

文章编号: 1001-3806(2008)06-0590-03

## 经验模式分解用于激光雷达大气回波处理

陶小红, 胡以华\*, 雷武虎, 蔡晓春

(电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

**摘要:** 为了提高激光大气回波处理的时效性, 采用了经验模式分解方法, 分析了经验模式分解的原理, 研究了经验模式分解在激光雷达大气回波信号实时处理中的应用。进行了理论分析与仿真验证, 取得了经验模式分解和 100 次信号平均处理后的结果, 并进行了比较。结果表明, 经验模式分解处理后的重构信号与 100 次信号平均结果接近, 相关系数为 0.99, 同时处理时间缩短为 1%, 可以满足某些情况下的实时处理要求, 并且能够抑制回波中一些薄云的干扰。这一结果对激光雷达大气回波信号实时处理是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 经验模式分解; 激光雷达; 信噪比

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A

### Application of empirical mode decomposition in atmospheric echo processing of lidar

TAO Xiao-hong, HU Yi-hua, LEI Wu-hu, CAI Xiao-chun

(Key Laboratory of Electronic Restriction Technology of Anhui, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of atmospheric signal processing of lidar, the theory of empirical mode decomposition was analyzed and the application of empirical mode decomposition in real-time processing of atmospheric echo signal was studied. The reconstruction signal after empirical mode decomposition processing is close to the signal after 100 signals average and their correlation coefficient is 0.99 and the processing time can be decreased to 1%, which may meet the requisition of real-time processing and can restrain the interference of some thin cloud. This result will give help to real-time processing of lidar echo.

**Key words:** laser technique; empirical mode decomposition; lidar; signal-to-noise ratio

## 引 言

随着光电技术的发展, 激光雷达在大气探测中发挥着越来越重要的作用。激光光束在大气中传输时, 遇到散射物质将产生光散射, 其中后向散射光将返回激光雷达而被接收。对所接收到的信号进行反演可得到所需的大气物理量<sup>[1]</sup>。由于激光大气后向散射信号微弱, 一般采用光子计数方式<sup>[2]</sup>。

激光雷达大气回波信号信噪比低, 因此必须对回波信号进行处理。经过  $m$  次信号累积平均后信噪比可提高  $\sqrt{m}$  倍<sup>[3]</sup>。对于重复频率为 10Hz 的激光雷达, 累积 1000 次需要 100s 的时间。因此, 信号平均显然不能满足一些气象服务与实时探测的需求。小波在分析不同距离激光雷达回波信号时很难确定小波阈值与

小波类型, 缺乏自适应性<sup>[4]</sup>。这里拟采用经验模式分解 (empirical mode decomposition, EMD) 方法对回波信号进行处理。EMD 是 HUANG 于 1998 年提出的一种新的用于分析非线性和非平稳信号的处理方法<sup>[5]</sup>。它能将一个信号的能量按照时域中各种固有尺度的波动进行分解, 得到一系列固有模函数 (intrinsic mode function, MF), 分解产生的具有不同尺度的 MF 对应不同频率分量。EMD 能有效地提取一个数据序列的趋势、去掉数据序列中的高频噪声, 因此, 可以对回波信号实时处理并提高信噪比, 具有自适应性。

## 1 EMD 去噪原理

HUANG 等人把满足以下条件的函数定义为 MF:

(1) 极大点和极小点个数之和与过零点的个数之差不超过 1; (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 0。EMD 方法的本质就是将信号分解为若干个 MF 之和, 不同的 MF 具有不同的尺度特征, 从而有利于细致的分析<sup>[5]</sup>。

设原始信号为  $f(t)$ , EMD 分解过程为: (1) 找出信

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60672154)

作者简介: 陶小红 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为空间信息处理。

\* 通讯联系人。E-mail: yh\_hu@163.com

收稿日期: 2007-07-27; 收到修改稿日期: 2007-09-17

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  $u(t)$ , 并求出它们的均值  $m_1(t) = \frac{1}{2} [v(t) + u(t)]$ 。然后考察  $h_1(t) = f(t) - m_1(t)$ 。若这样得到的新的信号  $h_1(t)$  仍不满足 MF 的基本要求, 则可对  $h_1(t)$  重复上述操作, 得到  $h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t)$ 。若  $h_{11}(t)$  仍不满足 MF 的基本条件, 继续对  $h_{11}(t)$  重复上述过程, 得到  $h_{12}(t) = h_{11}(t) - m_{12}(t)$ ,  $\dots$ , 直到一整数  $k$  时,  $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$  基本满足 MF 条件。定义  $c_1(t) = h_{1k}(t)$ , 即从原始信号分离出第 1 个 MF, 其中包含信号局部最小的尺度部分。(2) 记  $f(t) - c_1(t) = r_1(t)$ , 对  $r_1(t)$  可重复操作 (1) 得到  $c_2(t)$ , 得到第 2 个 MF。然后令  $r_2(t) = r_1(t) - c_2(t)$ , 重复上述操作,  $\dots$ , 当  $r_n(t)$  基本上呈单调趋势或  $r_n(t)$  很小可视为测量误差时即可停止, 得到  $r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t)$ 。所以有:

$$f(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

这样就可以把原始信号  $f(t)$  分解成 1 组 MF 的线性组合。信号的噪声 (即高频部分) 主要集中在最开始的少数几个 MF。用原始信号减去这几个 MF, 即可去除噪声。至于去掉几个 MF, 要根据不同信号的具体情况而定<sup>[6]</sup>。

## 2 激光雷达大气回波信号仿真

首先对激光雷达大气回波信号进行仿真。采用光子计数方式, 激光雷达回波方程为<sup>[7]</sup>:

$$N = N_0 \eta \beta(\lambda, R) \Delta R (A/R^2) \cdot \exp\left[2 - \int_0^R \alpha(\lambda, z) dz\right] \quad (2)$$

式中,  $N$  是探测器接收的光电子数,  $N_0$  是激光单脉冲包含的光子数,  $\eta$  是系统的接收效率 (包括探测器的量子效率),  $\beta$  表示大气后向散射系数, 包括大气分子的后向散射系数  $\beta_m$  和气溶胶后散射系数  $\beta_a$ ,  $\lambda$  为激光波长,  $R$  是探测距离,  $A$  是望远镜接收面积,  $\alpha$  是大气消光系数, 包括大气分子消光系数  $\alpha_m$  和气溶胶的消光系数  $\alpha_a$ ,  $z$  表距离。

在光子计数方式中, 单次脉冲信噪比为<sup>[8]</sup>:

$$N_{SNR} = \frac{N}{\sqrt{N + (N_b + N_d)}} \quad (3)$$

式中,  $N_b$  为背景辐射噪声光子数;  $N_d$  为光电探测器暗电流噪声光子数。噪声光子数可用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} N_b = L_b \frac{\lambda}{hc} \frac{2\Delta R}{c} \frac{(\pi \theta D)^2}{16} \eta \Delta \lambda \\ N_d = Q \cdot \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $L_b$  为背景辐射亮度,  $h$  为普朗克常数,  $\theta$  为接收视场角,  $D$  为接收望远镜直径,  $\Delta \lambda$  为滤波器宽度,  $c$  为光

速,  $Q$  为暗计数,  $\Delta t$  为脉冲宽度。如果激光雷达工作于夜间, 背景辐射光子数可以忽略不计。在光子计数方式下, 激光雷达大气回波信号光子数符合泊松分布, 其标准差为  $\sqrt{N}$ 。噪声光子数也可认为满足泊松分布<sup>[10]</sup>。

这里将模拟 532nm 激光雷达探测大气风速的回波信号, 采用的激光雷达系统参量见表 1。

Table 1 Parameters of lidar system

parameter	value	parameter	value
pulse power	50mJ	wavelength	532nm
pulse duration	100ns	diameter of telescope	200mm
field of view	0.5mrad	optic efficiency	0.3
quantum efficiency	0.4	bandwidth of filter	1.5nm
APD dark count	500/s	background spectrum radiance	0.14W / (m <sup>2</sup> · sr · nm)

数值模拟计算采用的大气分子和气溶胶的消光模式分别如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \beta_m(z) (\text{km}^{-1}) = 1.54 \times 10^{-3} \exp(-z/7) \\ \alpha_m(z) (\text{km}^{-1}) = \beta_m(z) \times 8\pi/3 \\ \beta_a(z) (\text{km}^{-1}) = 2.47 \times 10^{-3} \exp(-z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \exp[-(z-20)^2] \\ \alpha_a(z) (\text{km}^{-1}) = \beta_a(z) \times 50 \end{cases} \quad (5)$$

得到仿真的激光雷达大气回波见图 1 和图 2。

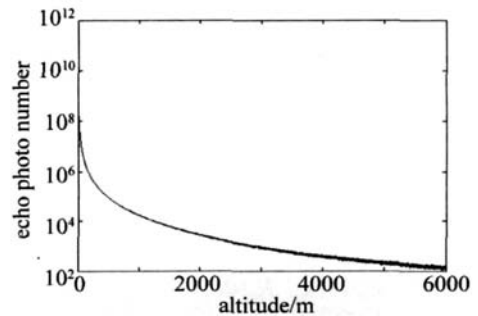


Fig. 1 Simulated single pulse signal of lidar echo

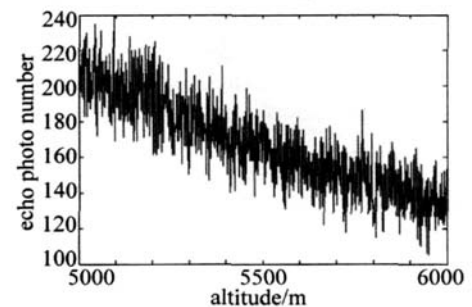


Fig. 2 Simulated single pulse signal of lidar echo at 5km ~6km

## 3 激光雷达大气回波信号 EMD 处理

根据 EMD 算法流程, 对仿真的激光雷达大气回波信号进行处理<sup>[12]</sup>, 处理过程如图 3 所示。MF<sub>1</sub> ~ MF<sub>4</sub>

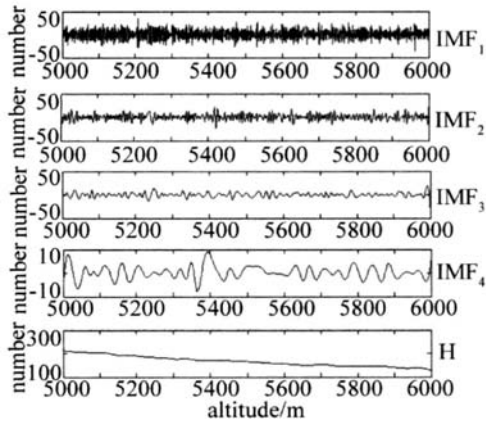


Fig 3 EMD processing of lidar echo

是分解的不同尺度的固有模函数, H是趋势项。

用 Monte Carlo方法,对回波信号仿真 100次并累积平均,与任意一仿真信号 EMD 处理比较,如图 4所示。图 5是 100次信号平均与 EMD 处理结果相对原始信号的偏差。图 6和图 7分别是 MF重构信号、单脉冲信号对 100次信号平均的线性回归。从图中可以得出, MF重构信号与 100次信号平均结果接近。计

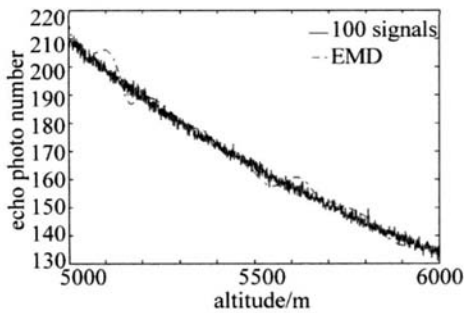


Fig. 4 Results of 100 signals and EMD processing

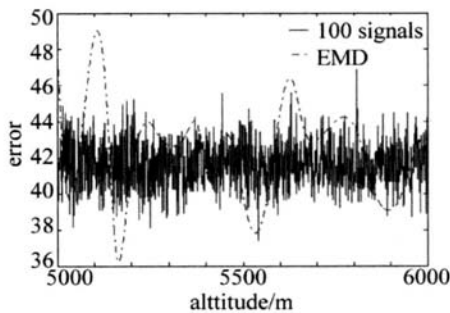


Fig. 5 Error between original signal and results

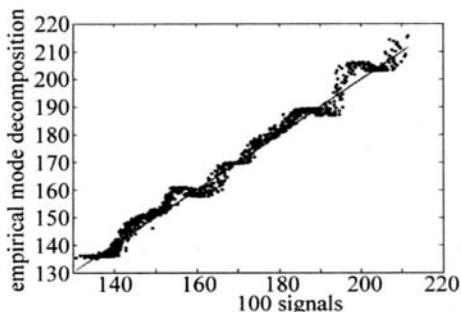


Fig. 6 Linear regression of IMF construction

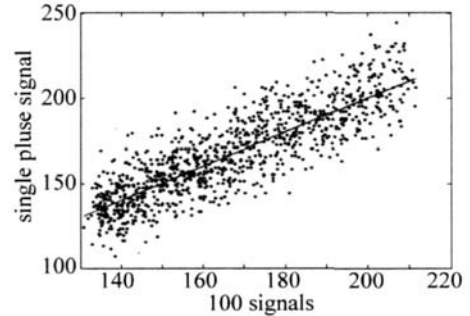


Fig 7 Linear regression of single pulse signal

算出它们的相关系数为 0.99,标准偏差为 2.8。而单脉冲信号与 100次信号平均相关系数为 0.86,标准偏差为 13.4。

现假设在回波光路上有一层厚 10m的薄而强的卷云,其光路上必将产生一段短而强的回波,对 EMD 5km~6km处含有卷云的回波信号进行仿真如图 8所示,5200m处有 10m厚的卷云。利用 EMD和 100次信

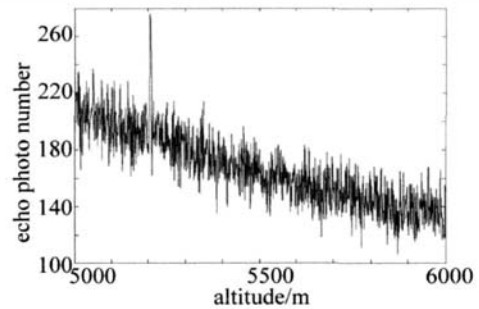


Fig 8 Echo signal with cloud

号平均分别进行平滑处理,得到结果如图 9所示。

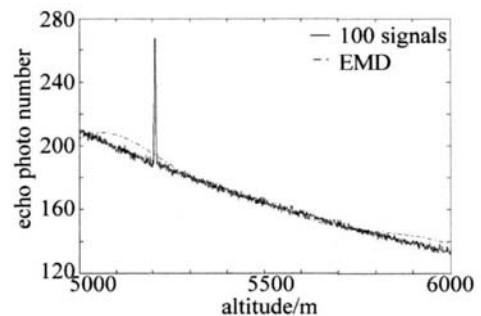


Fig 9 Processing result of echo signal with cloud

从图 9可以看出, EMD方法较信号平均对于这种突变的信号有较强的抑制作用,较好地保留了回波的原始信号,减小卷云对回波的干扰。这主要是因为 EMD 重构时能有效去除信号中的高频部分。

### 4 结论

通过对激光雷达大气回波信号仿真,研究了 EMD 方法在激光雷达大气回波信号处理中的应用。仿真结果表明, EMD处理后 MF的重构信号与 100次信号平均结果接近,相关系数为 0.99,同时处理时间缩短为 (下转第 595页)

为:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 12.2^\circ$ 。但当调节 LBO 的放置角度时, 位相匹配角  $\phi$  将会变化。如果  $\phi$  变小, 满足完全相位匹配的激光波长将变长, 因此, 1050nm 光的倍频输出功率将变小直至为 0。而较长波长的光, 由于满足了完全相位匹配, 将会起振并且通过倍频获得激光输出。通过 SNLO 光学软件计算 1075.6nm 光倍频的位相匹配角, 它们是:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 10.6^\circ$ 。因此, 当 LBO 经过调节使得角度满足时, 537.8nm 激光将会被输出。

## 4 结 论

采用 Spectra-Physics 生产的 940nm LD 抽运国产的 Yb YAG 晶体, 通过调节非线性晶体 LBO 的放置角度实现了频率选择, 并且倍频获得了 3.1mW 537.8nm 绿光输出。光斑椭圆度为 0.94, 具有较好的光斑质量。

### 参 考 文 献

- [1] HONEA E C, BEACH R J, MITCHELL S C, *et al* High-power dual-pumped Yb YAG laser [J]. Opt Lett, 2000, 25 (11): 805-807.
- [2] XUE H Zh, LU F Y, XUE M, *et al* Resonator design and beam quality measurement in Yb YAG slab lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30

(6): 585-588 (in Chinese).

- [3] ZHANG L Zh, DAI J M, ZHANG W L, *et al* All-solid-state tunable Yb YAG Laser [J]. Chinese Journal of Laser, 2001, A28 (10): 1-4 (in Chinese).
- [4] WU H Sh, YAN P, GONG M L, *et al*  $M^2 \leq 1.14$  diode-pumped Yb YAG microchip laser [J]. Chinese Journal of Laser, 2002, A29 (11): 961-964 (in Chinese).
- [5] WU H Sh, YAN P, GONG M L, *et al* A passively Q-switched diode pumped Yb YAG microchip laser [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1 (12): 697-698.
- [6] CAO H Zh, TAN H M, WANG B Sh, *et al* Laser diode end-pumped Yb YAG/LBO 525nm green laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (2): 117-119 (in Chinese).
- [7] HUEGEL H, BOHN W L. Solid-state thin disc laser [J]. SPIE, 1998, 3574: 15-28.
- [8] ZHANG Q L, JIANG H H, YAN Sh T. Properties of LD edge-pumped Yb YAG lasers [J]. Laser Technology, 2005, 29 (1): 82-86 (in Chinese).
- [9] BRAUCH U, GIESEN A, KARZEW SKIM, *et al* Multiwatt diode-pumped Yb YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053nm [J]. Opt Lett, 1995, 20 (7): 713-715.
- [10] JIRO S, SUNAO K, CHIRO S, *et al* Tunable frequency-doubled Yb YAG microchip lasers [J]. Optical Materials, 2002, 19 (1): 169-174.

(上接第 592 页)

1%, 可以满足某些情况下的实时处理要求, 并且能够抑制回波中一些薄云的干扰。

### 参 考 文 献

- [1] YAN J X, GONG Sh Sh, LU Zh Sh. Lidar of environmental survey [M]. Beijing: Science Press, 2001: 5-10 (in Chinese).
- [2] ZENG Q Y. Faint signal detection [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994: 115-118 (in Chinese).
- [3] YANG Ch H, SUN D S, LIH J. Photon counting applied to imaging lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (5): 517-520 (in Chinese).
- [4] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F, *et al* Faint signal processing of lidar based on wavelet multi-resolution analysis [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 278-283 (in Chinese).
- [5] HUANG N E, ZHENG S, STEVEN R L, *et al* The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C] // Proceedings of the Royal Society of London London: Royal Society Publishing, 1998: 903-995.

- [6] CHEN F L, WU X L. Recovery of signal from transient scattered response contaminated by gaussian white noise based on EMD method [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32 (3): 496-498 (in Chinese).
- [7] SUN J Q. Laser atmospheric detection [M]. Beijing: Science Press, 1986: 66-70 (in Chinese).
- [8] JAMES S. Micro pulse lidar [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1993, 31 (1): 48-55.
- [9] HONG G L, ZHANG Y Ch, HU Sh X. Near infrared micro pulse lidar of profiling atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23 (5): 384-388 (in Chinese).
- [10] CHU G F, SUN F X, DAI Y J. The method of photon count and its application on the micro-pulse laser range-finding [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 20 (5): 618-622 (in Chinese).
- [11] ZHONG Zh Q, ZHOU J. Simulated signal calculation for micro pulse lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20 (5): 618-622 (in Chinese).
- [12] ZHOU X L, SUN D S, ZHONG Zh Q. Subsection denoise of lidar signal by multi-scale EMD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (5): 477-482 (in Chinese).