

基于时频分析的微动弹道目标 ISAR 成像方法

龙戈农¹, 章捷², 童宁宁¹, 冯存前¹, 牛超¹

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2.94782部队,浙江杭州,310020)

摘要 为克服弹道目标在微动情况时,其散射点的多普勒频率会随微动而变化,最终影响弹道目标的成像质量问题,提出了利用 abor 变换进行时间选择成像的方法。通过时频分析的方法,在时频域上找寻多普勒频率近似于直线变化的时间段,并在此时间段中对目标进行成像。仿真结果表明:在目标存在微动情况下,选择多普勒频率近似为直线的的时间区间进行成像,能有效地聚集 ISAR 成像,仿真分析验证了该方法的有效性。

关键词 弹道目标;逆合成孔径雷达;微动;成像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.01.010

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)01-0042-04

Ballistic Target ISAR Imaging Based on Time-Frequency Analysis

LONG Ge-nong¹, ZHANG Jie², TONG Ning-ning¹, FENG Cun-qian¹, NIU Chao¹

(1.Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2.Unit 94782 of PLA, Hangzhou 310020, China)

Abstract: When ballistic target is moving with micro-motion, the Doppler frequency of its scattering points will be modulated by micro-motion which will have negative effect on imaging. In this article, a new method called time selection imaging based on abor transformation formula is put forward, which will focus image effectively. The proposed method searches the Doppler frequency in time quantum of straight line approximation in time-frequency domain for the target. And the effectiveness of this method is verified by simulation.

Key words: ballistic target; ISAR; micro-motion; imaging

弹道目标的识别因其战术意义而被人重视,逆合成孔径雷达成像是鉴别弹道目标真伪的有效方法之一。直接观察目标形态能有效地将真实目标与假目标等的伴飞物分开。然而,弹道目标在运行过程中伴随着微动(Micro-Motion)现象。微动现象是指目标除质心平动以外的震动、转动和加速运动等的

微小运动^[1-3]。ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像依赖于目标绕中心转动所产生的多普勒频率,而微动将影响目标上散射点的多普勒频率,从而造成图像模糊。现有的研究认为目标对雷达旋转运动可以归结为二维平面内的匀速旋转、二维平面内的非匀速旋转、三维旋转^[4]。雷腾等提

收稿日期:2013-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372166)

作者简介:龙戈农(1979-),男,陕西富平人,讲师,主要从事雷达信号处理研究.E-mail:longgn@163.com

引用格式: 龙戈农,章捷,童宁宁,等. 基于时频分析的微动弹道目标 ISAR 成像方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(1):42-45. LONG Genong, ZHANG Jie, TONG Ningning, et al. Ballistic Target ISAR Imaging Based on Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(1): 42-45.

出了一种基于匹配追踪 (Matching Pursuit, MP) 稀疏分解的微动 ISAR 成像算法,解决自旋转锥目标微动对成像的影响^[5];李斌等提出了基于微动分析和 Chirplet 分解的 ISAR 成像,能滤除转动和震动产生的微多普勒,该方法对有微动部件的目标较为有效^[6]。

针对图像模糊这一问题,本文提出一种基于时频分析的时间选择成像方法,将在一定程度上有效地减轻图像的模糊。

1 弹道目标微动及其对成像的影响

1.1 弹道目标的微动

弹道目标在运动的过程中伴有微动。微动是以多种形式存在的,如摆动,自旋,锥旋^[1]等。在各种形式的微动中,以锥旋对目标成像的影响最大。锥旋是指锥体目标以空间定向为对称轴进行旋转的运动,见图 1。对于旋转对称弹头而言,由于其散射特性只与方位角有关,而与俯仰角无关,因此锥旋在二维平面上的表现可以近似看作目标以空间定向为中心对称轴进行摆动^[2],见图 2。此时,方位角的变化可表示为:

$$\varphi(t) = \cos[\cos\theta\cos\beta + \sin\theta\sin\beta\cos(\omega_P t + \varphi_0)] \quad (1)$$

式中: θ 为进动角; β 为雷达视线方向在平动坐标系中的俯仰角; ω_P 为进动角速度; φ 为初始相位角。

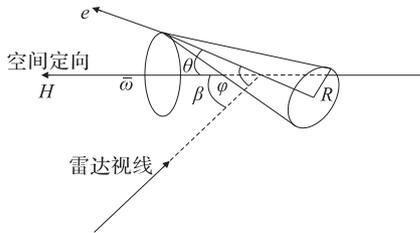


图 1 弹道目标的进动

Fig.1 The precession of warhead

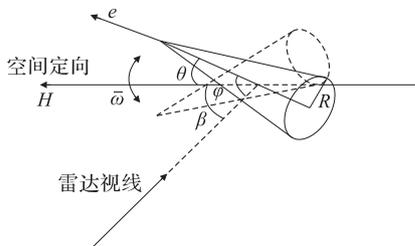


图 2 进动近似于摆动

Fig.2 Approximate precession to swing

1.2 微动对目标成像所产生的影响

为了简化说明,本文所用的成像模型为转台模型^[2],见图 3。

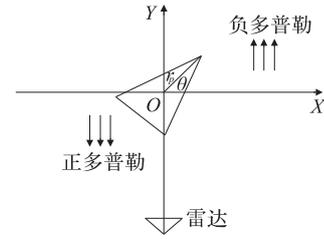


图 3 转台模型

Fig.3 The model of rotation

目标上的一点 p 到雷达的距离为:

$$r = [r_0^2 + r_p^2 + 2r_0r_p\sin(\theta(t))]^{1/2} \quad (2)$$

式中: p 点的坐标为 (x_p, y_p) ; r_0 为旋转中心到雷达的距离; r_p 为散射点到旋转中心的距离 $(x_p^2 + y_p^2)^{1/2}$; $\theta(t)$ 为角度变化的函数。对于弹头平动而言,其平动导致的姿态角变化在短时间内可认为是匀速转动的,对应的角度变化函数为:

$$\theta_1(t) = \omega t \quad (3)$$

式中: ω 为转台转动的角速度。

目标微动将会产生角度变化,对于旋转对称弹头而言,微动引起的角度变化为:

$$\theta_2(t) = \cos[\cos\theta\cos\beta + \sin\theta\sin\beta\cos(\omega_P t + \varphi_0)] \quad (4)$$

一般来说,章动角比较小,通常为 $5^\circ \sim 10^\circ$,上式又可近似为:

$$\theta_2(t) \approx \beta - \theta\cos(\omega_P t + \varphi_0) \quad (5)$$

式(5)表明,进动导致的角度变化可以认为是摆动。

弹头目标的运动是平动和微动的合成,因此,最终目标角度的变化规律是匀速转动及摆动的合运动,而其角度变化规律为:

$$\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t) = \omega t + \beta - \theta\cos(\omega_P t + \varphi_0) \quad (6)$$

当目标为单纯的匀速转动时 ISAR 成像是清晰的,见图 4。若在匀速转动的基础上叠加了摆动,则用相同的成像方法所成的二维像将出现模糊,不能聚焦,见图 5。

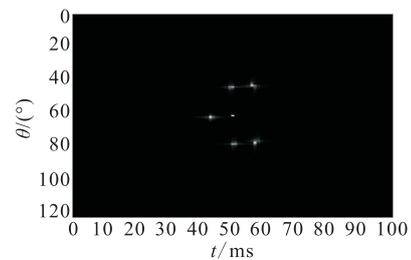


图 4 无微动干扰情况下成像效果

Fig.4 ISAR image without micro-motion

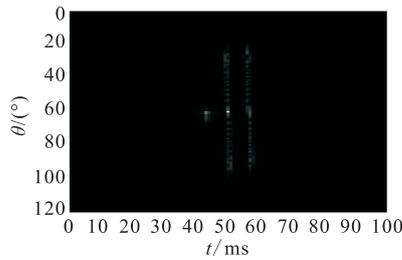


图 5 微动干扰后成像模糊

Fig.5 ISAR image with micro-motion

因此,在有微动的情况下,用原有的成像方法将大大影响到成像的质量。

2 时间选择成像

在目标绕旋转中心旋转的角度 θ 较小的时候,式(2)可以近似为^[6]:

$$r = r_0 + x_p \sin(\theta(t)) + y_p \cos(\theta(t)) \quad (7)$$

回波信号上散射点的多普勒频率由该散射点相对于雷达的径向运动所决定,所以其多普勒频率可以写成:

$$f_d = \frac{2dr}{\lambda dt} = \frac{2d\theta(t)}{dt} (x_p \cos(\theta(t)) - y_p \sin(\theta(t))) \quad (8)$$

当 $\theta(t) = \omega t$ 时,由于转动角度非常小,其多普勒频率近似为一条直线,见图 6。

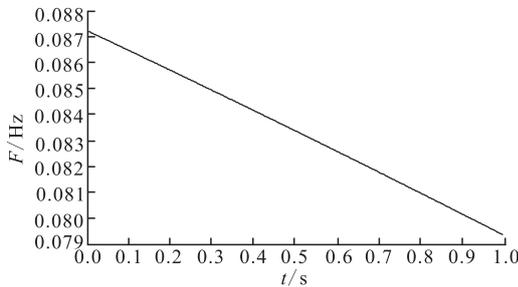


图 6 转台运动产生的多普勒频率

Fig.6 The Doppler frequency of rotation

在此情况下,利用传统的成像算法能得到清晰的、聚焦的图像。然而,当 $\theta(t) = \omega t + \beta - \theta \cos(\omega_p t + \varphi_0)$ 时,其多普勒频率发生扭曲,见图 7。观察曲线后不难发现,曲线中依然有相对平直的时间区间,只要选择相对平直的时间区间进行成像,便能得到清晰的图像。

因此,时间选择成像的一般方法如下:

- 1)回波信号完成距离方向压缩及包络对齐后,回波满足转台模型;
- 2)利用 Gabor 变换将信号再展现时频域上;
- 3)对时频域上的信号进行分析,寻找多普勒频率相对平直的时间并记录;
- 4)选择所记录时间相对应回波信号进行成像。

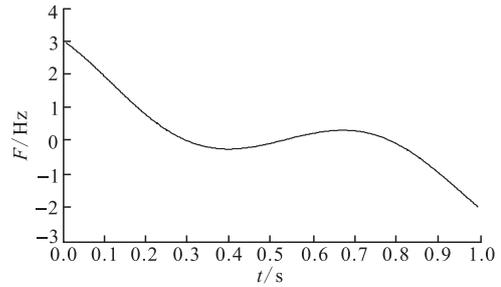


图 7 合成运动产生的多普勒频率

Fig.7 The Doppler frequency of compose motion

3 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性,做如下仿真实验。设雷达载频 f_0 为 4 GHz,设弹道目标模型见图 8。

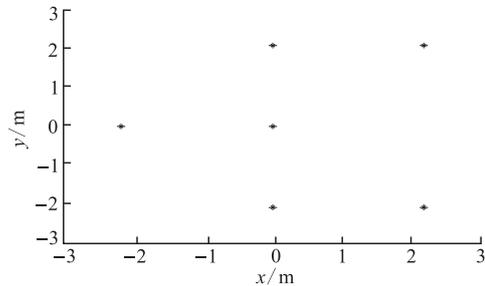


图 8 目标模型

Fig.8 Target model

此目标为转台模型,旋转中心点的坐标为 (0,0)。角度变化函数 $\theta_1(t) = \omega t$, 设 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$, 设角度变化函数 $\theta_2(t) = \sin(\omega_p t + \varphi)$ 中 $\omega_p = 2\varphi = 0$ 。

将回波信号进行 Gabor 变换后可得信号的时频图,见图 9。

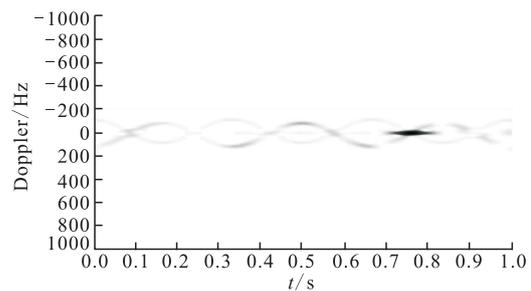


图 9 回波信号在时频域上的形式

Fig.9 The time-frequency result of signal

通过运算可以得到时频信号的边界,见图 10。将上边界减去下边界,取最高点和最低点(见图 11)并算得最高点与最低点之间的时间差,便得到旋转的半周期 T 。取某一最低点的时刻 t_i 为中心时刻,选择成像的时间区间变为 $[t_i - T, t_i + T]$ 。利用此时间区间对原回波信号进行成像,可得较为清晰的成像结果,见图 12。

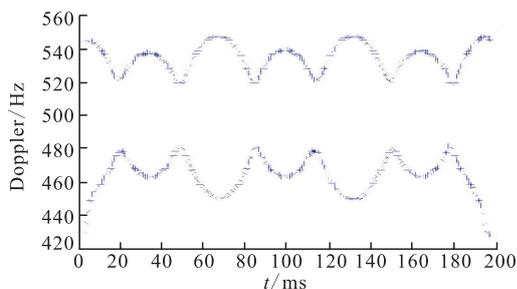


图 10 回波信号在时频域上的边界

Fig.10 The edge of time-frequency result

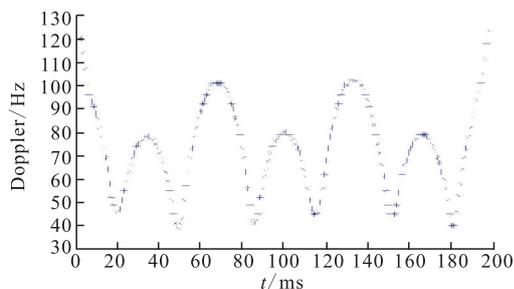


图 11 对上边界与下边界的差作图

Fig.11 The distance between the maximal and minimal edge

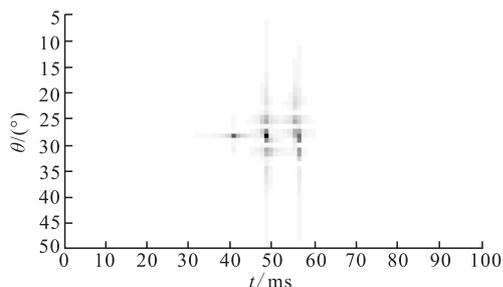


图 12 时间选择成像结果

Fig.12 Image results after timeselected

但是该方法的选择时间长度与目标锥旋频率相关。锥旋频率越高,选择时长越短,积累的雷达回波也就越少。相反的,若锥旋频率较低,则回波积累数将增加,成像效果较好。

4 结语

本文提出了利用 Gabor 变换进行时间选择成像的方法,在目标存在微动的情况下,选择多普勒频

率近似为直线的时间区间进行成像,能有效地聚焦 ISAR 成像。仿真分析验证了该方法的有效性。

参考文献(References):

[1] Chen V C. Micro-Doppler Effect of Micro-Motion Dynamics: A Review[C]//Proceedings of SPIE on Independent Component Analyses Wavelets and Neural Network.Orlando USA:[s.n.],2003(02): 240-249.

[2] Chen V C, Li F. Analysis of Micro-Doppler Signatures [J]. IEE Proceeding on RadarSnar and Navigation, 2003, 150(4): 271-276.

[3] Chen V C, Li F, Ho S S. Micro-Doppler Effect in Radar-PhenomenonModel and Simulation Study[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1):2-21.

[4] 刘维建,陈建文.弹道导弹目标微动特征分析及参数提取[J].空军雷达学院学报,2009,23(3):175-177.

LIU Weijian, CHEN Jianwen. Analysis of Minor-Motion Feature and Its Parameters Extraction for Ballistic Missile Target[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2009, 23(3): 175-177. (in Chinese)

[5] 刘丽华,王壮,胡卫东,等.弹道导弹进动周期雷达测量提取方法研究[J].现代雷达,2008,30(1):26-29.

LIU Lihua, WANG Zhuang, HU Weidong, et al. Precession Period Extraction of Ballistic Missile Based on Radar Measurement[J]. Modern Radar, 2008, 30(1): 26-29. (in Chinese)

[6] 王琦.空间目标 ISAR 成像的研究[D].西安:西安电子科技大学,2007.

WANG Qi. Research on ISAR of Space Target[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)

[7] 金文彬,刘永祥,任双桥,等.锥体目标空间进动特性分析及其参数提取[J].宇航学报,2004,25(4)408-410.

JIN Wenbin, LIU Yongxiang, REN Shuangqiao, et al. Character Analyzing of Spatial Precession for Cone and Its Parameter Extracting[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(4): 408-410. (in Chinese)

(编辑:田新华)