

基于 EMD 算法的空间自旋目标 平动补偿与微动特征提取

赵园青¹, 池龙¹, 马赛¹, 王璐璐²

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;北京航空工程技术研究中心,北京,100076)

摘要 针对微多普勒频率附加在空间目标高速轨道运动产生的多普勒频移上使微动特征提取更加困难这一问题,提出了一种利用 EMD 算法对空间目标进行精确平动补偿和微多普勒特征提取的方法。对空间自旋目标进行建模,推导了窄带雷达条件下空间目标的微多普勒效应,并分析了平动分量对微多普勒的影响;把目标回波分解成一系列本征模态函数(IMF),然后求出瞬时频率,利用经验模型分解(EMD)算法对瞬时频率进行分解,分析各分量的能量百分比判别平动频移分量,实现回波信号的平动补偿;对平动补偿后的信号利用 EMD 算法分离出微多普勒曲线,提取微动特征。仿真实验验证了该方法的可行性与有效性。

关键词 特征提取;空间自旋目标;微多普勒;经验模型分解

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.010

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0040-04

Translational Motion Compensation and Micro-Doppler Characteristic Extraction for Space Spinning Target Based on EMD Algorithm

ZHAO Yuan-qing¹, CHI Long¹, MA Sai¹, WANG Lu-lu²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Engineering Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Aimed at the difficulty, in the micro-Doppler characteristic extraction, caused by the Doppler frequency produced by high-speed trajectory movement of space target to which the micro-Doppler frequency is added, a method is proposed in this paper based on EMD algorithm to achieve translational motion compensation accurately and extract micro-Doppler characteristics. Firstly, the micro-Doppler effect of space spinning target in narrowband radar is deduced and the influence of translational motion on micro-Doppler is analyzed. Secondly, the radar echoes are decomposed into a series of intrinsic-mode functions (IMFs), and the EMD algorithm is used to decompose the instantaneous frequency of the IMFs. The translational motion compensation can be achieved by judging the translational frequency shift component and analyzing the power of IMFs. Finally, the micro-Doppler curves are separated and the micro-motion features of space target such as spinning frequency are also obtained based on the EMD algorithm. Simulations show that the proposed algorithm is feasible and effective.

Key words: feature extraction; space spinning target; micro-Doppler; empirical-mode decomposition

收稿日期:2013-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169,61201369,61102109)

作者简介:赵园青(1989-),女,河北邢台人,硕士生,主要从事雷达成像与目标识别研究.E-mail:zyq-zhao@163.com

空间目标识别主要是从雷达回波信号中提取目标的位置、速度、结构等特征信息,进而实现对目标的识别^[1]。通过分析目标回波的微多普勒效应,进而提取目标微多普勒特征,可为空间目标识别提供重要依据^[2]。

目前已有一些文献对空间目标微多普勒特征分析与提取开展了研究,文献[3]研究了经验模型分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)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每个本征模态函数的瞬时频率,进而提取出空间锥体目标的进动周期、进动角等微动特征;文献[4]研究了用时频分布计算微多普勒的方法,并用微多普勒估计微动目标的运动参数。然而,这些工作都是在目标平动产生的多普勒被准确补偿的基础上进行分析的。空间目标在微动的同时伴随着高速轨道运动,使得到的微多普勒频率附加在平动引起的频移上,若不进行精确补偿,将使得提取出的微多普勒曲线与理论相比存在较大误差。这就要求在微动特征提取之前,先对回波信号进行精确平动补偿。

本文对空间自旋目标的微多普勒效应提出了基于经验模式分解的平动多普勒精确补偿及提取目标微多普勒特征的方法。

1 空间自旋目标平动分量对微多普勒的影响

假设雷达发射信号 $p(t) = \exp(j2\pi f_c t)$, 目标由 n 个有效散射点组成, 则目标在 t 时刻的基带回波信号为:

$$s_b(t) = \sum_{i=1}^n \rho \exp\left[j2\pi f_c \frac{2r_i(t)}{c}\right] \quad (1)$$

式中: f_c 为发射信号的载频; ρ 为第 i 个散射点的散射强度; $r_i(t)$ 为第 i 个散射点在 t 时刻到雷达的瞬时距离。取目标顶点为参考点, 则该点只做轨道运动, 回波为:

$$s_{\text{ref}}(t) = \exp\left[j2\pi f_c \frac{2r_{\text{ref}}(t)}{c}\right] \quad (2)$$

式中 $r_{\text{ref}}(t)$ 为 t 时刻参考点到雷达的距离。取式(1~2)的共轭进行相乘, 得到:

$$s_b(t) = \sum_{i=1}^n \rho \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} (r_i(t) - r_{\text{ref}}(t))\right] \quad (3)$$

式中 λ 为发射信号波长。径向距离的变化由平动和自旋运动 2 部分产生, 平动产生多普勒频率, 自旋产生微多普勒频移。假设散射点先平动, 再旋转。则第 i 个散射点到雷达的径向距离可表示为:

$$r_i(t) = r_i(0) + r_r(t) + r_s(t) \quad (4)$$

式中: $r_i(0)$ 为初始时刻第 i 个散射点到雷达的径向距离; $r_r(t) = v_r(t)t + 0.5 a_r(t)t^2$ 为 t 时刻由目标轨道运动产生的径向距离变化, $v_r(t)$ 和 $a_r(t)$ 分别为 t 时刻目标轨道运动的径向速度和加速度; $r_s(t) = v_{ie}(t)t$ 为散射点自旋运动产生的径向距离变化, $v_{ie}(t)$ 为 t 时刻目标自旋运动的径向速度。参考点到雷达的径向距离为:

$$r_0(t) = r_0(0) + r_r(t) \quad (5)$$

则式(3)可表示为:

$$s_b = \sum_{i=1}^n \rho \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} (r_i(0) - r_0(0) + r_s(t))\right] \quad (6)$$

对式(6)相位求导可得:

$$f = 2/\lambda dr_s(t)/dt \quad (7)$$

由式(7)可见, 该频率只是由自旋运动径向距离的变化产生, 平动分量被补偿掉了, 这个频率即为微多普勒频移。而实际情况下, 无法精确提取参考点回波信号, 只是对运动参数的估计。通常用测距得到 $r_0(0)$ 的估计值 R_0 , 测速得到 $v_r(t) + a_r(t)t$ 的估计值 V_r , 式(5)变为 $r_0(t) = R_0 + V_r t$, 代入式(6)得:

$$s_b = \sum_{i=1}^n \rho(x_i, y_i, z_i) \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} (r_i(0) - R_0 + (v_r(t) - V_r)t + \frac{1}{2} a_r(t)t^2 + v_{ie}(t)t)\right] \quad (8)$$

对式(8)相位求导得:

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \left[\frac{v_r(t) - V_r + a_r(t)t + \frac{dv_r(t)}{dt}t + \frac{1}{2} \frac{da_r(t)}{dt}t^2 + v_{ie}(t) + v'_{ie}(t)t}{2} \right] \quad (9)$$

目标平动补偿误差产生的多普勒频率为:

$$f_{\text{doppler}} = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{v_r(t) - V_r + a_r(t)t + \frac{dv_r(t)}{dt}t + \frac{1}{2} \frac{da_r(t)}{dt}t^2}{2} \right) \quad (10)$$

在观测时间内可假设空间目标的运动参数不变^[6], 即 $v_r(t)$ 、 $a_r(t)$ 为常数。由式(5)可得, 目标沿雷达视线方向运动时, 平动多普勒频率为关于时间 t 的线性函数; 若目标与雷达视线成夹角飞行, 多普勒频率为关于 t 的曲线。目标自旋产生的微多普勒频率为:

$$f_{\text{mg-d}} = 2/\lambda(v_{ie}(t) + v'_{ie}(t)t) \quad (11)$$

微多普勒频率是时变的, 其变化规律表现为正弦曲线形式, 通过分析回波微多普勒频率的变化规律, 提取变化周期, 就能获得目标的旋转周期信息^[5]。从以上分析可以看出, 平动项产生的多普勒频移随 t 变化, 这样使得到的时频面的微多普勒频率不再是严格正弦曲线形式, 这对微多普勒特征的

提取带来一定困难,必须寻找新的方法先对回波信号进行精确平动补偿。

2 平动补偿及微多普勒特征提取

2.1 EMD 算法

EMD 算法^[6]是通过“筛分(Sifting)”处理将信号分解为一系列“固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)”分量,只有 IMF 才能讨论瞬时频率。经过 EMD 算法,信号可写为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_{n+1}(t) \tag{12}$$

式中: $c_i(t)$ 为分解得到的 IMF 分量; $r_{n+1}(t)$ 为经过 n 次分解后信号余量。信号分解后各分量的瞬时频率为:

$$f_i(t) = 1/2\pi \text{d}\varphi(t)/\text{d}t \tag{13}$$

式中 $\varphi(t)$ 为信号的相位。

实际应用中,接收端通常采用正交采样方式,得到具有幅度和相位信息的复信号,Rilling 等人^[7]把 EMD 扩展到复数域,基于快速旋转分量层叠在慢速旋转分量上的思想提出复数据经验模型分解(Complex Empirical Mode Decomposition,CEMD)算法,该算法实质上也是一组自适应滤波过程,根据旋转频率将信号逐阶分解开,产生一系列复数据 IMF。由于筛选过程是从剩余分量中提取的,分解得到的 IMF 分量的频率由高到低,随着 IMF 阶数的增加,对应的频率降低^[8]。

2.2 平动补偿

在以上分析和算法的基础上,本文提出了基于 CEMD 和 EMD 算法的自适应平动补偿方法。具体步骤如下:

STEP 1 对粗补偿后的基带回波信号 $x(t)$ 进行 CEMD 分解;

STEP 2 对分解得到的 n 个 IMF 分量用式(13)求得第 i 个分量的瞬时频率 $f_i(t)$;

STEP 3 求得信号的瞬时频率 $f(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t)$;

STEP 4 对信号的瞬时频率 $f(t)$ 进行 EMD 分解,得到 m 个 $f_j(t)(j=1,2,\dots,m)$,即 $m-1$ 阶 imf 分量(为了和信号分解的 IMF 区分,这里用 imf 表示频率分解得到的本征模态函数)及一个余量;

STEP 5 用式 $g_j = f_j^2(t)/f^2(t) \times 100\%$ 计算 $f_j(t)$ 的能量百分比;

STEP 6 目标做轨道运动和自旋运动,因此,包含目标平动频率及自旋频率的 imf 能量百分比比较大,而平动频率为一振荡较慢的曲线,故平动频率应在后几项分量或余量中,一般分析 $g_j(j=m-2,m$

$-1,m)$ 的大小,取最大 g_j 对应的 $f_j(t)$ 作为补偿频率 $f_D(t)$;

STEP 7 当 $\eta = |f_D/f_{dmax}| = |E[f_D(t)]/f_{dmax}| \leq 0.1, \delta = E\{[f_D(t) - E(f_D(t))]^2\}/f_{dmax}^2 \leq 0.01$ 时,则补偿完成,否则继续补偿;

STEP 8 对 $f_D(t)$ 进行积分得到相位 $\phi(t) = 2\pi \int f_D(t) dt$;

STEP 9 对信号进行一次精确补偿: $x_b(t) = \rho \exp(j(\varphi(t) - \phi(t)))$;

STEP 10 对一次精确补偿后的信号 $x_b(t)$ 进行 CEMD 分解,重复以上步骤,直至满足要求。这时,补偿完成的信号经过 CEMD 分解后,分析各分量的能量百分比,能量百分比比较大的即为散射点的信号,这样各散射点的信号就可以分离出来,同时可得到各点对应的微多普勒频率。

3 仿真分析

仿真采用平底锥模型作为仿真模型,目标由 3 个散射点组成,散射点在参考坐标系中的坐标分别为(0, 0, 0), (3, 4, 5), (3, 4, -5), 单位为 m。雷达发射信号载频为 $f_c = 1$ GHz,参考坐标系原点在雷达坐标系中的坐标为(3, 4, 100) km,目标飞行速度为(-3, -4, 0) km/s,加速度为(-30, -40, -10) m/s²。雷达照射时间为 2 s,脉冲重复频率 PRF=2 000。本地坐标系与参考坐标系^[4]的初始 Euler 角为(0, $\pi/4, \pi/5$) rad,旋转角速度 $\omega = (\pi, 2\pi, \pi)^T$ rad/s,旋转周期 $T = 2\pi / \|\omega\| = 0.816 5$ s。假设测速得到的速度估计值为(-3, -4, 0) km/s,对粗略补偿的回波信号分析得到时频见图 1,可以看出微多普勒曲线在平动项基础上波动,无法准确提取微动特征。

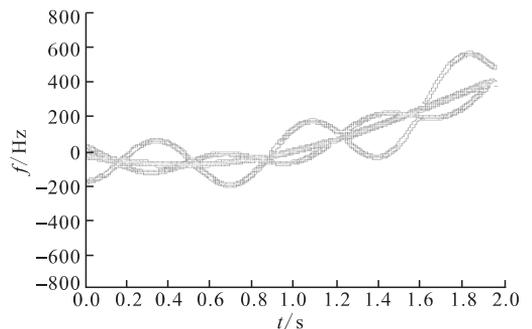


图 1 粗略补偿后信号的时频曲线

Fig.1 Time-frequency distribution after rude compensation

用本文方法对信号进行平动补偿,对瞬时频率分解后得到趋势项见图 2。对信号进行一次重建,

得到一次补偿后的时频见图 3。通过对信号分解后各阶 IMF 分量求瞬时频率,可使得微多普勒曲线分离,见图 4。要得到更为精确的补偿结果,通过减小 η 和 δ ,进行二次或多次补偿,达到满意的结果。

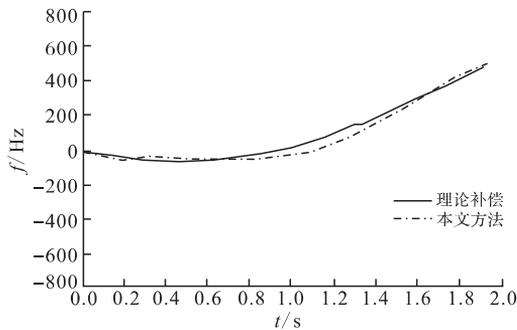


图 2 利用 EMD 提取的平动补偿频率

Fig.2 The translational motion compensation frequency extracted by EMD

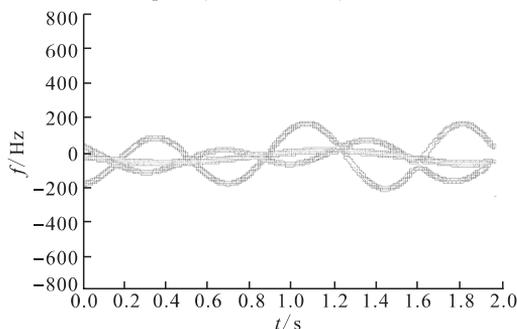


图 3 补偿后的时频曲线

Fig.3 The time-frequency curve after the compensation

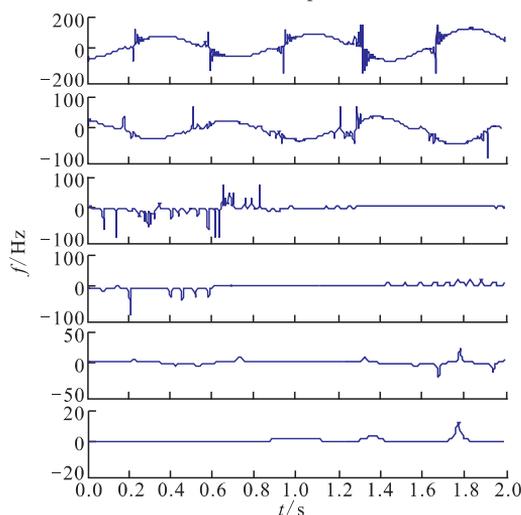


图 4 微多普勒频率分离

Fig.4 The separated micro-Doppler frequencies

可见,利用 EMD 算法可以较好的进行平动补偿,并分离出微多普勒时频曲线,从而提取出微多普勒特征。对图 4 中数据进行观测,得到 $T=0.81$ s,与理论值 0.816 s 相差不大。

4 结语

本文在空间目标自旋模型的基础上利用 EMD 算法对单频体制下的目标进行了仿真,对回波信号进行了平动补偿,并分离出微多普勒曲线,提取自旋频率。尽管本文主要以窄带信号测量自旋目标为例进行研究的,但该方法同样适用进动等模型,这也将是我们下一步拟开展的研究工作。

参考文献(References):

- [1] 马君国,付强,肖怀铁,等. 雷达空间目标识别技术综述[J]. 现代防御技术, 2006, 34(5): 90-94.
MA Junguo, FU Qiang, XIAO Huaitie, et al. Survey of radar space target recognition technology [J]. Modern defense technology, 2006, 34(5): 90-94. (in Chinese)
- [2] 张群,罗迎,何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(2): 22-26.
ZHANG Qun, LUO Ying, HE Jin. Review of researches on micro-Doppler effect of radar targets [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(2): 22-26. (in Chinese)
- [3] 牛杰,刘永祥,秦玉亮,等. 一种基于经验模型分解的椎体目标雷达微动特征提取新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1712-1715.
NIU Jie, LIU Yongxiang, QIN Yuliang, et al. A new method of radar micro-motion feature extraction of cone target based on empirical mode decomposition [J]. Acta electronica since, 2011, 39(7): 1712-1715. (in Chinese)
- [4] 陈行勇,刘永祥,黎湘,等. 微多普勒分析和参数估计[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 360-363.
CHEN Hangyong, LIU Yongxiang, LI Xiang, et al. Analysis of micro-Doppler and parameters estimation [J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2006, 25(5): 360-363. (in Chinese)
- [5] Chen V C, Li F Y, Ho S S, et al. micro-Doppler effect in radar phenomenon model and simulation study [J]. IEEE trans on AES, 2006, 42(1): 2-21.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the royal society of London a-mathematical physical & engineering sciences, 1998, 454: 903-995.
- [7] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P, et al. Bivariate empirical mode decomposition [J]. IEEE signal processing letters, 2007, 14(12): 936-939.
- [8] Bai Xueru, Xing Mengdao, Zhou Feng, et al. Imaging of micro-motion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.