

一种基于经验模态分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法

牛 杰,刘永祥,秦玉亮,姜卫东,黎 湘

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所,湖南长沙 410073)

摘 要: 本文以锥体目标为对象,分析了目标进动对雷达回波的调制作用,研究了基于经验模态分解算法的多分量正弦调频信号分离方法,使用短时傅里叶变换得到了每个本征模态函数的瞬时频率,提取了进动周期、进动角、不同散射点间的微动幅度比值等微动特征及目标纵横比,并用暗室测量数据进行了验证,证明了本文的观点和特征提取方法的有效性.

关键词: 微动特征提取; 锥体目标; 经验模态分解; 瞬时频率

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1712-04

A New Method of Radar Micro-motion Feature Extraction of Cone Target Based on Empirical Mode Decomposition

NIU Jie, LIU Yong-xiang, QIN Yu-liang, JIANG Wei-dong, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: This paper studies on the cone target. Firstly, the modulating function of a precession target on the radar is analyzed. Then, the decomposition method of multi-component sinusoidal frequency modulated signal based on empirical mode decomposition (EMD) is studied. The instantaneous frequency of each intrinsic mode function is gained by using Short Time Fourier Transform (STFT). The precession features of precession period, precession angle, micro-motion range ratio of different scatters and geometry feature of aspect ratio are extracted. Finally, the results of feature extraction by utilizing the darkroom measurement are shown in figures, which validate the ideas.

Key words: micro-motion feature extraction; cone target; empirical mode decomposition; instantaneous frequency

1 引言

微动 (Micro-motion) 是指目标或目标的组成部分除了主体平动之外的振动、转动等小幅运动^[1]. 微动是由目标的特殊结构在特定的受力作用下引起的, 因此目标微动状态常常是独一无二的, 反映了目标的精细特征, 可以用来作为目标识别的重要依据^[2]. 例如: 导弹目标为了保证再入攻角, 一般会采用自旋定向, 易受扰动而产生进动, 如释放诱饵时的扰动使自旋弹头绕其质心作自由运动即进动, 进动是自旋弹头目标特有的运动特性, 是目标识别的重要特性量. 国内外对于空间进动锥体目标的研究大多是对目标回波的 RCS 序列进行进动特性分析或者通过距离像、ISAR 像提取目标微运动特征, 文献[3]研究雷达目标多种微动数学模型和微多普勒效应的谱特征; 文献[4]通过对进动锥体目标 RCS 统计特性分析, 提出变区间分组检验相乘积累进动周期估计方法; 文献[5]以二维 ISAR 图像序列为基础, 实现锥体目标进动特征提取; 文献[6]研究了旋转目标一维像

长度变化规律和微动特征提取方法.

本文针对进动锥体目标的雷达回波特点, 提出了首先对进动目标雷达回波经验模态分解然后进行时频变换的雷达微动特征提取新方法, 解决了进动目标微多普勒分辨困难、瞬时频率提取困难的难题, 可以准确地估计进动特征及锥体目标纵横比这一重要几何特征, 通过实验证明在信噪比高于 12dB 时, 所提取的参数误差在 15% 以内, 比较适用于实际工程应用.

2 锥体目标的进动模型

假设目标为由若干个各向同性的散射点组成的刚体, 此处采用点散射模型. 本文主要对进动特性进行分析, 只考虑补偿高速平动之后的微动, 设观测雷达和进动目标的几何关系如图 1 所示. 根据多普勒原理, 目标相对雷达运动将引起回波频率的变化, 多普勒频移与目标 (散射点) 径向速度 v_r 、雷达波长 λ 有关.

$$f_d = 2v_r / \lambda \quad (1)$$

假设目标进动角频率为 ω , 进动角为 α , 雷达视线

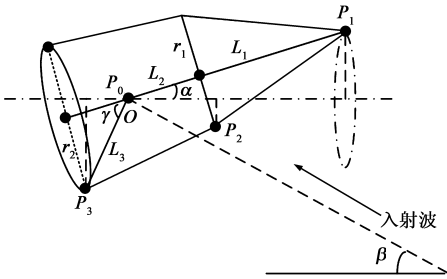


图1 进动锥体目标示意图

与进动轴的夹角为 β , 初始相位角为 φ_0 . 当 $|\alpha| < |\beta|$, 目标上有三个散射中心, 分别为散射点 P_1 、 P_2 、 P_3 , P_1 位于锥顶, P_2 位于两个锥体的连接处, P_3 位于目标底面圆周上. 质心 O 到 P_1 的长度为 L_1 , O 到 P_2 所在圆周的距离为 L_2 , O 到 P_3 所在底面圆周的距离为 L_3 , 上锥体的底面半径为 r_1 , 下锥体的底面半径为 r_2 .

从图 1 可以看出, 散射点 P_1 、 P_2 、 P_3 在目标进动时做圆周运动, 由于目标是刚体, 所以它们运动时的角速度大小相同, 运动半径大小与散射点所处的位置有关. 对于散射点 P_1 , 它做圆周运动的半径大小为 $L_1 \sin \alpha$, 运动速度大小 $v_{p1} = \omega L_1 \sin \alpha$, 径向速度 $v_{rp1} = v_{p1} \sin(\omega t + \varphi_0) \sin \beta$, 可以得到散射点 P_1 的微多普勒调制:

$$f_{d1} = \frac{2v_{rp1}}{\lambda} = \frac{2\omega L_1 \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi_0) \sin \beta}{\lambda} \quad (2)$$

同理, 可得散射点 P_2 、 P_3 的微多普勒调制:

$$f_{d2} = \frac{2}{\lambda} \omega (r_1 - L_2 \tan \alpha) \cos \alpha \cdot \sin(-\omega t + \varphi_0 + \pi) \sin \beta \quad (3)$$

$$f_{d3} = \frac{2}{\lambda} \omega (r_2 + L_3 \tan \alpha) \cos \alpha \cdot \sin(-\omega t + \varphi_0 + \pi) \sin \beta \quad (4)$$

散射点 P_3 与 P_1 的运动方向相反, 初始相位角相差 π ; 当 $\alpha < \arctan(r_1/L_2)$ 时, P_2 与 P_3 的运动方向相同, 当 $\alpha > \arctan(r_1/L_2)$ 时, 与 P_1 的运动方向相同. 目标散射由三个强散射点等效合成, 则目标的微多普勒可表示为:

$$f_{MD} = \sum_{i=1}^3 \rho(i) f_{di} \quad (5)$$

其中 $\rho(i)$ 为相应散射点的散射强度.

3 EMD 算法与微动特征提取方法

3.1 EMD

1998 年, 由 N E Huang 等人提出的 EMD 算法为非线性、非平稳的信号分析提供了新的数学工具. 该算法将原始信号分解为数量有限的本征模态函数 IMF (Intrinsic Mode Function), 分解采用筛选过程实现.

信号可以进行经验模态分解的条件为^[7,8]:

(a) 信号至少应该有两个极值点: 一个极大值点和一个极小值点;

(b) 时间尺度的特性由极值点之间的时间确定;

(c) 如果一个数据中仅含有拐点而不包含极值点, 则通过多次差分而得到极值点.

EMD 的基本步骤是:

(1) 对于预分解信号 $x(t)$, 首先判别出其极大值、极小值点, 分别用三次样条曲线组成的包络线将其连接起来, 确保样条曲线都经过这些极值点. 取这 2 条包络线的均值点, 记作 m_1 , 那么 $x(t)$ 与 m_1 之差为 h_1 , 即

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (6)$$

(2) 一次分解之后的结果 h_1 并不一定是一个本征模态函数, 因此需对其进行进一步的分解, 即重复上述分解过程, 以 h_1 为初始值进行新一轮的分解, 以此类推, 第 k 步的结果 h_{1k} 可写成:

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad (7)$$

当分解出的函数满足判别式:

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (8)$$

当 SD 在 0.2 ~ 0.3 之间时, 记 $C_1 = h_{1k}$ 为第一个 IMF.

(3) 令 $r_1 = x(t) - C_1$, 以 r_1 为新的信号重复上述操作, 以此得到第 2, 3, ..., n 个 IMF. 当得到第 n 个 IMF C_n 的余项 r_n 为一单调函数时, 分解结束, r_n 为残余分量, 此时信号 $x(t)$ 的分解式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n \quad (9)$$

由于雷达接收机采用正交下变频采样技术, 因此将同时得到目标信号的幅度和相位信息. 如果仅利用信号的幅度进行实信号 EMD 计算, 其相位信息将会损失, 从而使信号的分解误差增大. G Rilling 等人提出了复信号经验模态分解算法^[9], 该算法通过提取零均值旋转分量来计算信号局部高频信息, 其余步骤与实信号经验模态分解相同.

EMD 本质上是按照频率由高到低的顺序来提取信号中的频率的. 由第二节分析可知, 进动目标上不同散射点所产生的回波, 其微多普勒频移各不相同, 整个目标的微多普勒由这些正弦调频信号叠加而成, 目标所占的频宽一般为几十赫兹. 因此采用 EMD 方法可以将不同的微多普勒分量进行分离.

3.2 微动特征提取方法

3.2.1 进动周期提取方法

由式(3)~(5)知散射点 P_1 、 P_2 、 P_3 的微多普勒调制是周期为 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 的时间序列, 对雷达回波使用 EMD 得到各个散射点的微多普勒分量, 可以分别估计它们的周期. 在实际中对非平稳时变序列常用的周期估计方法为自相关函数法. 对第一个 IMF 求自相关, 得到周期为 T_1 作为进动周期估计:

$$\hat{T} = T_1 \quad (10)$$

3.2.2 瞬时频率提取方法

对散射点微多普勒特征提取关键在于瞬时频率的计算. 由于进动锥体目标回波为多分量信号, 使用时频分析方法分析微多普勒时要求时频分布必须具有高时频分辨率、低交叉项, 本文提出了首先对目标回波进行经验模态分解然后进行时频变换的方法, 分解之后得到的各个 IMF 都是单分量信号, 降低了对时频分布的要求. 设信号的时频分布 $S(m, k)$ 为 $M \times N$ 矩阵, 使用时间一阶条件距法提取瞬时频率, 则瞬时频率近似为:

$$f(m) = \frac{\sum_{k=1}^N kS(m, k)}{\sum_{k=1}^N S(m, k)} \quad (11)$$

3.2.3 进动角、目标纵横比估计方法

通过瞬时频率提取方法可以得到散射点 P_1 的调频指数 f_{dlmax} , 锥体或者锥体组合的质心靠近底部, 这里假设质心在 $3/4$ 高度处, 设锥体目标的长度为 L , 假设目标的 $L\sin\beta$ 已知或已估计得到, 可近似认为 $L_1 = 3L/4$, 根据式(2)可知:

$$\hat{\alpha} = \arcsin \frac{f_{dlmax}\lambda}{2\omega \cdot 3/4 \cdot L\sin\beta} \quad (12)$$

这里将散射点做进动时的运动半径大小定义为散射点的微动幅度. 散射点的调频指数反映了其微动幅度的大小, 由式(2)、(4)可得 P_3 与 P_1 的微动幅度比值:

$$\hat{\eta} = \frac{2\omega(r_2 + L_3 \tan\hat{\alpha}) \cos\hat{\alpha} \sin\beta}{\lambda} = \frac{r_2}{L_1 \tan\hat{\alpha}} + \frac{L_3}{L_1} \quad (13)$$

将 $L_1 = 3L/4$, $L_3/L_1 = 1/3$ 代入式(13)可得目标的纵横比为:

$$\hat{\zeta} = \frac{2r_2}{L} = 2\left(\hat{\eta} - \frac{1}{3}\right) \frac{3}{4} \tan\hat{\alpha} \quad (14)$$

4 实验验证

采用某次暗室录取的实验目标模型实测数据进行算法验证. 目标模型为轴对称锥体组合体, 如图2所示, 进动周期为 2s, 进动角为 10° , 使用窄带雷达在暗室内测量了 10GHz 单点频下的进动目标回波, β 为 25° , 回波

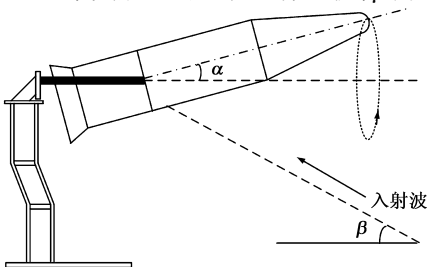


图2 进动目标模型示意图

采样率为 1KHz. 目标模型的长度为 1.35m, 相对于目标几何尺寸, 测量实验所用雷达是低分辨率的, 不能估计得到目标的长度, 但在实际应用中, 往往使用多种雷达对空间进动锥体目标进行跟踪、识别, 这里假设目标模型的 $L\sin\beta$ 已知或通过其它宽带雷达估计得到.

使用短时傅立叶变换对数据进行处理, 得到目标的复 RCS 时频分布如图3所示. 可以看出回波信号是由几个正弦调频信号叠加而成, 但由于散射强度的差异, 只能分辨出调制指数约为 21Hz 的分量, 其余几个分量则被淹没. 为了更好地利用雷达回波信息, 很有必要使用 EMD 算法对回波进行分离. 结果如图4所示.

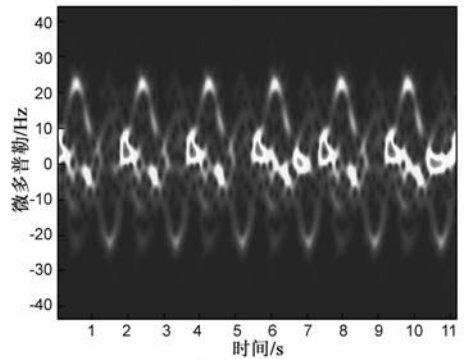


图3 目标复RCS时频分布

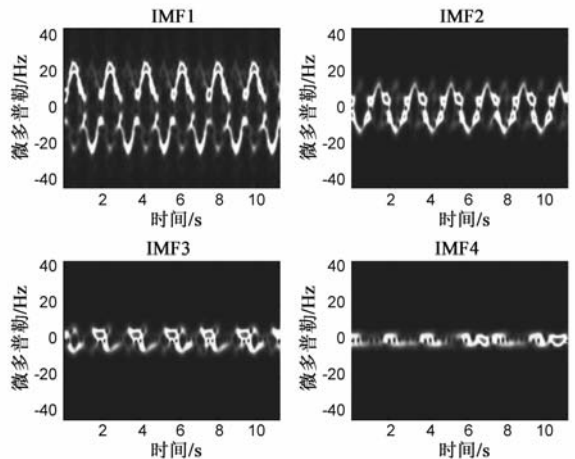


图4 进动锥体目标多分量正弦调频信号分离结果

分离所得到的前三个本征模态函数 IMF1、IMF2、IMF3 分别是散射点 P_3 、 P_1 、 P_2 的雷达回波, 图5为 IMF1 的自相关函数计算结果, 从图中可以得到进动周期为 1.9s. 图6为使用时间一阶条件距法提取得到的 IMF1 的瞬时频率, 可以得到 IMF1 的调频指数为 21.1Hz. 同理, IMF2 的调频指数为 14.5Hz, 根据式(12)可得进动角 $\hat{\alpha} = 9.3^\circ$. 由此可得散射点 P_3 与 P_1 的微动幅度比值 $\hat{\eta} = \frac{21.1}{14.5} = 1.455$, 将 $\hat{\eta}$ 、 $\hat{\alpha}$ 代入式(14)可得目标的纵横比 $\hat{\zeta} = 0.276$, 比实际比值 0.247 略大, 这是由于质心位置估计不准造成的.

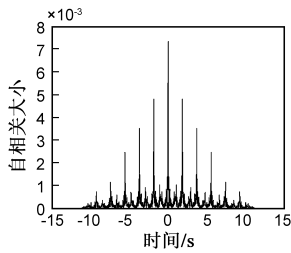


图5 IMF1的自相关函数

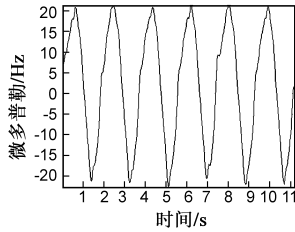


图6 IMF1的瞬时频率

为了验证本文方法在实际应用中的有效性,向暗室测量数据中加了不同强度的噪声,经过 100 次的 Monte-Carlo 实验,得到微动幅度比值、进动角、纵横比估计结果在不同信噪比下的误差如图 7 所示,可以看出在信噪比低于 12dB 时,三个参数的误差均已超过了 15%。图 8 比较了短时傅里叶变换与 CWD(Choi-Williams Distribution)在不同信噪比下的瞬时频率估计精度,由仿真结果可知,在信噪比高于 0dB 时,二者的精度差别不大,短时傅里叶变换能够满足精度需求。

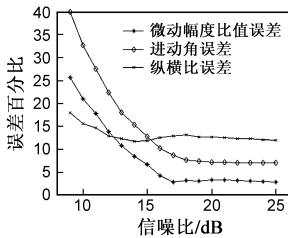


图7 参数估计误差

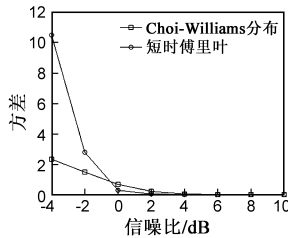


图8 瞬时频率估计方差比较

5 结束语

本文研究了基于经验模态分解算法的多分量正弦调频信号的分离方法,对分离后的各个 IMF 进行短时傅里叶变换,能够得到不同散射中心的瞬时频率,并使用暗室测量数据进行了验证.提取了进动周期、进动角、微动幅度比值三个进动特征及目标纵横比这一几何特征,在信噪比高于 12dB 的情况下,取得了比较好的结果,解决了目标底面尺寸估计困难的问题。

参考文献

- [1] V C Chen. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions [J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3):291 - 300.
- [2] Liu Yong-xiang, Li Xiang, Zhuang Zhao-wen. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler [J]. IET Signal Process, 2010, 4(3):213 - 217
- [3] V C Chen, Li FY, Ho SS. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1):2 - 21.
- [4] 魏玺章,姚辉伟,等.变区间分组检验相乘积累进动周期估计[J].电子学报,2010,38(1):135 - 140.
Wei Xi-zhang, Yao Hui-wei, et al. Estimation of precession pe-

riod based on nonparametric statistics [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1):135 - 140. (in Chinese)

- [5] 金光虎,高勋章,等.基于 ISAR 像序列的弹道目标进动特征提取[J].电子学报,2010,38(6):1 - 6.
Jin Guang-hu, Gao Xun-zhang, et al. Precession feature extraction of ballistic targets based on dynamic ISAR image sequence [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6):1 - 6. (in Chinese)
- [6] 马梁,王涛,冯德军.旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J].电子学报,2008,36(12):2273 - 2279.
Ma Liang, et al. The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12):2273 - 2279. (in Chinese)
- [7] N E Huang, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454:903 - 995.
- [8] N E Huang, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459:2317 - 2345.
- [9] G Rilling, P Flandrin, P Goncalves, J M Lilly. Bivariate empirical mode decomposition [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(12):936 - 939.

作者简介



牛 杰 男,1982 年 10 月出生于河南郸城.2008 年至今为国防科技大学电子科学与工程学院博士生,主要研究方向为雷达目标识别、非线性信息处理。

E-mail: nudtnj@163.com



刘永祥 男,1976 年 10 月出生于河北唐山.国防科技大学电子科学与工程学院副教授,研究领域为目标电磁特征信号分析、雷达目标识别。

E-mail: lyx_bible@sina.com.cn

秦玉亮 男,1980 年 5 月出生于山东潍坊.国防科技大学电子科学与工程学院副研究员,研究领域为精确制导中的信号与信息处理技术。

姜卫东 男,1968 年 1 月出生于重庆.国防科技大学电子科学与工程学院研究员,研究领域为雷达目标成像技术。

黎 湘 男,1967 年 9 月出生于湖南浏阳.国防科技大学电子科学与工程学院教授,博士生导师,主要从事精确制导、信息融合、目标识别等领域的研究工作。