

含有突变信号的激光雷达能见度反演

冯 帅¹, 蒋立辉², 熊兴隆², 马愈昭²

(1. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300; 2. 中国民航大学 民航气象研究所, 天津 300300)

摘要: 激光雷达进行大气能见度探测时, 当探测路径上存在云、雾、烟尘或硬目标时, 大气消光系数会在局部发生显著变化, 表现为激光雷达回波信号在原有衰减趋势上出现突变。受此影响, 直接使用现有算法将导致能见度反演精度低或错误反演。为此提出一种将突变点定位、消光系数边界值确定、消光系数迭代反演相结合的能见度反演算法。首先查找、定位突变信号所在位置; 然后剔除突变点, 利用斜率法得到消光系数边界值; 最后基于 Fernald 法, 以迭代方式反演大气消光系数及能见度。对两种典型大气消光模式的仿真实验表明, 该算法提高了能见度反演精度, 能够获得更为准确的全局能见度。利用自行研制的激光雷达能见度仪实测回波数据也验证了该算法的有效性。

关键词: 激光雷达; 突变点; 消光系数边界值; 大气能见度

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0330001

Lidar visibility inversion with breakpoint signal

Feng Shuai¹, Jiang Lihui², Xiong Xinglong², Ma Yuzhao²

(1. Engineering Technical Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Civil Aviation Meteorological Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: When lidar is used to detect atmospheric visibility, if cloud, fog, smoke, dust or the hard target exist in the detection path, the atmospheric extinction coefficient will change significantly in the local area, then the lidar return signals occur mutate against the original attenuation trend along with distance. Affected by it, using existing algorithm directly will cause the accuracy of visibility inversion low or wrong inversion. A combination visibility inversion algorithm including breakpoint location, extinction coefficient boundary value determination, extinction coefficient iterative inversion was proposed. Firstly, the breakpoint signal was found and located; Secondly, breakpoint was excluded by using slope method to acquire extinction coefficient boundary value; Finally, atmospheric extinction coefficient and visibility based on Fernald algorithm were inverted. According to the simulation experiments of two kinds of typical atmospheric extinction model, the accuracy of visibility inversion is improved, the more accurate global visibility is obtained. The validity of the proposed algorithm is also been verified by using real return signals of the lidar visibility meter developed by ourselves.

Key words: lidar; breakpoint; extinction coefficient boundary value; atmospheric visibility

收稿日期: 2016-07-07; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1433202, U1533113); 中央高校基本科研基金(3122016D007)

作者简介: 冯帅(1983-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光电探测方面的研究。Email: fengshuai2004@126.com

通信作者: 蒋立辉(1964-), 男, 教授, 博士后, 主要从事激光雷达探测、图像处理及光电子技术等方面的研究。Email: jlhhit@163.com

0 引言

大气能见度作为表征大气透明度的一个重要指标,可反映大气的光学状态,预示天气变化。它不仅是气象观测的常规项目,对军事活动、环境监测、交通运输都产生重要影响^[1],特别是航空飞行。根据英国民航局对1997~2006年全球重大飞行事故间接因素中与天气相关因素的统计,低能见度占比高达31.4%^[2],加强能见度观测对保障航空飞行安全意义重大。

激光雷达能见度仪是继透射式、前向散射式能见度仪之后一种新型的能见度观测设备。利用大气后向散射原理,通过直接探测激光与大气相互作用的后向散射信号定量计算大气能见度,具有探测范围大,测量结果代表性强,能测量斜程能见度等优点^[3-4]。

对于激光雷达能见度反演,在均匀大气中,回波信号在传输路径上受到气溶胶等大气介质的衰减,会随探测距离呈现衰减趋势。斜率法^[5]利用了回波信号的这种特点,通过最小二乘拟合求取回波信号对数距离校正信号的斜率获得大气消光系数,进而获得能见度。然而当探测路径上因云、雾、烟尘或硬目标的出现使大气非均匀时,大气消光的强弱变化将导致回波信号在探测路径上发生突变,表现为本应随探测距离呈衰减趋势的回波信号出现了急剧增强或急剧衰减的趋势,即信号突变。对该回波信号使用斜率法,将导致线性拟合区的错误选取,引起反演误差。Klett法^[6]、Fernald法^[7]虽然适用于非均匀大气条件下消光系数的反演,但消光系数边界值的确定是算法应用的难点。对于含有突变的回波信号,消光系数边界值更不易确定。Klett在参考文献[6]中利用斜率法估算边界值,但如前文所述,突变点的存在会导致估值误差过大。韩道文^[8]提出了一种改进的斜率法,通过初始选取并动态扩展线性拟合区,获得了良好的消光系数拟合值,但该方法对回波信号的突变非常敏感,一旦有突变信号存在将导致反演误差。贺业红^[9]给出了一种利用最小二乘拟合估算消光系数边界值的方法,但需人为判断天气情况,再处理回波信号求解边界值,过程繁琐。熊兴隆^[10]提出依据函数不动点原理求取消光系数边界值的迭代算法,但

突变点的存在会影响估算精度,迭代次数也会相应增加。因此为准确得到消光系数边界值,消除突变点影响是非常必要的。微分零交叉法可用于突变点的查找,通过对回波信号求微分,根据微分信号的过零点判别突变点,但信噪比较低时,回波信号会出现较大起伏,微分信号的零点过多易造成误判,突变点难以确定。毛飞跃^[11]提出一种改进的微分零交叉法,通过参考当前信号强度特性和其前后时刻的回波信号信息,修正了一些较为明显的误判,但由于需要参考点前后时刻的回波信号,识别过程较为繁琐。

为此,文中提出一种能见度反演算法。该算法将突变点定位、消光系数边界值确定、消光系数迭代反演相结合,在获得突变点信息的基础上,确定消光系数并反演能见度。该算法的优点是:(1)能够定位突变信号的起止点,给出云、雾、烟尘及硬目标的位置;(2)剔除突变信息后,能够还原回波信号的衰减趋势,给出较为精确的消光系数边界值;(3)采用基于Fernald的迭代算法,以有限次迭代反演得到大气能见度,有效提高反演精度。

1 激光雷达典型回波信号

激光雷达系统主要包括激光器、发射光学单元、接收光学单元、探测及信号处理单元等。根据激光雷达构成,激光雷达方程可表示为:

$$p(r) = Cr^{-1} Y(r) \beta(r) \exp(-2 \int_0^r \sigma(r') dr') \quad (1)$$

式中: $p(r)$ 为激光雷达接收到的大气后向散射回波信号功率(W); C 为激光雷达常数($W \cdot km^3 \cdot sr$); $p(r)$ 为探测距离(km); $Y(r)$ 为系统几何重叠因子; $\beta(r)$ 为大气后向散射系数($km^{-1} \cdot sr^{-1}$); $\sigma(r)$ 为大气消光系数(km^{-1})。

激光雷达系统框图及典型回波信号如图1所示。图中纵坐标为回波信号功率,横坐标为系统探测距离。对于离轴光学系统,受几何重叠因子的影响,0.1 km以内,发射激光束尚未进入接收视场,接收信号为零;0.1~0.2 km,收发视场逐渐重合,回波信号逐渐增强;0.2 km以后,收发视场完全重合,回波信号达最大值。此后,若大气分布均匀,回波信号强度会随探测距离的增加而衰减。但如果探测路径上某处有云、雾、烟尘或硬目标出现,回波信号强度会突

然增强,如在 0.7 km 出现了一个附加峰值,即信号突变。如果使用该回波信号反演能见度,将带来较大的反演误差。

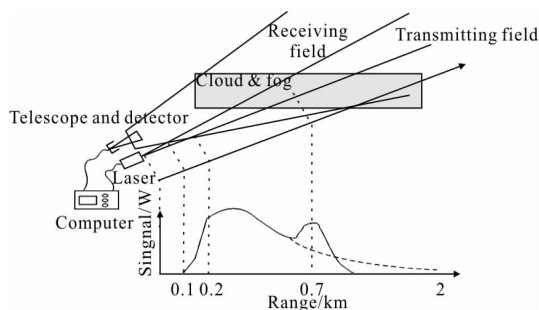


图 1 激光雷达工作原理及典型回波信号

Fig.1 Lidar principle and typical return signal

2 能见度反演算法

为避免突变点对能见度反演的影响,提高反演精度,能见度反演算法包括三部分,分别是突变信号定位、消光系数边界值确定和消光系数迭代反演。

2.1 突变信号定位

(1) 查找突变起点。首先判断激光雷达回波信号是否存在突变区,若存在则查找突变起点。设收发视场完全重合的距离为 r_0 ,远场区起点设为 r_n ,它们分别由系统几何重叠因子、回波信号信噪比决定。区间 (r_0, r_n) 为激光雷达回波信号数据有效区。为判断有效区内是否存在突变,计算 r_0 后各采样点的对数距离校正信号 $S(r)$ 及其一阶前向差分:

$$S(r) = \ln[p(r) \cdot r^2] \quad (2)$$

$$\Delta S_i = S(r_{i+1}) - S(r_i) \quad (3)$$

将该值与预先设定的阈值 G 进行比较, G 为 r_i 前五点一阶前向差分平均值 k 倍的绝对值。这样选取阈值是因为消光系数强弱变化引起回波信号的突变远大于正常的衰减变化,该阈值能有效辨识突变

起点。

$$\Delta \bar{S}_i = \frac{1}{5} \sum_{i-4}^i \Delta S_i \quad (4)$$

$$G = k \times |\Delta \bar{S}_i| \quad (5)$$

突变起点查找过程是:如果 $\Delta S_i \geq G$,直接判断当前点 r_i 为上升突变起点。如果 $0 < \Delta S_i < G$,为避免误判或漏判,继续计算 r_i 后续三点的一阶前向差分及这三点处 $S(r)$ 的均值,如果存在两点或两点以上点数的一阶前向差分大于零或 $S(r)$ 均值大于当前点 $S(r_i)$ 值,则 r_i 也为上升突变起点。否则,认为当前点不是上升突变起点,而是噪声引起的信号起伏。若已判断该点不是上升突变,则继续判断是否为下降突变起点,判断方法类似于上升突变。此过程持续到寻找到突变起点,标记为 r_{bps} ,或当前回波信号不存在信号突变,直接利用回波信号的有效区反演能见度。

(2) 确定突变终点。首先对区间 (r_0, r_{bps-1}) 的数据段进行最小二乘拟合,记录突变起点 r_{bps} 对应的拟合值 $S(r_{bps})$ 。然后将后续各点 $S(r)$ 值与 $S(r_{bps})$ 循环比较,直到这两点数值相近且满足在上升突变条件下为下降趋势或者在下降突变条件下为上升趋势为止。由此确定突变终点 r_{bpe} 。

2.2 消光系数边界值确定

通过以上步骤,可以确定突变区间为 (r_{bps}, r_{bpe}) 。分别对近场信息 (r_0, r_{bps}) 、远场信息 (r_{bpe}, r_n) 进行最小二乘拟合,然后综合近远场信息的拟合结果再次进行最小二乘拟合,最终可得到剔除突变点的大气回波信号。对该信号采用斜率法,可得到消光系数边界值。

2.3 消光系数迭代反演

采用基于 Fernald 法的迭代算法反演大气消光系数。Fernald 给出的消光系数的解为:

$$\sigma_a(r) = \frac{X(r) \exp[2(S_a - S_m)] \int_r^{r_m} \beta_m(r') dr'}{\frac{X(r_m)}{\sigma_a(r_m) + S_a/S_m \sigma_m(r_m)} + 2 \int_r^{r_m} X(r') \exp[2(S_a - S_m)] \int_r^{r_m} \beta_m(r'') dr''} - \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r) \quad (6)$$

式中: $X(r) = p(r)r^2$ 为距离校正信号; σ_a 为气溶胶消光系数; σ_m 为大气分子消光系数; $S_a = \sigma_a/\beta_a$, 为气溶胶消光后向散射比,取值在 40~60 之间; $S_m = \sigma_m/\beta_m = 8\pi/3$, 为大气分子消光后向散射比; β_m 可根据美国标准大气模式提供的大气分子密度的垂直廓线得到。

消光系数迭代反演的过程是:利用已确定的消光系数边界值 σ_a ,根据式(6)计算探测路径上各点消光系数均值 σ_{mean} ;然后判断 σ_a 与 σ_{mean} 的相对误差是否小于预先设定的迭代精度。若大于,将 σ_{mean} 作为消光系数边界值,继续迭代;若小于则停止迭代,将

σ_{mean} 作为最终的消光系数值。反演过程通过控制迭代精度，经过有限次迭代可求得大气消光系数的稳定解。

3 仿真实验及分析

回波信号的突变由大气消光系数的强弱变化引起。针对两种典型大气消光模式：弱大气消光到强大气消光和局部大气消光进行了仿真实验。仿真参数采用自行研制的激光雷达能见度仪系统参数。如表 1 所示。

表1 激光雷达能见度仪系统参数

Tab.1 Parameters of lidar visibility meter system

	Item	Parameters
Transmitter	Laser wavelength	905 nm
	Pulse width	100 ns
	Pulse energy	20 μJ
	PRF	5 kHz
Receiver	Optical diameter	50 mm
	FOV	1.2 mrad
	Filter bandwidth	5 nm
Detector	Quantum efficiency	38%
	Dark count	20 counts/s

3.1 弱大气消光到强大气消光

首先对大气消光由弱到强进行仿真。由于实际接收信号含有背景噪声、探测器的暗电流噪声和信号的散粒噪声，这些噪声会对反演结果产生一定影响，为了使反演结果更接近于实际情况，在回波信号中加入了利用 Monte-Carlo 方法模拟的噪声。图 2 给出了消光系数分布及其对应的回波信号。预设消光系数变化范围为 $0.62\sim 2.92\text{ km}^{-1}$ ，对应能见度范围为 $4\sim 1\text{ km}$ 。由图可见消光系数在 0.8 km 附近发生了突变，并直接反映在回波信号波形上。

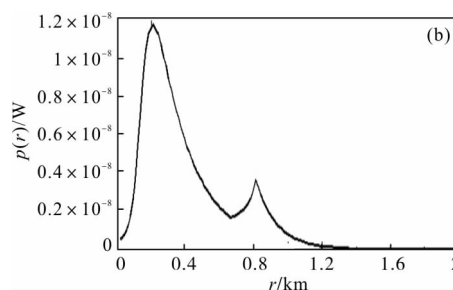
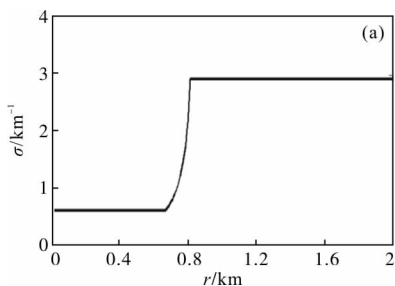


图 2 大气消光系数分布和回波信号

Fig.2 Atmospheric extinction coefficient distribution and return signal

图 3 为突变点识别过程。受几何重叠因子影响，收发视场完全重合的距离 r_0 为 0.435 km 。图中虚线表示近场数据区间 (r_0, r_{bps}) 的拟合结果，点划线表示远场数据区间 (r_{bps}, r_n) 的拟合结果，圆点表示查找到的突变区域。在 2 km 的探测路径上，确定的突变信号的起点为 0.675 km ，终点为 1.095 km ，这与所设定的消光系数模式基本一致，表明突变点定位准确，定位算法对该消光模式有效。这里需要说明的是，阈值 G 对突变点识别起到关键作用。阈值设置过大可能会漏掉突变点，过小又可能将噪声误认为是信号突变，因此需要合理选择阈值。图 4 中虚线是剔除突变点后，联合近、远场回波信号拟合的结果，该拟合

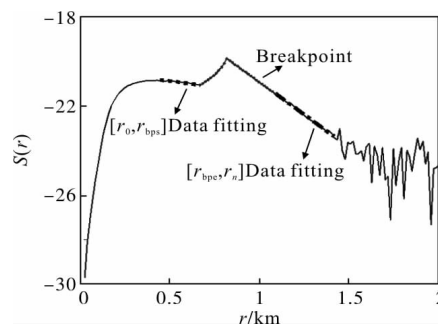


图 3 突变点识别过程

Fig.3 Breakpoint identity process

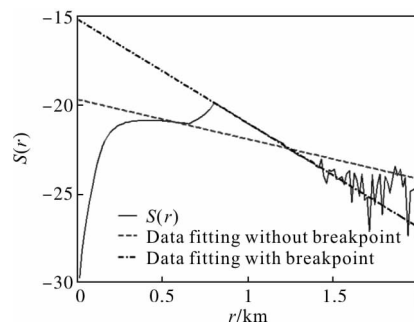


图 4 剔除突变点前后的拟合结果

Fig.4 Fitting results with & without breakpoint

值还原了回波信号的衰减趋势, 利用斜率法得到消光系数边界值 σ_1 为 1.1102 km^{-1} 。采用文中的迭代算法, 以 0.05 为迭代精度, 经过 3 次迭代得到消光系数的稳定解。反演得到的消光系数均值为 1.8737 km^{-1} , 对应能见度为 1.4962 km 。

作为对比, 使用参考文献[8]改进的斜率法求解消光系数边界值。该方法的思想是选取长度为 L 的 $S(r)$ 数据进行最小二乘拟合, 滑动一个采样距离, 再取长度为 L 的 $S(r)$ 进行最小二乘拟合, 该过程持续到系统最大探测距离处结束。然后比较历次拟合直线与 $S(r)$ 的平均标准偏差 SD, SD 小的为初步选取的线性区, 然后扩展线性区得到最终的线性拟合区。对于图 2 的回波信号, 当 $L=600 \text{ m}$ 时, $\sigma_2=2.9076 \text{ km}^{-1}$, 此时虽然选取了一段线性区(如图 4 中的点画线), 但因突变点的存在, 突变区被选择为线性拟合区, 偏离了回波信号原有衰减趋势, 得到的边界值偏大; 而当 $L=450 \text{ m}$ 时, $\sigma_3=0.6581 \text{ km}^{-1}$, 边界值又偏小。可见该方法依赖于 L 的选取, 且对突变点敏感, 易造成边界值的计算偏差。

图 5 给出了剔除突变点前后, 利用 σ_1 及文中迭代反演算法, σ_3 及 Fernald 后向积分法反演得到的消光系数分布。为评价反演效果, 以均方根误差 (RMSE) 作为评价标准, 以上二者消光系数反演值与真值的 RMSE 分别是 1.0601、1.3559。前者较后者小 0.2958, 可见在信号存在突变的情况下, 文中算法提高了消光系数反演精度。

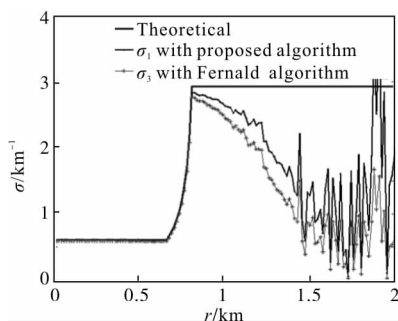


图 5 消光系数反演及分布

Fig.5 Extinction coefficient inversion and distribution

3.2 局部大气消光

为了增加普遍性, 仿真了局部大气消光的情况, 即大气消光先由弱到强, 再由强到弱。同样利用 Monte-Carlo 方法模拟噪声。图 6 给出了消光系数分布及其对应的回波信号。预设消光系数最大值为 2.92 km^{-1} , 最小值为 0.62 km^{-1} , 突变点位于 0.67 km 附近。

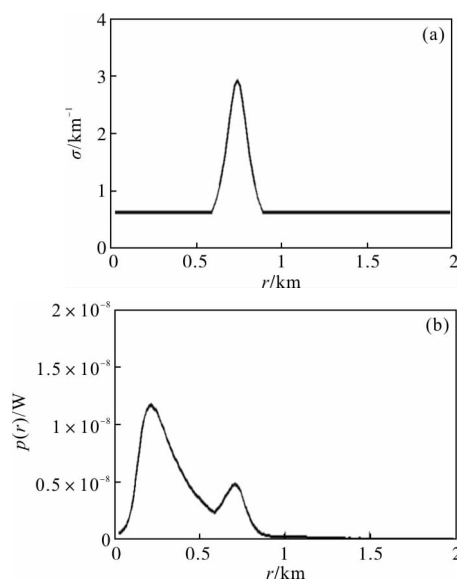


图 6 大气消光系数分布和回波信号

Fig.6 Atmospheric extinction coefficient distribution and return signal

图 7 为回波信号突变点识别过程。在探测路径上, 查找到的突变起点为 0.58 km , 终点为 0.84 km , 突变点查找结果与预设值依然保持一致, 说明突变信号定位算法对局部大气消光模式仍具有良好的适用性。图 8 为给出了剔除突变点前后, 消光系数边界值的拟合

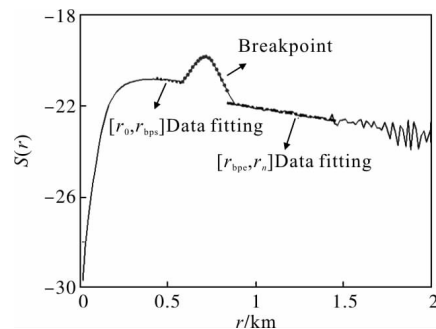


图 7 突变点识别过程

Fig.7 Breakpoint identity process

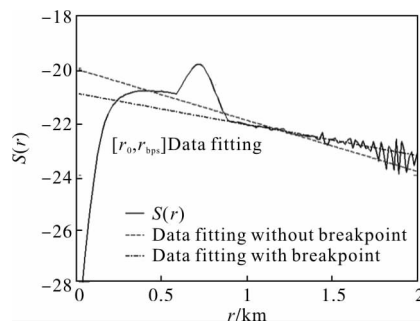


图 8 剔除突变点前后的拟合结果

Fig.8 Fitting results with & without breakpoint

结果。剔除突变点后,联合近、远场信息,利用斜率法求得的边界值 σ_1 为 0.9414 km^{-1} 。采用迭代算法,经过三次迭代得到消光系数均值为 1.3124 km^{-1} ,对应能见度为 2.0577 km 。而未剔除突变点时,当 $L=600 \text{ m}$ 时,改进的斜率法仅将远场数据作为线性区,得到的边界值 σ_2 为 0.5808 km^{-1} 。利用 σ_1 及文中迭代反演算法, σ_2 及 Fernald 后向积分法反演得到的消光系数分布如图 9 所示。二者消光系数反演值与真值的 RMSE 分别是 0.1469 、 0.2395 ,可见这种模式下,文中算法的反演结果仍更接近真值。

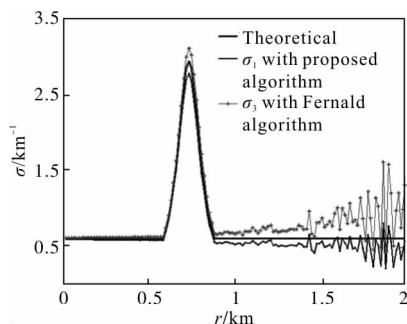


图 9 消光系数反演及分布

Fig.9 Extinction coefficient inversion and distribution

4 外场实验及分析

图 10 给出了 2013-03-31 夜间,利用自行研制的激光雷达能见度仪在仰角为 $2^\circ 40'$ 时(参考飞机降落时的下滑角)测得的斜程方向原始回波信号。直接反演该信号得到的斜程能见度为 3.93 km ,该值与观测到的水平能见度 4.32 km 接近。然而从图中可以看到,在斜程距离 1.515 km 附近,对应于垂直高度 70.5 m 处,回波信号出现了突变,说明有低云存在。由此可以判断,斜层能见度应明显比水平能见度小才更符合实际情况。

利用文中方法,查找得到回波信号的突变起点、终点分别位于斜程距离 1.515 km 处和 1.575 km 处。剔除突变点后,反演得到的斜程能见度均值为 2.86 km 。该值表明斜程能见度与水平能见度确实存在较大差别,与上述判断符合。同时表明,直接反演含有突变点的回波信号造成了较大的反演误差。在航空飞行中,当这种误差过大时,若仍以此作为飞机放行标准,会影响飞行安全。

目前民航机场只安装有水平能见度测量设备,但对斜程能见度观测的需求日益增加。这是因为相

比于水平能见度,斜程能见度更能满足飞机起降需求。文中提出的能见度反演算法,先行判断回波信号中是否存在突变点,再反演能见度,对回波信号进行了有效预处理,提高了斜程能见度反演精度,对激光雷达斜程能见度测量具有较强的应用价值。

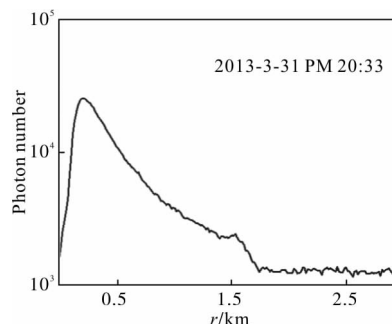


图 10 斜程方向原始回波信号

Fig.10 Slant original return signal

5 结论

激光雷达是探测斜程能见度的有效手段,但受探测路径上云、雾、烟尘或硬目标的影响,回波信号会发生突变,导致能见度在空间上分布不均匀,能见度反演精度也因此较低。文中针对含有突变点的回波信号,将突变点定位、消光系数边界值确定、消光系数迭代反演相结合,通过查找、定位突变点,还原回波信号衰减趋势,较为准确和简便地获得消光系数边界值;以迭代方式获取消光系数均值,进一步提高了消光系数反演精度,获得了更为客观的全局能见度。对弱大气消光到强大气消光,局部大气消光两种典型大气模式的仿真实验及激光雷达实测数据均表明该方法的有效性。除此,突变点定位方法作为能见度反演的一种数据预处理手段,可以与斜率法结合,提高线性数据区选择的准确度,从而提高水平能见度反演精度。

参考文献:

- [1] China Meteorological Administration. Ground Weather Observation Criterion [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. (in Chinese)
中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] Wang Xiucheng, Qi Linlin, An Jie, et al. Climatological characteristics of hazardous aviation weather in China offshore [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(3): 474-481. (in Chinese)

- 王秀成, 齐琳琳, 安洁, 等. 中国近海航空危险天气的气候特征[J]. 气象科技, 2015, 43(3): 474-481.
- [3] Lv Weiyu, Yuan Ke'e, Wei Xu, et al. A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lida [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 200-206. (in Chinese)
- 吕炜煜, 苑克娥, 魏旭, 等. 对流层气溶胶和水汽的车载激光雷达系统的探测 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 200-206.
- [4] Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai. Return signals processing method of Mie scattering lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 89-95. (in Chinese)
- 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅. Mie 散射激光雷达回波信号处理方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 89-95.
- [5] Collis R T H, Russell P B. Lidar Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption in Laser Monitoring of the Atmosphere [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1976, 14: 71-151.
- [6] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211-220.
- [7] Lv Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, et al. Two data inversion algorithm of aerosol horizontal distribution detected by MPL and error analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1774-1778. (in Chinese)
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 微脉冲激光雷达水平探测气溶胶两种反演算法对比与误差分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1774-1778.
- [8] 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.
- [9] He Yinghong, Andrew Yuk Sun Cheng, Cheng Juan, et al. Estimation of extinction efficient boundary value for Mie lidar return signal [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2004, 16(2): 149-152. (in Chinese)
- 贺应红, 郑玉臣, 程娟, 等. Mie 散射大气激光雷达回波信号消光系数边界值估算 [J]. 光散射学报, 2004, 16(2): 149-152.
- [10] Xiong Xinglong, Feng Shuai, Jiang Lihui, 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. (in Chinese)
- 熊兴隆, 冯帅, 蒋立辉, 等. 一种新的大气消光系数边界值确定方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1699-1705.
- [11] Mao Feiyue, Gong Wei, Li Jun, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3097-3102. (in Chinese)
- 毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演 [J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3097-3102.