

组网雷达弹道目标三维微动特征提取

张 栋¹, 冯存前¹, 贺思三¹, 师俊朋¹, 魏代春²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 94175 部队, 新疆乌鲁木齐, 830006)

摘要 研究弹道目标中的滑动型散射中心三维微动特征提取问题。分析滑动型散射中心的特点, 介绍一种基于半周期时延相乘的散射中心微动特征提取方法, 建立滑动型散射中心和理想散射中心微动的数学联系, 利用组网雷达的多视角特性, 从回波信号中提取参数, 通过构造多元非线性方程组, 以提取的参数作为变量, 求解目标三维微动参数和部分结构特征。仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词 组网雷达; 微多普勒; 滑动型散射中心; 三维微动特征

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.009

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0034-04

Extraction of Three-Dimensional Micro-motion Feature from Ballistic Target in Netted Radar

ZHANG Dong¹, FENG Cun-qian¹, HE Si-san¹, SHI Jun-peng¹, WEI Dai-chun²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Unit 94175, Urumqi 830006, China)

Abstract: Extraction method of three-dimensional micro-motion feature from sliding-type scattering center in ballistic target is studied. Firstly, the characteristics of sliding-type scattering center are analyzed in the paper, a new feature extraction method based on half period delay multiplication is introduced, and the mathematical relationships between sliding-type scattering center and ideal scattering center are built up. And then parameters are extracted from echo signals by utilizing the multi-view characteristics of netted radar. Through the structure of nonlinear multivariable equation systems, the three-dimensional micro-motion parameters and part of the structure features are solved by taking an extracted parameter as variate. The simulation results show that the proposed algorithm is effective.

Key words: netted radar; micro-Doppler; sliding-type scattering center; three-dimensional micro-motion feature(换)

微动特征是目标的独特特征, 包含更多的目标细节信息, 近年来基于微动特性的弹道目标识别受到广泛关注^[1-3]。Chen V C 以理想点散射模型为基础, 推导了振动、旋转、锥旋、摆动等基本微动的运动

学模型, 并给出了单频雷达回波信号形式, 指出上述微动信号是正弦调频信号, 微多普勒具有正弦形式^[4-6]。马梁^[7]等人对弹体不同位置散射中心的微动特性进行了较为完整的建模。雷腾^[8]研究了一种

收稿日期: 2013-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372166); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8308)

作者简介: 张 栋(1990-), 男, 河北辛集人, 硕士生, 主要从事信号处理研究. E-mail: zhangdongtougao@163.com

引用格式: 张栋, 冯存前, 贺思三, 等. 组网雷达弹道目标三维微动特征提取[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(4): 34-37. ZHANG Dong, FENG Cunqian, HE Sisan, et al. Extraction of three-dimensional micro-motion feature from ballistic target in netted radar[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 34-37.

基于半周期时延相乘的弹道目标底面边缘结构回波重构方法,重构后的回波可以等效为4个理想点散射中心微动的叠加,这一结论建立了滑动和理想散射中心微动的数学联系,为非理想散射中心微动特征提取提供了新的思路。

然而,由于在单基雷达条件下只能提取雷达视线方向(Line of Sight, LOS)上的微动特征,限制了识别的精确性,而在组网雷达中,目标的微动在不同视角上有着不同的投影分量,这就为目标三维微动特征提供可能。而且目前组网雷达微动提取技术大部分基于理想散射中心,对于非理想散射中心研究较少。本文以线性调频信号雷达组网为例对非理想散射中心进行研究。

1 非理想散射中心理想化

假设锥体弹道目标上滑动型散射中心的位置与雷达视线方向的关系见图1。以目标对称轴与锥旋轴的交点O作为坐标原点,锥旋轴为Z轴且Z轴正向为锥顶方向,建立参考坐标系(X, Y, Z),定义YOZ平面为初始时刻对称轴与Z轴所在平面,X轴方向符合右手螺旋准则。弹道目标绕锥旋轴以角速度 ω_c 做锥旋运动,锥旋角为 θ 。假设雷达视线在参考坐标系(X, Y, Z)中的方位角为 α' ,与Z轴夹角为 β' ,在整个组网雷达所构成的全局坐标系中的方位角和俯仰角分别为 α 和 β ,雷达视线方向与圆环相交于p、q 2点,t时刻雷达视线与对称轴的夹角为 φ_t ,坐标原点O与p、q 2点的距离为l,Op、Oq与弹道目标对称轴的夹角为 γ 。在t时刻,Op和Oq与雷达视线的夹角分别为 $\pi - \varphi_t + \gamma$ 和 $\pi - \varphi_t - \gamma$ 。

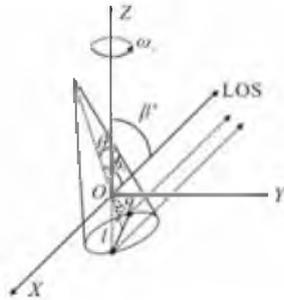


图1 雷达视线与滑动型散射中心的几何关系
Fig.1 Geometry of radar LOS and sliding-type scattering center

通过计算可以得出滑动型散射中心微距离项存在与夹角 φ_t 相关的非正弦调制项。这是由于雷达电磁波入射面随目标对称轴的转动而变化造成散射中心在弹道导弹底面边缘结构上滑动而产生的。

文献[7]用泰勒级数的原理对非正弦调制项进行泰勒近似,则 $R_p(t)$ 、 $R_q(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} R_p(t) = R_0 + (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2) \sin(\omega_c t - \alpha) - c_0 \cos(2\omega_c t - 2\alpha) \\ R_q(t) = R_0 + (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2) \sin(\omega_c t - \alpha) + c_0 \cos(2\omega_c t - 2\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

式中的系数 a_1, b_1, a_2, b_2, c_0 与 $l, \gamma, \beta', \theta$ 有确定函数关系。

可见,滑动散射中心经过泰勒近似后具有周期调制特性,而且可以看出是受 ω_c 和 $2\omega_c$ 2个频率叠加的正弦调制,调制的规律与进动角、弹道目标底面边缘结构参数以及雷达视线方向有关。

设雷达发射线性调频信号,则弹道目标底面边缘上p、q 2点的回波可表示为:

$$\begin{cases} s_p(t_k, t_m) = \sigma_p \text{rect} \left[\frac{t_k - 2R_p(t_m)/c}{T_p} \right] \cdot \exp \left\{ j2\pi \left[f_c (t - 2R_p(t_m)/c) + \frac{1}{2} \gamma (t_k - 2R_p(t_m)/c)^2 \right] \right\} \\ s_q(t_k, t_m) = \sigma_q \text{rect} \left[\frac{t_k - 2R_q(t_m)/c}{T_p} \right] \cdot \exp \left\{ j2\pi \left[f_c (t - 2R_q(t_m)/c) + \frac{1}{2} \gamma (t_k - 2R_q(t_m)/c)^2 \right] \right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中 σ_p, σ_q 分别为p、q 2点的电磁散射系数。设参考距离为 R_{ref} ,令 $R_{\Delta p}(t_m) = R_p(t_m) - R_{ref}, R_{\Delta q}(t_m) = R_q(t_m) - R_{ref}$,对回波信号进行Stretch处理后,令 $t'_k = t_k - 2R_0/c$,并补偿视频残余项以后,得到 $s_{if}(t'_k, t_m) = s_{ip}(t'_k, t_m) + s_{iq}(t'_k, t_m)$,考虑到2个微距离 $R_{\Delta p}(t_m)$ 和 $R_{\Delta q}(t_m)$ 的调制特性取决于 ω_c 和 $2\omega_c$ 2个频率分量,且调制周期 $T = 2\pi/\omega_c$,而在相隔半个调制周期的时间内,p、q 2点的径向距离变化仅与 ω_c 分量有关与 $2\omega_c$ 分量无关,这样就可以不用考虑 $2\omega_c$ 分量的影响,实现滑动型散射中心的理想化,而所需的微动周期 ω_c 可以通过时间距离像包络相关的微动周期特征提取方法来得到。

文献[8]将目标回波和回波的半周期时延信号相乘后得到:

$$s_c(t'_k, t_m) = s_{if}(t'_k, t_m) s_{if}(t'_k, t_m + T/2) \quad (3)$$

在快时间 t'_k 内对 $s_c(t'_k, t_m)$ 进行傅里叶变换得到4个分量的线性叠加,而它们的相位项分别为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \exp \left\{ -j \frac{8\pi f_c}{c} (\Delta R + a_1 + a_2 - c_0 \cos(2\omega_c t_m - 2\alpha)) \right\} \\ \varphi_2 = \exp \left\{ -j \frac{8\pi f_c}{c} (\Delta R + a_1 - a_2 + c_0 \cos(2\omega_c t_m - 2\alpha)) \right\} \\ \varphi_3 = \exp \left\{ -j \frac{8\pi f_c}{c} (\Delta R + a_1 + b_2 \sin(\omega_c t_m - \alpha)) \right\} \\ \varphi_4 = \exp \left\{ -j \frac{8\pi f_c}{c} (\Delta R + a_1 - b_2 \sin(\omega_c t_m - \alpha)) \right\} \end{cases} \quad (4)$$

可见,经半周期时延相乘后,回波信号变为4个

分量组合,而这些分量的相位均为正弦调制相位,对其进行距离压缩,可将目标的时间-距离像中原来的 2 条非正弦曲线转化为 4 条中值不为零的正弦曲线,这又将滑动型散射中心的微动特征提取问题回归到了理想散射中心的微动特征提取问题,从而实现了弹道目标底面边缘滑动型散射中心微动信号的理想化。

2 三维微动提取

观察式(4)可知,组网雷达中任意一部雷达经过自身回波半周期时延相重构后的回波中时间-距离像曲线参数包含 2 个幅度信息: $2c_0$ 和 $2b_2$; 4 个相位信息: $-\alpha', \pi-\alpha', \pi/2-2\alpha'$ 和 $3\pi/2-2\alpha'$; 3 个中值信息: $2(\Delta R+a_1+a_2)$ 、 $2(\Delta R+a_1-a_2)$ 和 $2(\Delta R+a_1)$ 。而且其中中值相同的 2 条正弦曲线的幅值均为 $2b_2$,但是相位分别为 $-\alpha'$ 和 $\pi-\alpha'$,假设通过扩展 Hough 变换提取出的正弦曲线参数信息分别为:频率为 ω_c 的曲线对应的 2 个分量 (A_1, φ_1, d_1) 、 (A_2, φ_2, d_2) ,频率 $2\omega_c$ 的曲线对应的 2 个分量 (A_3, φ_3, d_3) 、 (A_4, φ_4, d_4) ,由于幅值 A_1 可以很容易的从这些参数中分离出来,重点研究幅值 A_1 ,从以上分析可知,振幅 A_1 与 $l\sin\gamma, \theta, \beta'$ 有关, $l\sin\gamma$ 是圆环半径,而 β' 与在全局坐标系下的雷达视角 (α, β) 以及锥旋轴有如下关系:

$$\cos\beta' = \frac{\cos\beta\sin\alpha\omega_x + \cos\beta\cos\alpha\omega_y + \sin\beta\omega_z}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}} \quad (5)$$

因此,可以通过位于不同视角的多部雷达的合作,来求得其中的未知参数。假设组网雷达中总共有 N 个雷达,各个雷达可以得到不同的正弦曲线幅值 $A_{1K}, K=1, 2, \dots, N$,而不同的 A_{1K} 与圆环半径、进动角、锥旋以及各个雷达在全局坐标系下的视线角 α_K, β_K 有对应关系。

综上所述,建立组网雷达中圆环边缘散射结构三维微动特征提取方程为:

$$\begin{cases} A_{1K} = -2l\sin\gamma \frac{\sin\theta\sin\beta_K\cos\theta\cos\beta_K\sqrt{1-\cos^2\theta\cos^2\beta_K}}{1-\cos^2\theta\cos^2\beta_K} \\ \cos\beta_K = \frac{\cos\beta_K\sin\alpha_K\omega_x + \cos\beta_K\cos\alpha_K\omega_y + \sin\beta_K\omega_z}{\omega_c} \\ K=1, 2, \dots, N \\ \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \omega_c^2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中的方程组中包含 2 个独立方程和 5 个未知参数即进动角、锥旋矢量的 3 个分量 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 和底面半径,则经过数学分析可知,可以通过 4 部雷

达的测量数据构建方程组,利用 Matlab 中的 fsolve 函数实现这 5 个参数的解算,最终达到三维微动特征和部分结构特征的提取。

3 仿真分析

仿真参数设置:微动周期 T 为 0.5 s,坐标原点 O' 与底面边缘的距离为 $\sqrt{2}/2$ m,圆环边缘与 O' 点的连线与对称轴的夹角为 45° ,目标对称轴与锥旋轴的夹角为 30° ,4 部雷达视线在全局坐标系下的方位角和高低角分别为 $(30^\circ, 68^\circ)$ 、 $(35^\circ, 76^\circ)$ 、 $(40^\circ, 84^\circ)$ 、 $(45^\circ, 89^\circ)$,在全局坐标系中 $\omega_c = 4\pi$ rad/s,锥旋矢量为 $(\pi, \sqrt{3}\pi, -2\sqrt{3}\pi)$ rad/s,线性调频信号雷达载频分别为 8 GHz, 9 GHz, 10 GHz, 11 GHz,脉冲重复频率为 2 kHz,带宽均为 2 GHz。

图 2~图 5 分别为经过重构的回波时间-距离像。从图中可以清楚的看到时间-距离像中的 4 条单一频率的正弦曲线,而且几幅图中的正弦曲线均不相同,这就验证了前面理论分析得到的正弦曲线参数与雷达视角关系的正确性,可见本文介绍的滑动散射中心理想化处理方法有效地避免了多种正弦频率组合调制项的干扰,实现了非理想散射中心的理想化。

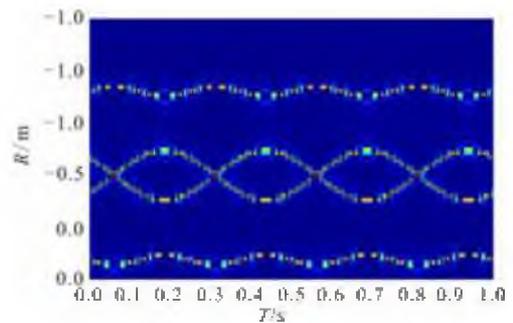


图 2 雷达 1 得到的重构图

Fig.2 The reconstruct picture of radar 1

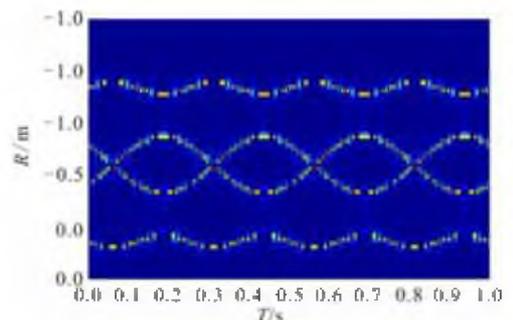


图 3 雷达 2 得到的重构图

Fig.3 The reconstruct picture of radar 2

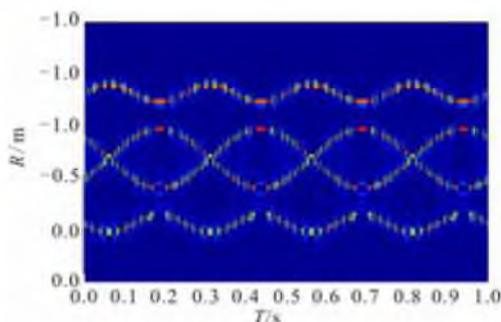


图4 雷达3得到的重构图

Fig.4 The reconstruct picture of radar 3

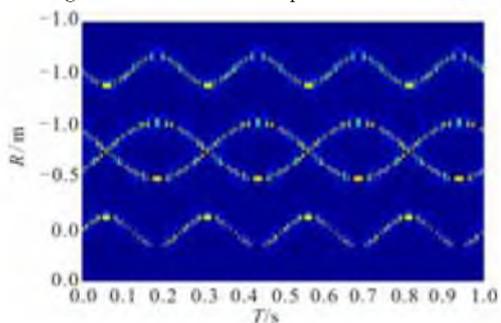


图5 雷达4得到的重构图

Fig.5 The reconstruct picture of radar 4

经过扩展 Hough 变换,对各雷达的时间-距离像中4条正弦曲线进行参数提取后,可以得到所需要的 A_{1k} 值,见表1。可以看出各部雷达所提取的振幅值均不相同,而且与理论值之间存在合理误差,证明该方法有效可行。

表1 正弦曲线振幅

Tab.1 The amplitude of sine wave

雷达	A_{1k}/m
1	0.246 4(理论值 0.248 3)
2	0.274 8(理论值 0.276 7)
3	0.286 7(理论值 0.288 6)
4	0.283 3(理论值 0.285 2)

将得到的这些振幅提取值代入式(6)后通过 fsolve 函数解得: $l \sin \gamma = 0.483 2 \text{ m}$, $\theta = 33.602 4^\circ$, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (3.883 3, 5.253 9, -10.743 5) \text{ rad/s}$, 与前面的仿真设置值 $l \sin \gamma = 0.5 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (\pi, \sqrt{3}\pi, -2\sqrt{3}\pi) \text{ rad/s}$, 存在的误差在允许范围之内,因此,充分证明了本文所提方法的正确性。由于传统的单部雷达的视角限制,因此,以前所提出的方法仅能获得散射中心在雷达视线上的微动参数,而且大部分提取方法都是局限于理想的散射中心,对非理想的散射中心研究很少,但本文所提出的组网雷达处理方法不仅解决了滑动型散射中心的微动参数提取问题,而且在获得进动角的同时,还得到了部分结构参数(弹道目标底面半径)以及三维的锥旋矢量,这样就使得提取的参数更加准确化和精

细化,获得了更多的目标信息。

4 结语

本文从提取弹道目标精细微动特征和结构出发,研究了弹道目标底面边缘结构中滑动散射点的微多普勒效应,并利用雷达网的多视角特性成功提取底面边缘结构的三维微动参数和部分结构特征参数,克服了普通单基雷达仅能提取目标雷达视线方向上微动分量以及只针对理想散射中心的局限,为特殊目标识别提供了更为准确丰富特征信息。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Luo Ying, Chi Long, Zhang Qun, et al. A novel method for extraction of micro-Doppler signal[C]//IEEE 2007 international symposium on microwave antenna propagation and EMC technologies for wireless communications. Hangzhou: IEEE press, 2007:1458-1462.
- [3] Chen V C, Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features [C]//IEEE international radar conference. Arlington, Virginia: IEEE press, 2005:348-353.
- [4] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. IET signal processing, 2008, 2(3): 291-300.
- [5] Chen V C, Li F. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEEE proc radar sonar navig, 2003, 150(4): 271-276.
- [6] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform [C]// Proceedings of IEEE workshop on statistical signal and array processing. [S.l.]: IEEE press, 2000: 463-466.
- [7] 马梁, 刘进, 王涛, 等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微多普勒特性[J]. 中国科学, 2011, 41(5): 605-616. MA Liang, LIU Jin, WANG Tao, et al. Micro-Doppler characteristics of sliding-type scattering center on rotationally symmetric target[J]. Science in China, 2011, 41(5): 605-616. (in Chinese)
- [8] 雷腾. 雷达目标微动特征提取与三维重构[D]. 西安: 空军工程大学, 2012. LEI Teng. Micro-motion signature extraction and 3D reconstruction of radar targets[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2012. (in Chinese)

(编辑:田新华)