

Mie 散射激光雷达回波信号处理方法

熊兴隆, 蒋立辉, 冯 帅

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 为了提高 Mie 散射激光雷达测量斜程能见度的精度, 提出了一种回波信号处理的组合算法。首先, 采用基于经验模式分解(EMD)的自适应算法, 去除回波信号中的高频噪声, 提高信噪比。其次, 采用基于不动点原理的迭代算法进行消光系数的反演, 它不需要准确的边界值就可计算消光系数均值, 同时还能得到准确的边界值, 可用于求取消光系数的分布。数值仿真表明: EMD 算法比五点三次平滑去噪算法输出信噪比提高 4.67 dB, 不动点迭代算法比最小二乘法估算消光系数边界值算法反演得到的消光系数均值的相对误差减小 31.50%, 而迭代次数只有 3~5 次, 因此该组合算法是有效的。

关键词: 斜程能见度; 消光系数; 不动点迭代法; 经验模式分解

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0089-07

Return signals processing method of Mie scattering lidar

Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To improve the slant visibility measuring accuracy of Mie scattering lidar, a combination algorithm for return signals processing was proposed. Firstly, the adaptive algorithm based on empirical mode decomposition (EMD) was applied to improve the SNR of return signals by removing the high frequency noise. Secondly, the iteration algorithm based on fixed point principle was used to invert extinction coefficient. Using this algorithm, the mean extinction coefficient could be calculated without the accuracy boundary value. Additionally, the accurate boundary value was obtained, via which the extinction coefficient distributing could be achieved. Numerical simulations show that the output SNR of EMD algorithm increases 4.67 dB compared with five point three times smoothing denoising algorithm; the relative error of mean extinction coefficient inverted by fixed point iteration algorithm is 31.50% smaller than the value obtained by the least square fitting algorithm for the estimation of the extinction coefficient boundary value. Furthermore, only 3 to 5 iterations are required. Therefore, the combination algorithm is effective.

Key words: slant visibility; extinction coefficient; fixed point iteration algorithm; empirical mode decomposition

收稿日期: 2011-05-12; 修订日期: 2011-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(60879016); 中央高校基本科研基金(ZXH2009B001); 中国民航大学科研启动基金(09QD14X)

作者简介: 熊兴隆(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事电子工程和激光探测方面的研究。Email: xx_long@126.com

0 引言

机场跑道能见度的准确测量,对于保障飞机的起降安全极为重要。目前,国内民航使用的机场跑道能见度测量仪器,只能测量水平能见度,不能测量斜程能见度。因此,斜程能见度的测量技术研究成为目前的研究热点。施德恒等^[1]报道了一种透射式跑道能见度激光测量仪,它虽然有回波信号强等优点,但需要空中合作目标物,使用不便。激光雷达^[2-3]通过接收回波信号反演大气消光系数,测量斜程能见度,具有很高的时空分辨率和测量灵敏度,并且不需要空中合作目标物,还能实现多仰角测量,是直接测量斜程能见度的最佳选择。然而,激光雷达回波信号较弱,加之在斜程方向上气溶胶与云、雾等分布经常出现较大的变化,大气并非均匀分布,且由于噪声的影响和现有算法限制性难以准确地反演出大气消光系数,造成测量斜程能见度的精度较低。因此,准确反演大气消光系数成为提高激光雷达斜程能见度测量精度的关键。

在采用 Klett 算法^[4]反演大气消光系数的过程中,需要估算最大有效测量距离 r_m 处的消光系数 σ_m ,即消光系数边界值。边界值在中等或高能见度天气状况下对反演精度具有重要影响^[5],而实际很难得到准确的边界值。 r_m 点在远端,信噪比较低,由于噪声的影响, r_m 点本身的位置很难确定。在估算边界值的算法中,Klett 提出了一种估算消光系数边界值的算法^[5],贺应红提出了一种利用最小二乘法估算消光系数边界值的算法^[6]。但这些算法的实质都是基于大气均匀假设的 Collis 斜率法^[7],不能摆脱 Collis 斜率法的使用条件限制。所以,当大气分布不均匀时,很难得到准确的消光系数边界值。鉴于此,文中提出了一种回波信号处理的组合算法。首先,采用基于经验模式分解^[7](EMD)的自适应算法对回波信号进行去噪,去除回波信号中的高频噪声,提高信噪比,同时也便于确定最大测量距离 r_m 。其次,采用一种新的基于不动点原理的迭代算法反演大气消光系数,不需要准确的边界值就可计算消光系数均值,同时还能得到准确的边界值,可用于求取消光系数的分布。通过数值仿真,对该组合算法的性能进行了评估,仿真结果表明,该组合算法对于提高测量斜程能见度的精度是有效的。

1 能见度测量原理

1.1 能见度测量原理

根据 Koschmieder 定律,能见度方程为:

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: V 为能见度; σ 为白光的大气消光系数; ε 为人眼对比感阈值,在航空领域,对以跑道为背景的标志,世界气象组织(WMO)和国际民航组织(ICAO)推荐取 0.05,于是有:

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{0.05} = \frac{2.996}{\sigma} \quad (2)$$

考虑到白光与 905 nm 激光传输上的差别,可按经验公式对公式(2)进行修正,修正之后,计算小于 6 km 能见度的方程为^[2]:

$$V = \frac{2.996}{\sigma_\lambda} \left(\frac{0.55}{0.905} \right)^{0.585V^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

式中: σ_λ 为 905 nm 激光的大气消光系数。

在测量斜程能见度时,消光系数 σ_λ 为斜程路径上各点大气消光系数的平均值,相应能见度为斜程路径的平均能见度。

1.2 大气消光系数反演算法

激光雷达方程给出了回波信号与大气消光系数和大气后向散射系数之间的定量关系,通过激光雷达方程可以反演出大气消光系数。以光电子数表示的激光雷达方程为:

$$N(r) = \frac{\eta \lambda P_0 \tau}{hcr} \Delta r Y(r) A_r \beta(r) \exp(-2 \int_0^r \sigma(r) dr) \quad (4)$$

式中: P_0 为激光脉冲发射功率,W; τ 为激光脉冲宽度,s; c 为光速,m/s; η 为探测器的量子效率; λ 为激光发射波长,nm; $h=6.626\ 276 \times 10^{-34}$ J·s,为普朗克常数; Δr 为距离分辨率; $Y(r)$ 为系统的几何重叠因子; A_r 为接收望远镜的有效面积,m²; $\beta(r)$ 为 r 处目标的后向散射系数,km⁻¹sr⁻¹; $\sigma(r)$ 为 r 处的大气消光系数,km⁻¹。

常见的大气消光系数反演算法如下。

(1) Collis 斜率法

Collis 给出了求解激光雷达方程的简单算法,其主要思想是令

$$S(r) = \ln[N(r)r^2] \quad (5)$$

式中: $S(r)$ 为激光雷达对数距离校正信号。

对公式(5)两边求微分得:

$$\frac{dS(r)}{dr} = \frac{1}{\beta(r)} \frac{d\beta(r)}{dr} - 2\sigma(r) \quad (6)$$

在大气均匀分布的情况下, $\frac{d\beta(r)}{dr} = 0$, 由此可以得到大气消光系数为:

$$\sigma(r) = -\frac{1}{2} \frac{dS(r)}{dr} \quad (7)$$

Collis 斜率法很简单, 但也有着严重的缺陷, 其应用的前提条件是大气均匀分布, 但是在大气中, 气溶胶与云、雾等分布经常出现较大的变化, 大气并非均匀分布的, 这样就极大地限制了斜率法的应用。

(2) Klett 反演算法

Klett 算法克服了均匀大气的限制, 从而得到广泛应用。Klett 首先假定大气后向散射系数和消光系数之间满足以下关系:

$$\beta(r) = C_0 \sigma^k(r) \quad (8)$$

其中, C_0 为常数; k 取决于激光雷达的波长与大气气溶胶的性质, 取值范围一般为 $0.67 \leq k \leq 1.0$ (文中取 k 值为 1)。

由公式(8)可得:

$$\frac{dS(r)}{dr} = \frac{1}{\sigma(r)} \frac{d\sigma(r)}{dr} - 2\sigma(r) \quad (9)$$

解非线性微分方程(9), 可以得到 $r \leq r_m$ 处的大气消光系数:

$$\sigma(r) = \frac{\exp[S(r) - S(r_m)]}{\frac{1}{\sigma(r_m)} + 2 \int_r^{r_m} \exp[S(r') - S(r_m)] dr'} \quad (10)$$

式中: r_m 为最大探测距离; $\sigma(r_m)$ 为 r_m 处的消光系数, 即消光系数边界值 σ_m 。

在 Klett 算法中, 消光系数边界值 σ_m 非常重要, 但却难以得到, 只能用 Collis 斜率法估算。Collis 斜率法本身存在缺陷, 对边界值的估算不准确。同时由于噪声的影响, r_m 点本身位置很难确定。这些都影响反演精度, 最终影响测量斜程能见度的精度。

2 数据处理方法

2.1 EMD 去噪

EMD 能将一个信号的能量按照时域各种固有尺度的波动进行分解, 得到一系列频率从小到大的

固有模态函数(IMF)。一个固有模态函数满足以下两个条件:(1)极大点和极小点个数之和与过零点的个数之差不超过一个;(2)分别由极大点和极小点构成的包络平均值应处处接近于零。由于噪声主要包含在高频 IMF 中, 通过选择若干适当的 IMF 和残余项进行重构, 从而实现去噪的目的。

EMD 分解流程为:(1)找出信号 $f(t)$ 的局部极大值与极小值, 分别用 3 次样条函数连接为一个上包络线 $v(t)$ 和下包络线 $u(t)$;(2)计算两条包络线的均值记作 $m_1(t) = \frac{1}{2} [v(t) + u(t)]$;(3)将均值从原始信号 $f(t)$ 中减掉得 $h_1(t) = f(t) - m_1(t)$;(4)检查 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件, 不满足则把 $h_1(t)$ 视为新的信号, 重复上述(1)~(4)的操作;否则, 分离出来的第一个 IMF 记为 $c_1(t) = h_1(t)$;(5) $r_1(t) = f(t) - c_1(t)$, 将 $r_1(t)$ 看成是新的信号重复以上步骤, 直至 $r_n(t)$ 变成一个单调函数或者成为仅有一个极点的函数时, 即不能再由 IMF 提取出来时, 此时的 $r_n(t)$ 称为余量。综合以上各式, 可以得到:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (11)$$

这样就可以把原始信号 $f(t)$ 分解成一组 IMF 的线性组合。信号的噪声(即高频部分)主要集中在最初的少数几个 IMF。用原始信号减去这几个 IMF, 即可去除噪声。

由以上可见, EMD 在去噪方面表现出较强的自适应性。与小波去噪方法相比, 其最大优点是可以从数据中自适应地得到基函数, 克服了小波变换中要选取合适小波基的困难, 是一种特殊的、具有小波变换优点的自适应去噪方法。

2.2 不动点迭代反演算法

采用不动点迭代法反演大气消光系数的主要思想是确定最大的测量距离 r_m , 假设 r_m 处的消光系数为 x (消光系数边界值), 得出探测路径上各点的消光系数 $\sigma(r, x)$ 以及消光系数平均值 $\sigma_{\text{mean}}(x)$ 的函数表达式。对函数 $\varphi(x) = \sigma_{\text{mean}}(x)$ 按不动点迭代法进行迭代, 其迭代结果就是消光系数平均值, 同时该值也是消光系数边界值。

函数的不动点是指被这个函数映射到其自身的一个点, 即函数 $\varphi(x)$ 的取值过程中, 如果有 x^* , 使 $x^* =$

$\varphi(x^*)$, 就称为的一个不动点。

不动点定理^[9]给出了函数不动点存在性和唯一性的条件。若函数 $\varphi(x)$ 满足以下两个条件:(1) 当 $x \in [a, b]$ 时, $\varphi(x)$ 连续可微;(2) 对任意 $x \in [a, b]$, 存在 $0 \leq L < 1$ 使 $|\varphi(x)| \leq L < 1$, 则函数 $\varphi(x)$ 在 $[a, b]$ 中存在唯一不动点 $x^* = \varphi(x^*)$ 。

求不动点的方法是迭代法。首先构建迭代公式 $x_{k+1} = \varphi(x_k)$, 然后给定一个初值 x_0 , 根据迭代公式可以计算出一个序列 $\{x_k\}$, 若序列 $\{x_k\}$ 收敛于 x^* , 则 x^* 就是函数 $\varphi(x)$ 的不动点。

收敛定理给出了迭代收敛时函数 $\varphi(x)$ 和初始值 x_0 应该满足的条件。若函数 $\varphi(x)$ 满足不动点定理的两个条件, 则对于任意初始值 $x_0 \in [a, b]$, 迭代公式 $x_{k+1} = \varphi(x_k)$ 产生的迭代序列 $\{x_k\}$ 收敛到 $\varphi(x)$ 在上的唯一不动点 x^* 。

不动点迭代反演算法流程图如图 1 所示, 具体过程如下。

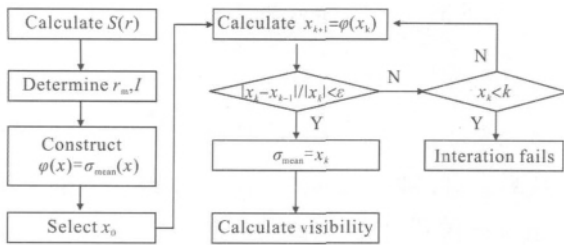


图 1 不动点迭代反演算法流程图

Fig.1 Flow chart of the fixed-point iteration algorithm

(1) 构建函数。探测路径上各点的消光系数表达式为:

$$\sigma(r, x) = \frac{\exp[S(r) - S(r_m)]}{\frac{1}{x} + 2 \int_r^{r_m} \exp[S(r') - S(r_m)] dr'} \quad (12)$$

式中: r_m 为由基线法确定的最大测量距离; x 为消光系数边界值; r 为斜程距离。

消光系数平均值 $\sigma_{\text{mean}}(x)$ 的表达式为:

$$\sigma_{\text{mean}}(x) = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^{I-1} \sigma(r_i, x) = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^{I-1} \frac{a_i}{\frac{1}{x} + b_i} \quad (13)$$

式中: $I = \text{floor}(\frac{r_m}{\Delta r})$, Δr 是距离分辨率; $r_i = \Delta r \cdot i$; $a_i = \exp[S(r_{i-1}) - S(r_i)]$; $b_i = 2 \int_{r_i}^{r_m} \exp[S(r') - S(r_i)] dr'$ 。

构建的函数为:

$$\varphi(x) = \sigma_{\text{mean}}(x) \quad (14)$$

由公式(13)可见, 函数 $\varphi(x)$ 是简单的初等函数, 它在区间 $(0, \infty)$ 上连续可微, 根据不动点定理, 函数 $\varphi(x)$ 在 $|\varphi(x)| < 1$ 时, 存在唯一不动点。

(2) 选取迭代初始值 x_0 。根据不动点迭代收敛条件, 选取迭代初始值 x_0 , 由收敛条件可以推导出 $|\varphi(x)| < 1$ 的收敛区间是:

$$x > X_0 = \frac{\sqrt{a_{\text{max}} - 1}}{b_{\text{min}}} \quad (15)$$

式中: $a_{\text{max}} = \max|a_i|$; $b_{\text{min}} = \min|b_i|$; 因此, 迭代初始值 x_0 的选取应该满足条件:

$$x_0 > X_0 = \frac{\sqrt{a_{\text{max}} - 1}}{b_{\text{min}}} \quad (16)$$

(3) 生成迭代序列。用迭代公式 $x_{k+1} = \varphi(x_k)$ 进行迭代, 生成迭代序列 $\{x_k\}$ 。

(4) 判断迭代停止条件。设定迭代停止的条件为:

$$\left| \frac{x_k - x_{k-1}}{x_k} \right| < \varepsilon, k < K \quad (17)$$

式中: ε 为预先设定的迭代精度; K 为预先设定的迭代次数最大值。每进行一次迭代, 都要判断 $|(x_k - x_{k-1})/x_k|$ 的值是否小于设定的迭代精度 ε , 若小于则停止迭代, 并保存迭代结果; 否则, 继续迭代。当迭代次数超过设定的最大值 K 时, 停止迭代, 给出迭代超时信息。

(5) 计算斜程能见度。迭代的结果 $x^* = \varphi(x^*)$ 就是大气消光系数平均值 σ_{mean} , 同时也是边界值 x , 这时利用公式(12)计算大气消光系数的分布, 利用公式(3)计算斜程能见度。

3 仿真结果及分析

3.1 EMD 去噪

为了验证文中提出的组合算法, 根据自行研制的激光雷达能见度系统的参数(见表 1), 在 MATHCAD 软件环境下进行了数值仿真。

数值仿真采用的大气消光系数为 0.4 km^{-1} (晴天), 气溶胶消光后向散射比 $\frac{\sigma_a(r)}{\beta_a(r)} = 40$, 仿真得到含有高斯白噪声的激光雷达大气回波信号, 如图 2 所示。

表 1 能见度测量系统参数

Tab.1 Parameters of visibility measurement system

	Item	Parameter
Transmitter	Wavelength	905 nm
	Pulse width	100 ns
	Energy	20 μJ
	PRF	5 kHz
	Diameter	50 mm
Receiver	FOV	1.2 mrad
	Filter bandwidth	5 nm
Detector	Detector	SPCM
Acquisition	Data acquisition	MCS-pci
Control cell	Embedded computer	PCM-3370

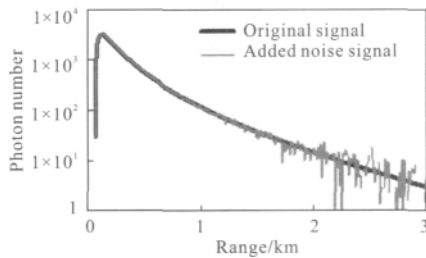


图 2 模拟激光雷达大气回波信号

Fig.2 Simulate lidar atmospheric return signals

分别用基于最小二乘原理的五点三次平滑去噪算法^[10]及 EMD 去噪算法,对含噪激光雷达大气回波信号进行去噪处理。表 2 是不同输入信噪比的情况下,两种方法得到的输出信噪比和均方误差的仿真数据结果。

表 2 两种去噪算法性能比较

Tab.2 Performance of the two denoising algorithms

SNR _{in}	MSE	Five point three times smoothing algorithm		EMD	
		SNR _{out}	MSE	SNR _{out}	MSE
11.74	73.20	13.91	39.22	18.57	4.58
11.92	66.84	14.10	35.97	18.71	4.29
12.26	56.62	14.45	30.72	19.19	3.44

图 3 为 EMD 算法处理过程,图中的 IMF₁~IMF₃ 是分解的不同尺度的固有模态函数, H 是趋势项。从信号中减去前两个 IMF,即重构 IMF₃、H 各级分量,

就得到去除高频噪声和扰动的信号。图 4 中的粗点线表示 EMD 算法去噪结果,细点线表示五点三次平滑算法去噪结果。

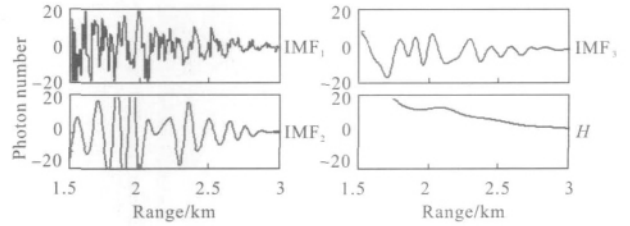


图 3 EMD 算法处理过程

Fig.3 Processing process of the EMD algorithm

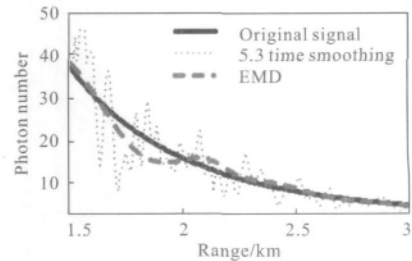


图 4 两种算法处理结果

Fig.4 Processing results of the two algorithms

从表 1 和图 4 可以看出,采用 EMD 算法去噪,所得的输出信噪比比五点三次平滑算法分别提高 4.66、4.61、4.74 dB,平均提高 4.67 dB,均方误差平均降低 10.04。信噪比的提高有利于提高反演精度,同时可减少回波信号的累积时间,增强系统观测的实时性。

图 5 给出了回波信号去噪前后利用基线法确定最大测量距离 r_m 的比较。选定背景噪声之后,计算回波信号的阈值信噪比,并将该值作为基线,回波信号与基线交点所对应的距离即为大测量距离 r_m 。由图 5 可见,去噪前回波信号与基线 1 有多个交点,很难确定 r_m 。去噪后回波信号与基线 2 只有一个交点, r_m 很

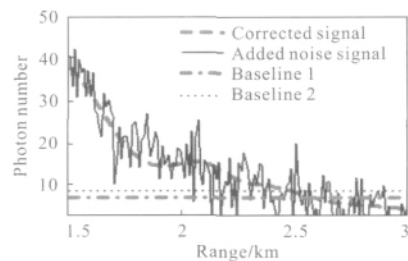


图 5 确定最大测量距离

Fig.5 Determine the maximum measuring range

容易确定。

文中在对信号评估时,对均方误差和信噪比定义如下。

(1) 均方误差:

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [f_{\text{qn}}(k) - f(k)]^2 \quad (18)$$

(2) 输入信噪比:

$$SNR_{\text{input}} = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^K f^2(k)}{\sum_{k=1}^K [f_n(k) - f(x)]^2} \quad (19)$$

(3) 输出信噪比:

$$SNR_{\text{output}} = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^K f^2(k)}{\sum_{k=1}^K [f_{\text{qn}}(k) - f(k)]^2} \quad (20)$$

式中: $f(k)$ 为原始信号; $f_n(k)$ 为含噪信号; $f_{\text{qn}}(k)$ 为去噪信号。

3.2 不动点迭代反演算法

分别使用贺应红的消光系数边界值算法(算法 1)和文中的不动点迭代反演算法(算法 2)对去噪后的回波信号进行反演。表 3 是不同输出信噪比的情况下,两种方法反演得到的大气消光系数。

表 3 两种算法反演结果比较

Tab.3 Inversion results of the two algorithms

$\sigma_{\text{me}} / \text{km}^{-1}$	SNR_{out}	Algorithm1		Algorithm2	
		σ / km^{-1}	Relative error/%	σ / km^{-1}	Relative error/%
	18.57	0.240 5	39.87	0.358 3	10.37
0.4	18.71	0.248 7	37.82	0.377 6	5.60
	19.19	0.264 1	34.04	0.405 7	1.25

图 6 是输出信噪比为 19.19 dB 时不动点迭代的蛛网图。图中的 X_0 点是由迭代收敛性条件 $|\varphi'(x)| < 1$ 确定的临界点,当初始值满足 $x_0 > X_0$ 的条件时,能保证迭代过程迅速收敛到不动点。图中带箭头的实线表示初始值是 0.6 km^{-1} 迭代过程,可见经过几次迭代之后,收敛到不动点。图中的黑色实线表示使用算法 1 计算出的边界值为 0.15 km^{-1} ,反演出的消光系数均值为 0.264 km^{-1} 。

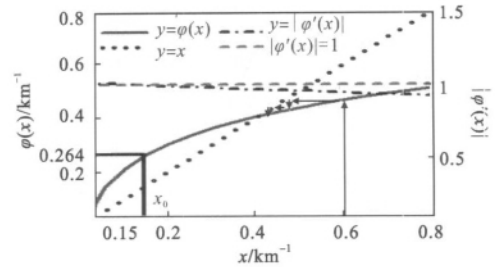


图 6 不动点迭代的蛛网图

Fig.6 Cobweb diagram of fixed-point iteration

从表 3 和图 6 中可以看出,采用算法 2 所得的消光系数均值相对误差 $\varepsilon_{\text{mean}}$ 分别比算法 1 减小了 29.50%、32.22%、32.79%,平均减小 31.50%,而迭代次数为 3~5 次。算法 2 相比算法 1 具有明显的优势。

需要说明的是,算法 1 是一种基于边界值的算法,边界值确定后,就计算出一个消光系数值,边界值越准确,反演精度越高。虽然算法 1 是利用最小二乘法对整个测量范围的曲线进行拟合,但其实质是使用 Collis 斜率法估算边界值,因此,当大气分布不均匀或回波信号由于噪声影响出现起伏时,估算的边界值不准确,影响反演精度。而文中是基于不动点原理的迭代反演算法,通过迭代使得消光系数均值收敛到不动点,即得到准确的大气消光系数均值,同时也能得到准确的边界值。

4 结论

文中提出了一种回波信号处理的组合算法。首先,采用基于经验模式分解的自适应算法对回波信号进行滤波去噪,去除回波信号中的高频噪声,提高信噪比,同时也便于确定最大测量距离 r_m ,便于后续处理。其次,采用基于不动点原理的迭代算法进行消光系数的反演,不需要准确的边界值就可计算消光系数均值,同时还能得到准确的边界值,用于消光系数分布的计算。数值仿真表明,EMD 算法比五点三次平滑去噪算法输出信噪比提高 4.67 dB,不动点迭代算法比最小二乘法估算消光系数边界值算法反演得到的消光系数均值相对误差减小 31.50%,而迭代次数只有 3~5 次。因此,该算法组合算法对提高斜程能见度的测量精度是有效的。

参考文献:

[1] Shi Deheng, Liu Xinjian, Huang Guoqing, et al. Study on

- transmission laser detection instrument for run way visibility [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 419-422. (in Chinese)
- 施德恒, 刘新建, 黄国庆, 等. 一种透射式跑道能见度激光测量仪研究[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 419-422.
- [2] Yue Bin, Dong Jingjing, Sun Dongsong, et al. Measuring method of atmospheric slant visibility with semiconductor lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 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, 2009, 38(1): 135-139.
- [3] Chen Min, Sun Dongsong, Li Hongjing. Detective method and analysis of atmosphere slant visibility for lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 156-160. (in Chinese)
- 陈敏, 孙东松, 李洪敬. 激光雷达斜程能见度的一种探测方法及其分析 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 156-160.
- [4] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211-220.
- [5] Klett J D. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(15): 2462-2464.
- [6] He Yinghong, Zheng Yuchen, 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.
- [7] 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]. Heidelberg: Springer Berlin, 1976: 71-102.
- [8] Huang N E, Shen Zheng. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]//Proc R Soc London A, 1998, 454: 903- 995.
- [9] Timothy Sauer. Numerical Analysis [M]. Translated by Wu Zhaojin. Beijing: Posts Telecom Press, 2010: 31-37. (in Chinese)
- Timothy Sauer. 数值分析 [M]. 吴兆金, 译. 北京: 邮电出版社, 2010: 31-37.
- [10] Chen Min, Sun Dongsong, Gu Jiang, et al. Two-dimensional distribution of aerosol measured by lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 369-372. (in Chinese)
- 陈敏, 孙东松, 顾江, 等. 激光雷达探测的大气气溶胶空间二维分布[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 369-372.

下期预览

基于脉冲耦合的超宽带高功率电脉冲源

缙永胜^{1,2}, 刘百玉¹, 阮 驰¹, 白永林¹, 张 伟^{1,2}, 白晓红¹, 秦君军¹, 杨文正¹, 王 博¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119 ;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 基于超快电子学理论, 利用脉冲耦合原理, 在时域上将多路高压皮秒脉冲耦合输出, 获得了超宽带高功率脉冲。通过四路脉冲耦合实验验证了该设计思路的可行性, 提高了输出脉冲功率。实验中, 单路高压皮秒脉冲的幅值为 1.33 kV, 宽度为 770 ps, 峰值抖动 $\leq 1\%$, 脉宽抖动 $\leq 1\%$, 四路脉冲耦合后, 输出脉冲幅度为 2.66 kV, 宽度为 875 ps, 峰值抖动 $\leq 1\%$, 脉宽抖动 $\leq 1\%$ 。该方法可以推广至多路脉冲耦合, 获得更高的功率。