

EMD 和小波变换在低可探测目标检测中的应用

顾有林^{1,2}, 叶应流², 曹光华², 胡以华^{1,2}, 朱峰²

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037;

2. 电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 针对雷达、红外等常规目标探测手段难以获取低可探测目标的现状, 提出了一种利用 EMD 和小波变换相结合分析激光雷达探测的风场扰动数据从而获取目标的探测方法。基于接收大气反射的激光回波信号, 通过风速反演算法获得扫描区域内的风场分布, 基于 EMD 和小波变换获取目标可能存在的位置。实验表明: 基于该算法获取目标于径向距离 1 250 m, 方位角 6° 处的结论与实际情况基本吻合, 从而验证了该算法切实可行, 对空中低可探测目标的探测发现具有重要的意义。

关键词: 激光雷达; EMD; 小波变换; 检测; 低可探测目标

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3494-06

Application of EMD and wavelet transform in low detectable targets detection

Gu Youlin^{1,2}, Ye Yingliu², Cao Guanghua², Hu Yihua^{1,2}, Zhu Feng²

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on the situation of being difficult to detect low detectable targets with those conventional radar and infrared means, a novel algorithm of acquiring targets based on Empirical Mode Decomposition (EMD) and wavelet transform was proposed to tackle wind field disturbance detected by lidar. Through receiving the lidar echo signal reflected by atmosphere and the retrieval algorithm of wind speed, the wind field distribution in scanning area was acquired. The location of target was obtained based on EMD and wavelet transform. The experimental result shows that the target location is the radial distance of 1 250 m and the azimuth angle of 6° drawn by this algorithm is the same as the practical situation. Consequently, this novel means is practicable, which has an important significance in the detection of air low detectable target.

Key words: lidar; EMD; wavelet transform; detection; low detectable target

收稿日期: 2015-03-15; 修订日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(60908033); 安徽省自然科学基金(1408085MKL47)

作者简介: 顾有林(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为空间信息处理。Email: ylg0912@163.com

0 引言

低可探测目标是一种通过某种技术手段控制和降低目标的特征信号(如电磁、可见、红外、声等)从而使其成为难以被各种探测设备发现、识别和跟踪的目标^[1]。随着隐身技术的快速发展及其在军事上的应用,海中的潜艇、舰船,陆地上的战车、坦克,空中的飞机、导弹等均采用了隐身技术,成为低可探测目标。

随之而来的反隐身技术和武器系统的研究及发展已成为重要而紧迫的任务。为探测隐身目标,美、俄、英、德等发达国家均积极发展各种反隐身技术,将对非常规探测技术的研究列为反隐身的重要研究方向之一,列入国防研究的关键技术^[2]。国内对低可探测目标的探测技术研究给予了高度重视。开展了短波、微波、毫米波、红外等波段常规反隐身技术的研究工作^[3-6]。

国内外许多研究人员研制了多普勒测风激光雷达系统。国外日本 Kimio Asaka 等^[7]人开发了 1.55 μm 相干测风激光雷达系统,有效测量距离为 5 km,风速测量范围为 $-50 \sim +50$ m/s,系统速度测量精度为 0.14 m/s。法国 Onera 和 Leosphere 两个公司联合研制的全光纤测风激光雷达系统^[8],探测距离为 50~250 m, $-15 \sim +15$ m/s。英国 QinetiQ 公司研制的全光纤相干激光测风系统^[9],作用距离范围在 5~200 m, $1 \sim 38$ m/s,测速精度可达 ± 0.1 m/s。国内孙东松研究员^[10]建立了米氏散射直接探测测风激光雷达系统,探测范围是低于 10 km 的对流层,速度测量精度为 1 m/s。窦贤康等人^[11]研发的多普勒测风激光雷达,探测高度达 60 km,风速测量精度优于 3.6 m/s。由上可知,多普勒激光测风技术日趋成熟,具有距离远、精度和分辨率高的优点,其风速测量的精度可达 1 m/s 左右,探测距离可至几十千米左右。

以隐身飞机为代表的空中低可探测目标在运动时会产生不可避免的大气风场扰动,该扰动具有便于探测发现的特点,如扰动强度大、存留时间长、扩展距离远等^[12]。

基于上述两方面优势,文中着眼于空中低可探测运动目标的常规探测手段不足,基于空中目标运动时产生的大气扰动和激光雷达在大气风场探测中

的特点,发展了一种通过激光雷达探测非目标本体即风场扰动从而发现空中低可探测目标的非常规目标探测手段,并提出了一套基于 EMD 和小波变换的低可探测目标探测算法。该研究对于充实目标探测手段,提高空中低可探测目标的探测发现能力具有重要的意义。

1 基础理论

1.1 EMD 算法

Huang 于 1996 年提出一种新的信号时域分解方法,即经验模态分解方法(EMD)^[13],该方法是局部自适应的,适合分析非线性和非平稳时间序列,其功能是将信号分解成本征模函数(IMF),从而使瞬时频率具有实际的物理意义。

通过 EMD 分解,可得原始信号 $x(t)$ 为^[13-14]:

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

由公式(1)可知,任何一个信号 $x(t)$ 可以分解为 n 个基本模式分量 c_j 和一个残量 r_n 之和。在此基础上,分别求出每个 IMF 分量的小波脊线,然后得到每个分量的瞬时频率和瞬时幅值,从而获得原始信号完整的、精确的瞬时物理量。

1.2 小波变换

对于任意的函数或者信号 $f(x)$,其小波变换定义为^[15]:

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \bar{\psi}_{(a,b)}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

式中: a 为尺度参数; b 为平移参数; $\psi(\omega)$ 为小波母函数。将 a 与 b 离散化,其离散小波函数可表示为:

$$\psi_{j,k}(x) = a^{-j/2} \psi(a^{-j}x - kb_0) \quad (3)$$

离散小波变换系数可表示为:

$$W_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \bar{\psi}_{j,k}(x) dx = a^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \bar{\psi}_{j,k}(a^{-j}x - kb_0) dx \quad (4)$$

小波变换模极大值点代表信号突变点的位置^[16],可以跟踪较大范围尺度空间的模极大值点一定对应着信号的重要特征,相反,跟踪范围小的则对应信号次要特征或者噪声。因此可以作为选择代表信号重要特征模极大的依据,更好地找到异常点。

2 检测算法基本原理

基于激光雷达探测风场扰动来检测空中运动目标信息的基本原理如图1所示,主要包括风场获取、风场背景数据库和空中运动目标检测3个部分。风场获取^[17-19]主要是通过接收指定区域激光雷达反射的回波信号,反演出径向和水平风速分量,进而得到扫描扇面上的风场分布。风场背景数据库主要基于长期观察监测感兴趣区域的背景大气条件和统计研究风场分布数据的基础上获取该区域大气风场运动变化的规律而建立的。空中运动目标检测是通过过滤背景风场对风场的影响得到扫描区域的扰动风场分布,基于EMD算法找出信号中最有可能含有扰动信息的若干高频IMF分量,将这些高频IMF分量重新组合成一个新的信号,再通过小波变换获取模极大值点,通过判断模极大值点来判断是否存在目标,若存在通过模极大值点位置找到目标可能存在的位置,否则该区域不存在运动目标。

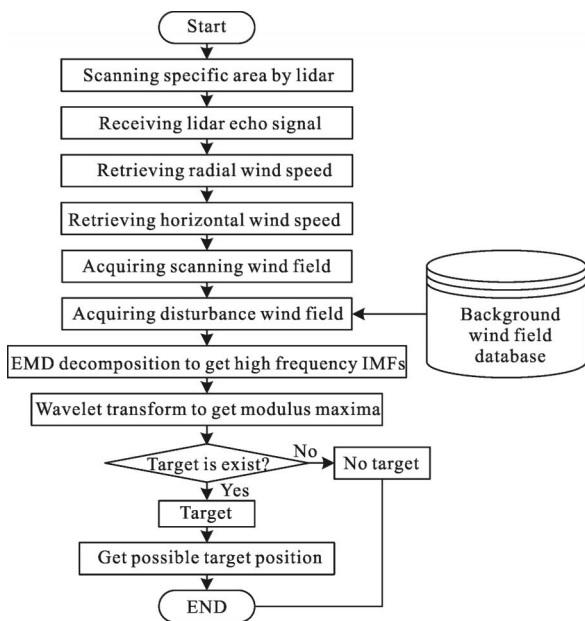


图1 探测算法流程

Fig.1 Flowchart of detection algorithm

3 结果与讨论

3.1 背景风场检测

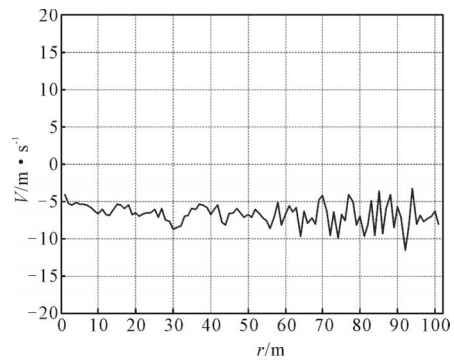
为验证基于EMD和小波变换的空中运动目标检测算法的准确性,以某民用飞机为研究对象,选择某民航机场开展了空中运动目标的大气风场探测实

验。此次飞机风场扰动激光探测外场实验按论文^[20]中的基于激光雷达的机场飞机尾涡探测原理示意图进行实施。地面车载多普勒测风激光雷达在垂直于飞机航迹的横向截面内以固定方位角进行俯仰向扫描,即RHI扫描方式。激光雷达以一定重复频率发射激光脉冲进行扇形扫描,处理接收到的激光回波信号。飞机起飞前,激光雷达对预定区域进行首次扫描,获取该扇面背景风场的激光回波信号;飞机飞过后,激光雷达再对该区域进行二次或多次扫描,获取因尾涡扩散形成的扇面扰动风场的激光回波信号。

以实验中的某组数据为例分析一下算法处理过程。当飞机未进入时,对风场数据某一时间序列进行分析,得到方位角为 12° 时的风速序列,如图2(a)所示。

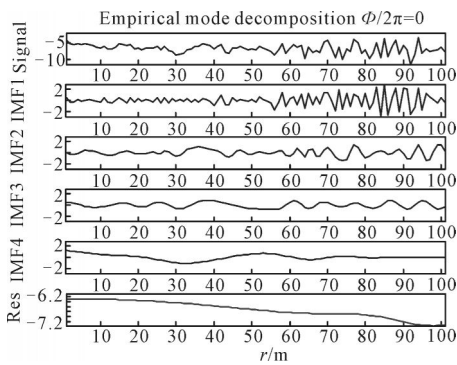
由图2(a)可以看出:水平方向为探测距离的点数,前面由于仪器等原因,在预处理时舍弃了前面30个点,每个点对应着实际距离10m,因此图中水平方向40坐标表示探测的距离为700m,垂直方向为风速的值,运动目标进入前,激光雷达扫描扇区内的背景风场速度分布基本处在 $0\sim 10\text{m/s}$ 内,最大速度已达 12m/s 。因此,虽然此次实验所选天气状况不好,扫描空域内的背景风场处在较强的风力等级,但由于整体风速依然分布均匀,起伏变化并不是很大,故而不会影响到算法的运用。

整个探测时间序列没有出现明显的大的突变点。对该时间序列数据进行EMD分解,结果如图2(b)所示。在EMD分解后的结果中,选取小尺度的高频信号,由图2(b)可知:含有丰富的高频信号主要集中在IMF1和IMF2,该算法中均采用IMF1和IMF2作为高频信号重构,再用小波进行分解,小波采用'db5',5层分解,得到结果如图2(c)所示。小波变换具有时、频局部化性质,信号的突变点可以从小波变换的模极大值检测出来,小波变换的模极大值都是出现在信号有突变的地方,信号突变越大,其小波变换的模极大值就越大。利用小波分解时 d_1 为大尺度,跟踪较大范围尺度空间的模极大一定对应着信号的重要特征,所以选择了 d_1 这个信号进行检测。从图2(c)分解最高频信号 d_1 中可以得出:整个数据序列都有一定的波动,但没有哪个位置模值明显大于其他数据点,基本上相差不到3,表明该时间序列数据无突变信号。



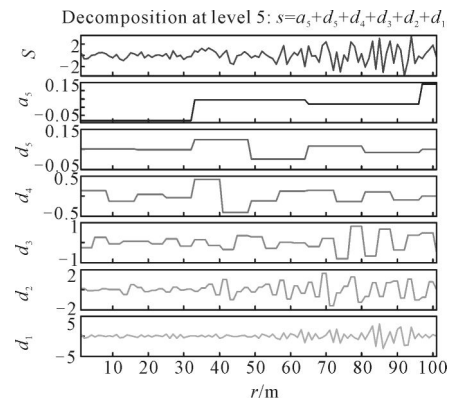
(a) 方位角为 12°时的风速序列

(a) Wind speed sequence at 12° azimuth



(b) EMD 分解的 IMFS 各分量

(b) IMFs of EMD decomposition



(c) IMF1 和 IMF2 分量和小波变换

(c) Wavelets of sum of IMF1 and IMF2

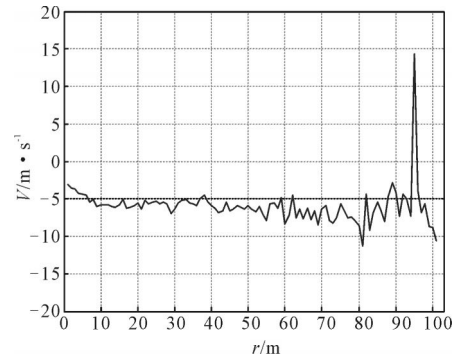
图 2 方位角为 12°时风速序列、EMD 分解和小波分解示意图

Fig.2 Wind speed sequence, decomposition of EMD and wavelets at 12° azimuth

3.2 目标风场检测

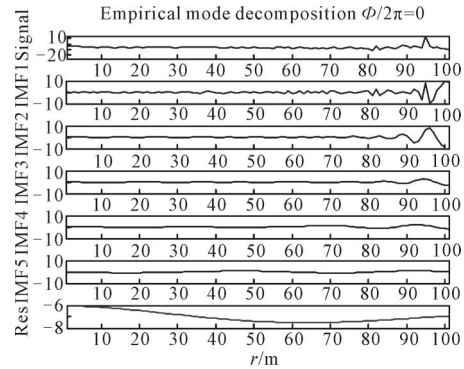
当飞机进入扫描区域时,分析所有扫描区时间序列,得到了在方位角为 6°时即第三条扫描时间序列数据产生突变,具体如图 3(a)所示。因此图 3(a)中在 95 点即 $(95+30) \times 10 = 1\ 250\ \text{m}$ 时风场值急剧增大,产生了突变。

同样,选取小尺度的高频信号 IMF1 和 IMF2 进行高频信号重构,再用小波进行分解,得到结果如图 3(c)所示。从图 3(c)分解结果的最高频信号 d_1 中可以得到:在 125 即 1250 m 处的模值明显大于其他数据点,其值与其他数据点有将近 10 的差距,表明该处确实为一突变信号,这与实验中记录的结果吻合。



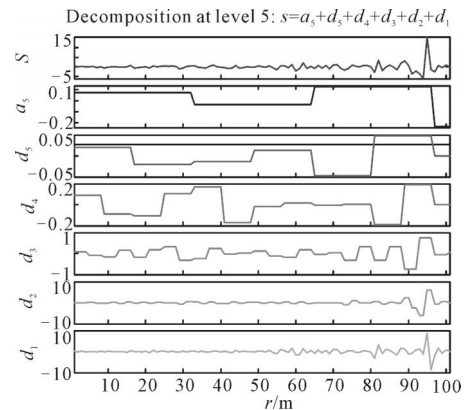
(a) 方位角为 6°时风速序列

(a) Wind speed sequence at 6° azimuth



(b) EMD 分解的 IMFS 各分量

(b) IMFs of EMD decomposition



(c) IMF1 和 IMF2 分量和小波变换

(c) Wavelets of sum of IMF1 and IMF2

图 3 方位角为 6°时风速序列、EMD 分解和小波分解示意图

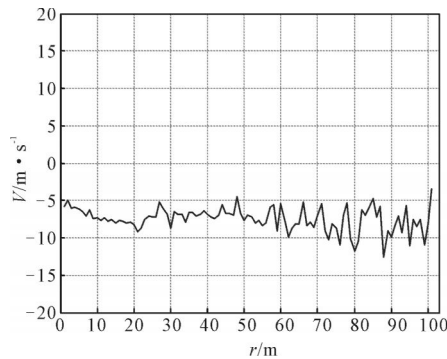
Fig.3 Wind speed sequence, decomposition of EMD and wavelets at 6° azimuth

从处理的结果还可以得出：如果信号突变的幅度越大，则在 d_1 中突变点处的模值越大，越容易检测。因此，采用 EMD 和小波变换可以有效地检测出目标的大气扰动信号。实际检测目标的大气扰动信号时，该点采用当前探测到的数据，EMD 在处理时存在边缘效应可能会使整个时间序列上的数据产生失真，可选取当前数据的前 10 个数据进行数据序列的镜像延拓。

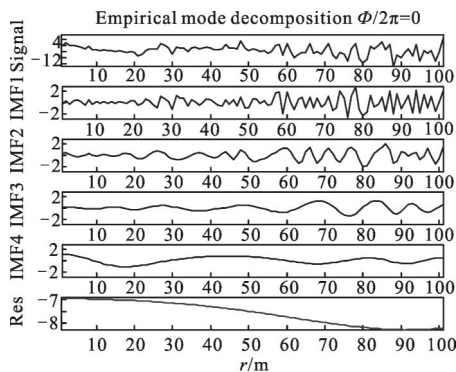
选择该次扫描方位角为 24° 时，即第十二条扫描时间序列数据进行处理，如图 4(a)所示。

整个探测时间序列没有出现明显的大的突变点。对该时间序列数据进行 EMD 分解，结果如图 4(b)所示。

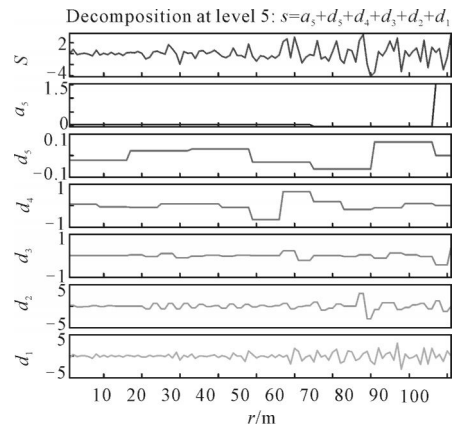
采用同样的方法处理小尺度的高频信号 IMF1 和 IMF2 进行高频信号重构，再用小波进行分解结果如图 4(c)所示。从分解结果的最高频信号 d_1 中可以得出，整个数据序列都有一定的波动，但没有哪个位置模值明显大于其他数据点，表明该时间序列数据没有突变信号。



(a) 方位角为 24° 时风速序列
(a) Wind speed sequence at 24° azimuth



(b) EMD 分解的 IMFs 各分量
(b) IMFs of EMD decomposition



(c) IMF1 和 IMF2 分量的小波变换
(c) Wavelets of sum of IMF1 and IMF2

图 4 方位角为 24° 时风速序列、EMD 分解和小波分解示意图
Fig.4 Wind speed sequence, decomposition of EMD and wavelets at 24° azimuth

3.3 结果讨论

通过开展飞机的大气风场扰动激光探测实验研究，获得了大量的实验数据，利用 EMD 和小波变换相结合的检测算法对数据进行处理，得到结论如下：

- (1) 常规背景大气风场变化平缓，趋于连续和平稳，随机起伏较小，检测不到突变点，因而不存在目标；
- (2) 飞机会引起大气风场在空间上的剧烈扰动，在距离方向上风速产生了明显的起伏。相对于背景大气风场，飞机在空间上引起了约 16 m/s 的风速扰动；
- (3) 相对背景大气风场，风速变化最大值点最有可能是飞机引起的扰动，在空间上能产生约 16 m/s 的扰动。

4 结论

上述计算分析表明：结合实验测量的激光回波数据，利用风场反演算法计算大气风场扰动分布，进一步利用 EMD 和小波变换寻找突变点，从而发现目标可能存在的位置。虽然此次试验选用的是民用飞机，由于算法处理的数据是风场扰动数据，而不是目标本体，因此，不失一般性，结论同样适用于对空中低可探测运动目标的探测。若风场变化较大的情况下，空中慢小运动目标所引起风场变化很小时，采用该算法可能会造成误判。综上所述，综合利用 EMD 和小波变换的空中运动目标检测算法能够检测空中低可探测运动目标，对于未来探测空中低可探测运动目标具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Qiu Zhiming. Detection technology of low detectable target[J]. *Commang Control & Simulation*, 2011, 33(2): 120. (in Chinese)
邱志明. 低可探测目标的探测技术 [J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(2): 120.
- [2] Cao Yiwen. Disappeared Stealth Weapons[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
曹译文. 匿迹销声的隐身武器[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2003.
- [3] Zhang Xiaokuan, Liu Shangchao, Zhang Chenxin, et al. Study on the detection technology of bistatic radars for stealthy targets [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(3): 444-446. (in Chinese)
张小宽, 刘尚钞, 张晨新, 等. 隐身目标的双基地雷达探测技术. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 444-446.
- [4] Nie Jianying, Li Xingguo, Lou Guowei. Analysis and calculation of coating stealth targets with passive millimeter wave detection system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(5): 1-6. (in Chinese)
聂建英, 李兴国, 娄国伟. 涂层隐身目标毫米波被动探测分析与计算[J]. 光电工程, 2010, 37(5): 1-6.
- [5] Wang Chaoqun. Detecting and tracking technology about IR stealth target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 127-132. (in Chinese)
汪朝群. 空中目标的红外隐身及探测跟踪技术[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 127-132.
- [6] Zhou Yiming, Liu Yueping, Jiang Chunshan. Research on beyond-light-of-sight detection and location technology against stealth targets based on opportunistic illuminator of shortwave[J]. *Journal of CAEIT*, 2014, 9(1): 45-49. (in Chinese)
周益明, 刘跃平, 蒋春山. 基于短波机会照射的超视距隐身目标探测定位技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(1): 45-49.
- [7] Asaka K, Yanagisawa T, Hirano Y. 1.5 μm eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement [C]//SPIE, 2001, 4153: 321-328.
- [8] Augere B, Cariou J P. All-fiber 1.5 μm CW coherent laser anemo meter for in-flight measurements [C]//SPIE, 2003, 5086: 121-128.
- [9] Pearson G N, Roberts P J, Eacock J R, et al. Analysis of the performance of a 1.548 μm coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter applications[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(30): 6442-6450.
- [10] Sun D S, Zhong Z Q, Zhou J, et al. Accuracy analysis of the fabry-perot etalon based doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 409-414.
- [11] Wang Guocheng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, et al. Performance of a rayleigh doppler lidar for middle atmosphere wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2351-2357. (in Chinese)
王国成, 窦贤康, 夏海云, 等. 中高层大气瑞利多普勒测风激光雷达性能分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2351-2357.
- [12] Li Jun, Wang Xuesong, Wang Tao. Radar detection performance of aircraft wake vortices in wet air [J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(5): 333-338. (in Chinese)
李军, 王雪松, 王涛. 湿性大气中飞机尾流的雷达探测性能. 雷达科学与技术, 2009, 7(5): 333-338.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]//Proc Royal Soc London A, 1998, 454: 903-995.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the hilbert spectrum [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 31: 417-457.
- [15] Ran Qiwen. Wavelet Analysis and Fractional Fourier Transform and Applications [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001: 03. (in Chinese)
冉启文. 小波变换与分数傅里叶变换理论及应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. 03.
- [16] Yuan Hua, Zhang Weining, Lu Jun, et al. An improved method of wavelet denoising from its wavelet transform modulus maxima [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(1): 838-843. (in Chinese)
袁华, 张卫宁, 路峻, 等. 一种改进的小波去噪中模极大值处理的方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 838-843.
- [17] Gu Y, Liu Y, He J, et al. Joint programming with COM and its application in wind field retrieval [C]//ICIS2010, 2010: 419-422.
- [18] Gu Y, Niu J, Zhang R, et al. the study of moving target detection algorithm based on wind field detected by lidar[C]//IHMSC2010, 2010: 52-55.
- [19] Wu Younghua, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Research on a new air moving target information acquisition algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (S1): s1005101-s1005106. (in Chinese)
吴永华, 胡以华, 顾有林, 等. 一种新型的空中运动目标信息获取算法的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(S1): s1005101-s1005106.
- [20] Wu Yonghua, Hu Yihua, Dai Dingchuan, et al. Research on the technique of aircraft wake vortex detection based on 1.5 μm doppler lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 811-817. (in Chinese)
吴永华, 胡以华, 戴定川, 等. 基于 1.5 μm 多普勒激光雷达的飞机尾涡探测技术研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(6): 811-817.