, 明显小于 Collis 斜率法估算的 19.26 km, 相对误差为 44.5%, 也小于 Klett 方法估算的 15.12 km, 误差为 29.3%。

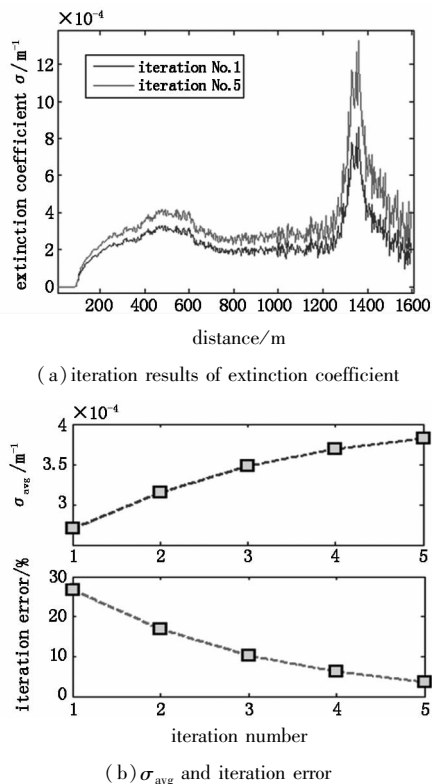


图8 非均匀大气条件下迭代结果及误差分析

Fig.8 iteration results and error of inhomogeneous atmosphere

同样有实验数据表明,当测量路径上出现洁净层时,Collis 斜率法和 Klett 方法反演的能见度会小于实际值,该迭代算法依然可以弥补其不足,求出消光系数的稳定解准确地反演出相应的能见度。总之,当大气非均匀时,此迭代算法可以克服 Collis 斜率法和 Klett 后向法的局限,更为快速稳定准确地反演出大气能见度信息。

## 6 结论

能见度对海陆空交通运输以及空间探测遥感等活动都有重要的影响,准确探测复杂天气条件下不同倾角路径的平均能见度具有非常重要的意义。本文用激光雷达对能见度进行了探测,并提出了一种将 Collis 斜率法与 Klett 后向法相结合的能见度迭代算法,可快速稳定准确地反演出不同天气条件下不同倾角路径的平均能见度。实验对比表明,在均匀大气条件下,该迭代算法与广泛使用的 Collis 斜率法和 Klett 方法完全吻合;对于非均匀大气条件,该迭代算法也可克服 Collis 斜率法和 Klett 方法的局限,更为快速准确地反演出需要的大气能见度信息。

## 参考文献:

- [1] Xie Chenbo, Han Yong, Li Chao, et al. Mobile lidar for visibility measurement [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 971 - 975. (in Chinese)  
谢晨波, 韩勇, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 971 - 975.
- [2] Sun Zhaobin, Guo Jinjia, Liu Zhishen, et al. Visibility measurement over the horizontal path by means of micro-pulsed lidar [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 200 - 202. (in Chinese)  
孙兆滨, 郭金家, 刘智深, 等. 微脉冲激光雷达测量大气水平能见度 [J]. 激光技术, 2007, 31(2): 200 - 202.
- [3] Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. An algorithm for horizontal visibility based on lidar [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(12): 1250 - 1252. (in Chinese)  
韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于激光雷达的水平能见度自动反演算法 [J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1250 - 1252.
- [4] Francesc Rocadenbosch, Gregori Vazquez, Adolfo Comeron. Adaptive filter solution for processing lidar returns: optical parameter estimation [J]. Appl Opt, 1998, 37(30): 7019 - 7034.
- [5] Vladimir A Kovalev. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios [J]. Appl Opt, 1993, 32(30): 6053 - 6065.
- [6] Yue Bin, Dong Jingjing, Sun Dongsong, et al. Measuring method of atmospheric slant visibility with semiconductor lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 38(1): 135 - 139. (in Chinese)  
岳斌, 董晶晶, 孙东松, 等. 半导体激光雷达的斜程能见度测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2003, 38(1): 135 - 139.
- [7] Kunz D, Gerand J, Leeu W, et al. Inversion of lidar signals with the slope method [J]. Appl Opt, 1993, 32: 3249 - 3256.
- [8] Legal T, Legal L, Lehn W. Measuring visibility using digital remote video cameras [C]. American Meteorological Society 9<sup>th</sup> Sympon Met Observ & Instr, 1994: 87 - 89.
- [9] James D Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211 - 220.
- [10] James D Klett. Lidar calibration and extinction coefficients [J]. Appl Opt, 1983, 22(4): 514 - 515.
- [11] James D Klett. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios [J]. Appl Opt, 1985, 24(11): 1638 - 1643.
- [12] James D Klett. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion [J]. Appl Opt, 1986, 25(15): 2462 - 2464.