

基于复数经验模式分解的非旋转对称空间进动目标回波分离及成像研究

袁斌* 徐世友 刘洋 陈曾平

(国防科学技术大学 ATR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

摘要: 对于非旋转对称的弹道中段目标逆合成孔径雷达成像而言, 非旋转对称部件回波分量的存在会严重影响目标主体的成像质量。该文通过建立非旋转对称弹道中段目标的回波模型, 分析了导弹主体和导弹非旋转对称部件的回波分量的微多普勒差异, 提出了基于复数经验模式分解的非旋转对称部件回波分离方法, 利用复数经验模式分解的自适应特性, 可以有效地分离和重构主体及非旋转对称部件回波分量。仿真结果表明, 利用该文提出的方法可显著提高导弹主体部分的成像质量。

关键词: 逆合成孔径雷达; 回波分离; 弹道中段目标; 非旋转对称部件; 复数经验模式分解

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0001-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00851

Echo Separation and Imaging of Spatial Precession Targets with Unsymmetrical Appendix Parts Based on CEMD

Yuan Bin Xu Shi-you Liu Yang Chen Zeng-ping

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the inverse synthetic aperture radar imaging of ballistic mid-course targets with unsymmetrical appendix parts, the image of the main body may be shadowed by the echo component induced by the unsymmetrical appendix parts. In this paper, the echo model of ballistic mid-course targets with unsymmetrical appendix parts is established, and the micro-Doppler difference between the main body and the appendix parts is analyzed. Then, an algorithm utilizing the Complex-value Empirical Mode Decomposition (CEMD) is proposed to separate the echo of the appendix parts. The echo component of the main body and the appendix parts can be separated and reconstructed with the proposed algorithm adaptively. The results of the simulation verify that a much better image of the main body can be obtained after the separation.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Echo separation; Ballistic mid-course targets; Unsymmetrical appendix parts; Complex-value Empirical Mode Decomposition (CEMD)

1 引言

弹道中段由于持续时间长, 质心运动轨迹容易掌握, 是弹道导弹防御的关键阶段。同时, 随着宽带和超宽带雷达技术的发展, 利用雷达成像可获得目标的精细结构特征, 为目标识别提供更为丰富的信息。但由于弹道中段目标飞行沿雷达视线的转角过小, 若利用质心轨道平动产生的转角成像, 需要相干积累时间较长, 难以满足实时成像的要求。由于导弹微动产生的微多普勒也与各散射点在导弹上的分布有关, 所以对弹道目标可通过微多普勒差异得到各散射点的横向位置分布^[1], 从而实现成像。

目前, 导弹微动成像算法基本上都是基于旋转对称假设, 仅考虑进动特性引起目标相对雷达的姿

态变化^[2-4]。现实环境中, 由于导弹上尾翼、调姿气孔、凹槽等部件的存在, 旋转对称的假设不再成立。非旋转对称部件对应的散射中心回波受导弹自旋运动的调制, 由于自旋频率通常远大于进动频率, 使得该类散射中心转动角度较大。同时因为自旋/锥旋的耦合作用, 其运动形式也较为复杂。直接利用已有的成像算法对包含非旋转对称部件的弹道目标进行成像, 会使导弹主体成像模糊。为提高导弹主体成像质量, 必须将非旋转对称部件回波分量从目标回波中分离出来, 然后对主体回波单独成像。对分离后的导弹主体回波信号可利用距离-多普勒(RD)成像算法或距离-瞬时多普勒(RID)成像算法得到其 ISAR 图像。也可采用 Keystone 算法^[5]或其改进算法^[6]先对 1 维距离像进行越距离单元走动校正, 然后采用 RD 算法成像。当成像观测时间大于一个进动周期时, 可利用导弹主体散射点的 1 维距

2012-07-04 收到, 2012-09-21 改回

*通信作者: 袁斌 yuanbin_163@163.com

离像序列正弦变化的特点,通过广义 Radon 变换^[7]或 Hough 变换^[8]获取其 2 维图像。

本文通过分析弹道目标运动特性及电磁散射特性,建立了包含非旋转对称部件的导弹目标雷达宽带回波信号模型。在此基础上,通过分析导弹主体和非旋转对称部件回波微多普勒频移的差异性,提出了基于复数经验模态分解方法(Complex-value Empirical Mode Decomposition, CEMD)的导弹目标非旋转对称部件回波信号分离方法,实现了导弹主体和非旋转对称部件回波信号的分离和重构。并通过广义 Radon 变换对分离后主体回波成像,从而获得目标主体的几何结构特征。仿真结果表明,本文提出的方法可以较大地提高导弹主体的成像质量。

2 含非旋转对称部件空间进动目标的回波建模

2.1 目标运动特性及电磁散射特性分析

对于含非旋转对称部件的弹道中段目标,其电磁散射特性结构可用导弹主体和非旋转对称部件两部分表示。导弹主体通常为锥、柱、台等,其表面形状和电磁特性完全对称,自旋运动不会对其雷达回波产生调制效应^[9]。而导弹非旋转对称部件主要是指导弹表面电磁散射特性不连续处,如尾翼、凹槽、天线及一些固定弹体需要的螺帽等。与目标主体不同,一般而言,这一类部件不具自旋对称特性,在微动过程中须考虑自旋运动和锥旋的双重调制效应^[10]。

本文以带尾翼的平底锥弹头为例,图 1 为弹头的实物模型。由电磁散射理论可知,一般认为平底锥体弹头主体主要包含 3 个散射中心,分别是锥顶处点 H_1 及底部边缘上的两点 H_2 和 H_3 。同时,每个弹翼对应一个散射中心,分别用 G_1 , G_2 , G_3 和 G_4 表示。散射中心的几何结构如图 2 所示,主体对应的散射中心标识为“o”,弹翼对应的散射中心标识为“*”。弹头顶部通常为球冠形状,该处会形成一个较强的散射中心。该散射中心位于弹体对称轴上,其运动规律和弹体运动规律相同,回波的微多普勒为标准正弦函数形式。而底部边缘上的 H_2 和 H_3 为滑动型散射中心,其运动规律和弹头本身的运动规律并不完全一致,除受弹体锥旋的影响外,还和雷达视线与锥轴所构成的平面有关,其回波的微多普勒将不再是标准的正弦函数形式^[11]。文献[12]中通过建模和分析指出,对于光滑进动锥体而言,3 个主散射中心的回波包络和相位仍可近似认为满足正弦曲线形式。对于弹翼对应的散射中心 G_1 , G_2 , G_3 和

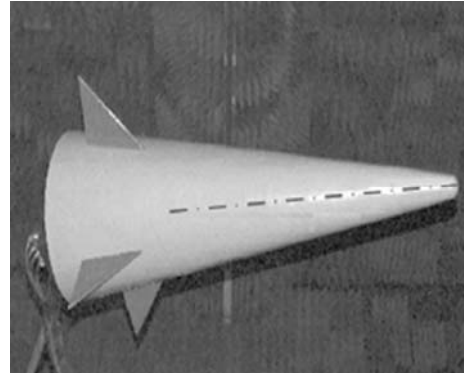


图 1 带尾翼平底锥体实物模型

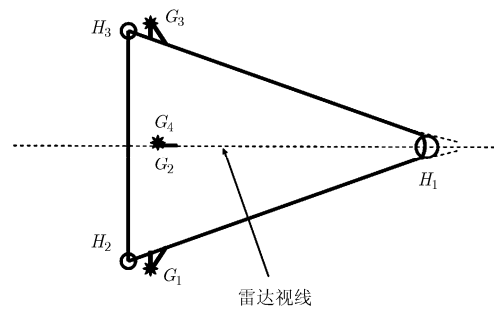


图 2 带尾翼平底锥体散射点几何结构示意图

G_4 ,在弹头进动过程中,除锥旋外弹体的自旋也会对该类散射中心回波产生调制,且由于自旋/锥旋的耦合作用,其回波微多普勒形式较为复杂。

2.2 目标宽带雷达回波模型

建立参考坐标系 XYZ ,以目标质心为原点 O ,定义锥体进动轴方向为 Z 轴方向,定义进动轴与雷达视线确定的平面上且垂直于 Z 轴的方向为 Y 轴方向, X 轴由右手准则确定。建立目标本体坐标系 xyz ,其原点位置为 O ,以锥体对称轴为 z 轴, x , y 轴相互垂直且与 z 轴垂直,满足右手准则,如图 3 所示。设弹头进动角 θ ,初始欧拉角 (ϕ, ψ, φ) 。雷达视线方向与进动轴 Z 之间的夹角为 β ,雷达视线在坐标系中的方位角为 α 。

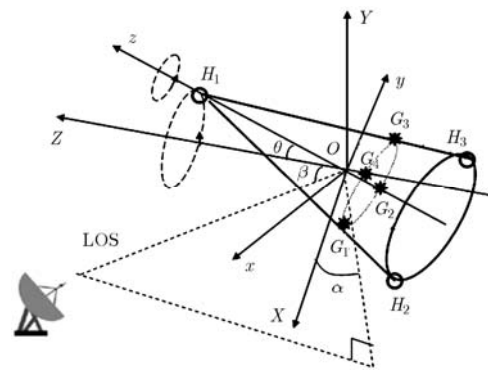


图 3 目标微动模型示意图

假设雷达发射宽带线形调频信号, $r_{\text{ref}}(t)$ 为 stretch 处理时采用的参考距离, 令 $\Delta r(t) = r(t) - r_{\text{ref}}(t)$ 表示的散射中心到参考点的距离在雷达视线方向上的投影。由于弹头的转动在快时间内可以忽略, 则 $\Delta R(t)$ 在快时间内可看作常数, 即 $\Delta r(t) \approx \Delta r(t_m)$ 。 $t_m = mT_r$ 为慢时间, 即脉冲发射时间, m 为脉冲序号, T_r 为脉冲周期。对 stretch 处理后的回波信号在快时间域内进行距离压缩, 得到散射中心的 1 维距离像序列。设回波信号经平动补偿, 并忽略二次以上的高次项, 其 1 维距离像表达式为

$$S(f, t_m) = \sigma(t_m) T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left(f - \frac{2\gamma}{c} \Delta r(t_m) \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} \Delta r(t_m) \right\} \quad (1)$$

其中 T_p 是信号的脉冲宽度, f_c 是载频, γ 是频率调制率。 $\sigma(t_m)$ 为散射中心强度, 对理想散射点模型, $\sigma(t_m)$ 可视为常数。由式(1)可知, 1 维距离像序列的包络和相位随 $\Delta r(t_m)$ 变化。

设弹体上任意一点 P 在目标本体坐标系中的位置为 $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$, 那么在 t_m 时刻, 该散射中心相对参考点的距离在雷达视线方向上的投影可表示为

$$\Delta r(t_m) = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{R}(t_m) \cdot \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot \mathbf{p}_0 \quad (2)$$

其中 \mathbf{R}_{init} 为从目标本体坐标系到参考坐标系的初始转换矩阵, $\mathbf{R}(t_m)$ 为旋转矩阵, \mathbf{n} 为参考坐标系中雷达视线方向, $\mathbf{n} = [\cos \alpha \cos \beta, \cos \alpha \sin \beta, -\sin \beta]^T$ 。

首先分析弹头主体对应的散射中心的 $\Delta R(t_m)$ 的变化规律。对于锥顶处的散射中心 H_1 , 由于其回波仅受目标锥旋影响, 则有 $\mathbf{R}(t_m) = \mathbf{R}_{\text{coni}}(t_m)$ 。那么在 t_m 时刻, 锥顶散射中心向雷达视线方向的投影可表示为

$$\Delta r_h(t_m) = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{R}_{\text{coni}}(t_m) \cdot \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot \mathbf{p}_0 \quad (3)$$

对于底部边缘上的散射中心 H_2 和 H_3 , 虽然滑动型散射中心的运动规律和弹头自身的运动规律并不完全一致, 散射中心向雷达视线方向的投影不能用式(3)表示。 $\Delta r(t_m)$ 的表达式除正弦形式之外, 还增加了其他调制项, 但是通过对其进行 Taylor 级数近似和化简, 散射中心 H_2 和 H_3 在等效雷达视线方向上的瞬时距离仍可认为近似满足正弦曲线形式^[12]。

对于弹翼部件对应的散射中心, 由于该类散射中心不具自旋对称特性, 在弹体运动过程中须考虑自旋和锥旋的双重调制影响, 则有 $\mathbf{R}(t_m) = \mathbf{R}_{\text{coni}}(t_m) \cdot \mathbf{R}_{\text{spin}}(t_m)$ 。那么在 t_m 时刻, 散射中心向雷达视线方向的投影可表示为

$$\Delta r_g(t_m) = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{R}_{\text{coni}}(t_m) \cdot \mathbf{R}_{\text{spin}}(t_m) \cdot \mathbf{R}_{\text{init}} \cdot \mathbf{p}_0 \quad (4)$$

对于带尾翼的平底锥弹头目标, 弹翼在导弹自旋周期内有可能受到弹体遮挡而不能被电磁波照射到, 因此还需考虑弹体对弹翼的遮挡效应。此时散射中心强度不再恒定, 需要乘以遮挡因子 $\mu_g(t_m)$ 。每个散射中心的遮挡因子 $\mu_g(t_m)$ 可表示为

$$\sigma_g(t_m) = \begin{cases} 1, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{O}'\mathbf{P}_g(t_m) < 0 \\ 0, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{O}'\mathbf{P}_g(t_m) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{O}'\mathbf{P}_g(t_m) = \mathbf{P}_g(t_m) - \mathbf{O}'(t_m)$, $\mathbf{P}_g(t_m)$ 表示第 g 个弹翼对应的散射中心坐标, $\mathbf{O}'(t_m)$ 表示 4 个弹翼散射点的中心位置随时间变化的坐标。

在式(3), 式(4)中, 初始转换矩阵 \mathbf{R}_{init} 可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\mathbf{R}_{\text{coni}}(t)$ 是绕矢量旋转的旋转变换, 根据 Euler-Rodrigues 方程式, 由锥旋矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{coni}}(t_m) = \mathbf{I} + \hat{\omega}_{\text{coni}} \sin(\Omega_{\text{coni}} t_m) + \hat{\omega}_{\text{coni}}^2 [1 - \cos(\Omega_{\text{coni}} t_m)] \quad (7)$$

类似地, 得到在 t_m 时刻由自旋引起的 $\mathbf{R}_{\text{spin}}(t_m)$ 转换矩阵为

$$\mathbf{R}_{\text{spin}}(t_m) = \mathbf{I} + \hat{\omega}_{\text{spin}} \sin(\Omega_{\text{spin}} t_m) + \hat{\omega}_{\text{spin}}^2 [1 - \cos(\Omega_{\text{spin}} t_m)] \quad (8)$$

其中 \mathbf{I} 为 3×3 的单位矩阵, Ω_{coni} 和 Ω_{spin} 分别表示自旋和锥旋的角速度, $\hat{\omega}_{\text{coni}}$ 和 $\hat{\omega}_{\text{spin}}$ 为反对称矩阵, 若锥旋和自旋的旋轴分别为 $\mathbf{l}_c = (\omega_{c_x}, \omega_{c_y}, \omega_{c_z})$ 和 $\mathbf{l}_s = (\omega_{s_x}, \omega_{s_y}, \omega_{s_z})$, 则 $\hat{\omega}_{\text{coni}}$ 和 $\hat{\omega}_{\text{spin}}$ 分别可表示为

$$\hat{\omega}_{\text{coni}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{c_z} & \omega_{c_x} \\ \omega_{c_z} & 0 & -\omega_{c_y} \\ -\omega_{c_y} & \omega_{c_x} & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\omega}_{\text{spin}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{s_z} & \omega_{s_x} \\ \omega_{s_z} & 0 & -\omega_{s_y} \\ -\omega_{s_y} & \omega_{s_x} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 基于复数经验模式分解的非旋转对称部件回波分离

3.1 复数经验模式分解

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法是由 Huang 等人^[13]提出的一种新的数学工具, 该方法能将复杂的多分量信号自适应地分解为若干本征模态函数(Intrinsic Mode Function,

IMF)分量之和,对每个IMF分量进行Hilbert变换可求出瞬时频率和幅值,从而得到信号完整的时频分布。EMD的基本步骤为:

(1)设待分解信号为 $x(t)$,其中 $t \in [t_a, t_b]$ 。取 $i = 1, k = 1$ 。

(2)寻找 $x(t)$ 的所有局部极大值点和所有极小值点,拟合极值点得到上包络线 $x_{\max}(t)$ 和下包络线 $x_{\min}(t)$,使 $x(t)$ 满足: $x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t), t \in [t_a, t_b]$ 。记 $m_{i,k}(t)$ 为信号上下包络线的均值, $m_{i,k}(t) = [x_{\min}(t) + x_{\max}(t)]/2$ 。求得 $x(t)$ 和 $m_{i,k}(t)$ 的差为 $h_{i,k}(t)$, $h_{i,k}(t) = x(t) - m_{i,k}(t)$ 。

(3)检验分解之后的结果 $h_{i,k}(t)$ 是否为IMF,若不满足则使 $k = k + 1$,对 $x(t) = h_{i,k}(t)$ 进行新一轮分解,循环反复步骤(2),直至 $h_{i,k}(t)$ 满足终止条件。其中停止准则的判别式为

$$SD = \sum_{t_a}^{t_b} \frac{|h_{i,k-1}^2(t) - h_{i,k}^2(t)|^2}{h_{i,k-1}^2(t)} \quad (10)$$

当 SD 在 $0.2 \sim 0.3$ 之间时,循环停止。令 $x_i(t) = h_{i,k}(t)$ 记为第 i 个IMF。

(4)令 $c_i(t) = x(t) - x_i(t)$ 为残余分量,检验 $c_i(t)$ 是否为单调函数,若不满足则令 $i = i + 1, x(t) = c_i(t)$,循环反复步骤(2),步骤(3),进行新一轮分解,直至 $c_i(t)$ 满足终止条件。

(5)将所有的IMF项和最终残余分量 $c(t)$ 相加,即为原始信号 $x(t)$ 的完整的EMD表达,可写为

$$x(t) = \sum_{i=1} x_i(t) + c(t) \quad (11)$$

由于雷达接收机采用正交采样技术,可同时得到回波信号的幅度和相位信息。如果利用实信号的经验模态分解进行回波信号分离,则必须对信号求取模值,从而丢失了相位信息,使分解误差增大。2007年,文献[14]将经验模态分解算法由实信号拓展到复信号,提出了复数经验模态分解(CEMD)方法。复数经验模态分解通过提取零均值的旋转分量,计算信号的局部细节,并将信号分解为从快变化到

慢变化的旋转矢量。复数经验模态分解处理步骤与实信号经验模态分解基本相同,但复信号分解需求出 K 个方向上的极值点,从而计算复信号的平均。CEMD的基本流程如图4所示,在图中 $x(t)$ 为待分解信号, $P_{\varphi_{i,k}}(t)$ 表示信号在 $e^{-j\varphi_{i,k}}$ 方向投影的实部,而 $S_{\varphi_{i,k}}(t)$ 表示信号在 $e^{-j\varphi_{i,k}}$ 方向的复数本征模态函数。

3.2 基于复数经验模式分解的非旋转对称部件回波分离

对于含非旋转对称部件的弹道中段目标,回波由导弹主体和非旋转对称部件信号叠加而成,但主体和非旋转对称部件所产生的回波微多普勒频移不相同。主体由于仅受到锥旋调制的影响,所引起的微多普勒一般较小。而非旋转对称部件同时受到自旋和锥旋调制的影响,且一般而言自旋频率远大于锥旋频率,因此该类散射中心转动角度较大,引起的微多普勒则为从负频率到正频率变化的宽谱。

如果直接用加窗方法对低频和高频回波分离,则非旋转对称部件的回波中低频分量将影响主体部分的成像质量。而采用CEMD方法可自适应地将回波信号分解为不同频率模式的复信号,从而分离目标主体与非旋转对称部件的回波。一般而言,原始信号可分解为多个IMF,所以需采用合适的判别法则,将IMF划分到主体或非旋转对称部件回波中。本文采用过零点数目门限法,对IMF进行分类^[15]。

对不同模式的IMF信号,其平均周期 T_{ave} 可以定义为

$$T_{\text{ave}} = N / N_{\text{max}} \quad (12)$$

式(12)中 N 表示数据点总长度, N_{max} 表示局部极大值点的数目。由于IMF满足数据过零点与极值点数目相等或者相差1。因此,可以定义平均周期:

$$T_{\text{ave}} = N / N_{\text{zero}} \quad (13)$$

其中 N_{zero} 表示IMF过零点的数目。则通过设置过零点数目可以在变换域完成对不同频率分量的分离。

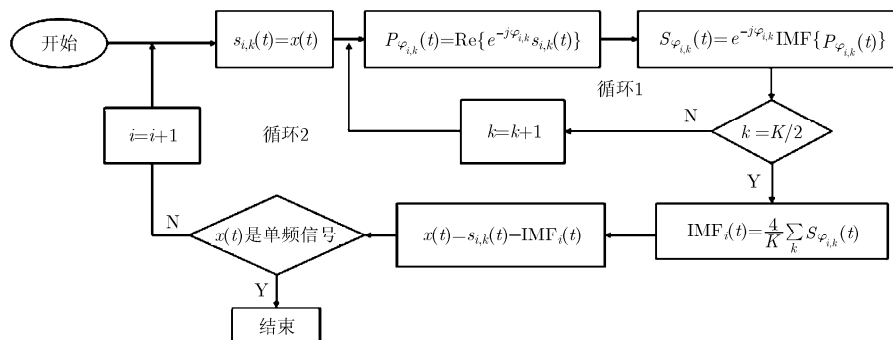


图4 复数经验模式分解流程图

4 仿真实验及结果分析

为了验证本文提出算法,建立目标散射点模型。假设目标为带尾翼的平底锥弹头,根据2.1节中的分析可知,目标散射点模型可以用3个主体散射中心和4个尾翼散射中心组合表示,主体散射中心位于锥顶部的球冠处,以及底部边缘上电磁波入射面与底部边缘的交点。尾翼散射中心对应弹体尾部的尾翼安装位置,对称分布弹体尾部。设主体散射中心位置分别为 $(0,0,1.5)$, $(0,0.5,-1.0)$ 和 $(0,-0.5,-1.0)$,尾翼散射中心位置分别为 $(0,0.4,-0.5)$, $(0,-0.4,-0.5)$, $(0.4,0,-0.5)$ 和 $(-0.4,0,-0.5)$,如图5所示。弹头目标初始欧拉角 $(\phi,\psi,\varphi)=(0,0,10^\circ)$ 。设目标自旋频率为2 Hz,进动频率为0.5 Hz,进动角为 $\theta=10^\circ$ 。雷达发射信号为线调频信号,载频10 GHz,带宽2 GHz,脉宽100 μs ,采样率1 MHz,脉冲重复频率PRF=1000 Hz,雷达视线与进动轴夹角 $\beta=45^\circ$,雷达视线在坐标系中的方位角为 $\alpha=0^\circ$ 。

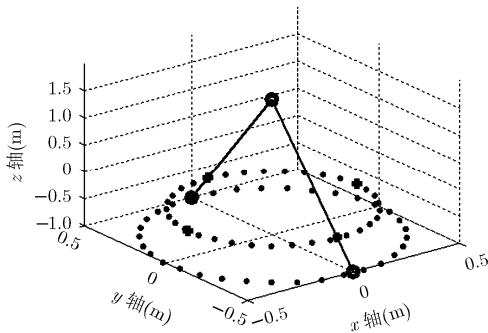


图5 目标的散射点分布

图6(a)为未考虑遮挡效应的回波脉压后得到的1维距离像序列,从图中可清晰地看出3条慢变化的正弦曲线,分别对应3个主体散射中心。而图中4条快变化的曲线,分别对应锥体上的4个尾翼对应的固定散射中心。由于固定散射中心在微动过程中受自旋及锥旋的二次调制,曲线形式相对复杂。图6(b)为窄带回波信号时频分析的结果,从图中可看出主体所引起的微多普勒位于频谱的低频部分,而导弹尾翼散射中心引起的微多普勒则为从负频率到正频率变化的宽谱信号,且调制形式也与导弹主体不同。图6(c),6(d)分别为考虑了弹体对弹翼的遮挡效应的目标1维距离像序列和窄带回波信号时频分析的结果。

CEMD方法其本质是将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解,产生具有不同特征尺度的数据序列,每个序列对应一个IMF。而这些IMF分别对应信号中从快变化到慢变化的振动分量,因此CEMD的作用类似于具有不同频带的滤波器组,但

是其子带滤波器并非事先设置好的,而是根据数据自身的特征具有自适应时变的特点。对图6(c)中的每个距离单元回波逐一进行CEMD分解,并通过设置过零点数目阈值将表示固定散射中心和滑动散射中心的IMF划分到一起,然后重构导弹主体和导弹尾翼的1维距离像,分别如图7(a)和图7(b)所示。本文采用广义Radon变换对分离后的弹头主体回波成像,成像结果如图7(c)所示。为对比分离处理对成像的影响,图7(d)给出分离前直接采用广义Radon变换成像的结果。对比图7(c)和图7(d)可以看出,对尾翼回波分离可提高导弹主体的成像质量,去除尾翼产生的对目标轮廓无意义的虚假散射中心。从目标主体成像结果中,可以较好地估计出弹头主体的散射中心的几何结构特征。同时,对于分离后的尾翼回波,由于其不受主体回波的混叠影响,更有利于估计弹头的自旋频率,对于弹头自旋频率的估计不在本文中赘述。

为验证文中提出的回波分离及成像方法在低信噪比情况下的鲁棒性,在回波中加入高斯白噪声,信噪比SNR=0 dB时,目标回波的1维距离像序列如图8(a)所示。图8(b)为噪声环境下窄带回波信号时频分析的结果,由于噪声的存在,导弹主体所引起的微多普勒变得模糊,而导弹尾翼散射中心引起的微多普勒则完全淹没在噪声中,变得不可辨识。基于本文提出的方法对图8(a)对应的回波进行分解,并重构导弹主体和导弹尾翼的1维距离像序列,分别如图8(c)和图8(d)所示。图8(e)和图8(f)分别给出回波分离前和分离后采用广义Radon变换成像的结果。图8(g)和图8(h)分别为回波分离后采用RD成像和通过Keystone变换进行越距离单元走动补偿后采用RD成像的结果,为减小模糊成像采用的回波数目为半个周期。从图中可以看出,基于RD算法对分离后的回波成像,其在距离向和多普勒向都会产生模糊。即使通过Keystone变换进行越距离单元走动补偿,仍然无法消除越多普勒单元走动造成的图像模糊。

5 结束语

当弹道中段目标包含非旋转对称部件结构时,由于非旋转对称部件所产生的回波与导弹主体回波混叠,使得导弹主体的雷达成像质量变差。针对该问题,本文提出一种基于复数经验模式分解方法的回波分离方法。该方法可以有效地将导弹非旋转对称部件产生的回波信号和导弹主体回波信号分解到不同的本征模态函数中,从而实现非旋转对称部件的回波分离,提高导弹主体的成像质量。最后通过仿真验证了本文提出算法的有效性。

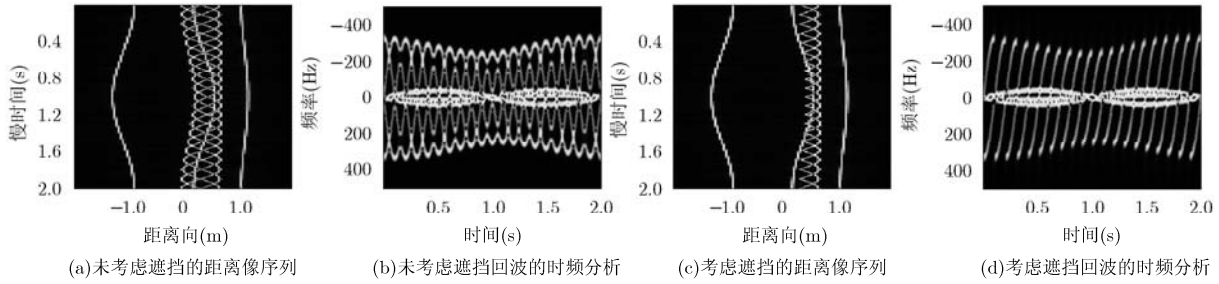


图6 目标1 维距离像序列和窄带回波信号时频分析结果

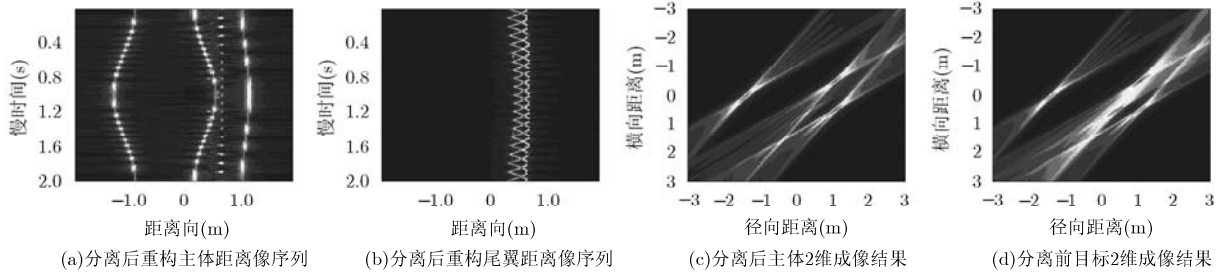


图7 目标主体和尾翼部件回波分离重构及成像结果(无噪声)

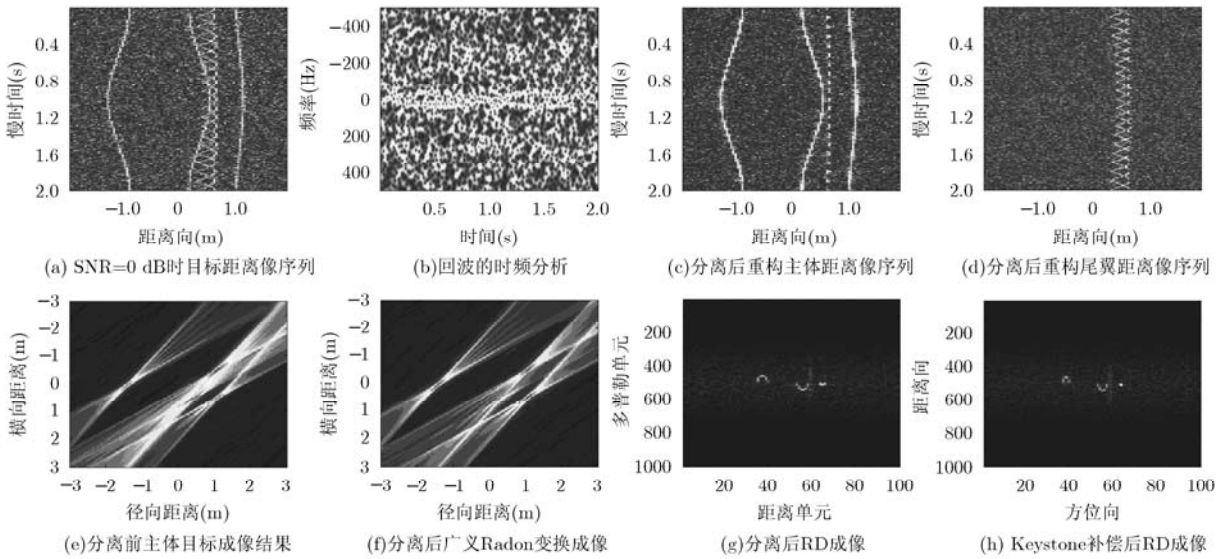


图8 目标主体和尾翼部件回波分离重构及成像结果(SNR=0 dB)

参考文献

[1] 邹小海, 艾小锋, 李永祯, 等. 基于微多普勒的圆锥弹头进动与结构参数估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2413-2419.
Zou Xiao-hai, Ai Xiao-feng, Li Yong-zhen, et al. Precession and structural parameter estimation of the cone-shaped warhead based on the micro-Doppler[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2413-2419.

[2] Wang T, Wang X S, Chang Y L, et al. Estimation of precession parameters and generation of ISAR images of ballistic missile targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1983-1994.

[3] Ding X F, Fan M M, Wei X Z, et al. Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(4): 942-949.

[4] 雷腾, 刘进忙, 李松, 等. 基于MP稀疏分解的弹道中段目标微动ISAR成像新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2649-2654.
Lei Teng, Liu Jin-mang, Li Song, et al. A novel ISAR imaging method of ballistic midcourse targets based on MP sparse decomposition[J]. *Systems Engineering and*

- Electronics*, 2011, 33(12): 2649–2654.
- [5] Xing M, Wu R, Lan J, *et al.* Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(2): 141–144.
- [6] Huo K, Liu Y X, Hu J M, *et al.* A novel imaging method for fast rotating targets based on the segmental pseudo keystone transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(4): 1464–1472.
- [7] Wang Q, Xing M D, Lu G Y, *et al.* High resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 22–31.
- [8] Zhang Q, Yeo T S, Tan S H, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291–299.
- [9] 马超, 许小剑. 空间进动目标的宽带雷达特征信号研究[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 636–642.
Ma Chao and Xu Xiao-jian. Modeling of wideband radar signature for precession space objects[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2011, 39(3): 636–642.
- [10] 雷腾, 刘进忙, 余付平, 等. 基于时间-距离像的弹道目标进动特征提取新方法[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 73–79.
Lei Teng, Liu Jin-mang, Yu Fu-ping, *et al.* A new precession signature extraction method of ballistic target based on range-profile[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(1): 73–79.
- [11] Ma Liang, Liu Jin, Wang Tao, *et al.* Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(9): 1957–1967.
- [12] 白雪茹. 空天目标逆合成孔径雷达成像新方法[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2011.
Bai Xue-ru. Study on new techniques for ISAR imaging of aerospace targets[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2011.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454: 903–995.
- [14] Rilling G, Flandrin P, Cjoncolves P, *et al.* Bivariate empirical mode decomposition[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(12): 936–939.
- [15] Bai X, Xing M, Zhou F, *et al.* Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3514–3523.
- 袁 斌: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 成像和目标识别.
- 徐世友: 男, 1978年生, 讲师, 博士, 主要从事雷达信号处理与目标识别方面研究.
- 刘 洋: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为 ISAR 成像和目标识别.
- 陈曾平: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统与目标识别方面研究.