

窄带雷达网弹道目标微动特征提取

许 丹¹, 田 波¹, 冯存前¹✉, 耿志远²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 目标微动特征是弹道中段识别的有效特征之一。针对单部雷达获取目标微动信息的局限性, 提出了一种利用窄带雷达网进行弹道目标进动特征提取的方法。首先, 建立了锥体进动模型和窄带信号模型, 得到了散射点微多普勒表达式。然后, 在锥体非理性散射点转化为理想散射点的基础上, 通过频谱分析, 实现了不同视角下散射点的匹配关联。最后, 利用锥顶微多普勒信号对锥底进行补偿, 在雷达视角方差最小时求得补偿系数。再联立 2 部雷达的微多普勒信息即可求出参数。仿真结果表明该方法能够精确提取微动参数和结构参数。

关键词 窄带雷达网; 弹道目标; 频谱分析; 微动; 特征提取

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.008

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0047-05

Micro-motion Feature Extraction of Ballistic Targets Based on Narrowband Radar Network

XU Dan¹, TIAN Bo¹, FENG Cunqian¹✉, GENG Zhiyuan²

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

2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Targets' micro-motion feature is one of the effective features used for recognition at the middle section of the ballistic curve. Aimed at the problem that a single radar is rather limited in extracting micro-motion information, this paper proposes a novel algorithm based on the narrowband radar network to extract precession features. First, a cone-shaped target model and a narrowband signal model are established. Then, each scattering point in different perspective is matched by frequency analysis based on transforming non-ideal scattering point into ideal scattering point. Finally, by using the micro-Doppler of conic node to compensate the bottom micro-Doppler of cone, compensation coefficient is solved when the radar aspect variance is minimal. Furthermore, parameters are obtained by combining the micro-Doppler of two radars. The simulation results show that the algorithm can extract micro-motion parameters and structured parameters accuracy.

Key words: narrowband radar network; ballistic targets; frequency analysis; micro-motion; feature extraction

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61372166;61501495)

作者简介: 许 丹(1992—),男,安徽合肥人,硕士生,主要从事雷达信号处理与电子对抗研究. E-mail: xudanlw@163.com

通信作者: 冯存前(1975—),男,陕西富平人,教授,主要从事雷达信号处理与电子对抗研究. E-mail: fengcunqian@sina.com

引用格式: 许丹, 田波, 冯存前, 等. 窄带雷达网弹道目标微动特征提取 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 47-51. XU Dan, TIAN Bo, FENG Cunqian, et al. Micro-motion Feature Extraction of Ballistic Targets Based on Narrowband Radar Network [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 47-51.

弹道导弹是现代高技术战争中重要的作战武器,具有威力大、射程远、精度高等优点^[1-2]。在弹道导弹防御中,目标特征提取与识别被认为是防御的关键^[3]。目前,弹道目标特征提取主要包括 RCS 特征、弹道运动特征、微动特征、距离像特征等。微动特征描述的是弹道目标细微的运动特性及精细的结构特征,不易控制和模仿^[4]。自 V. C. Chen 首次将微动概念引入到雷达目标识别以来,利用目标微动特征进行目标识别的方法已成为雷达目标识别领域新的研究热点^[5-6]。

组网雷达能够获得目标不同视角上的微动信息,在抗干扰、克服姿态敏感、数据优化等方面较单部雷达有较明显的优势。文献[7]通过分析圆锥弹头 3 个散射中心微多普勒表达式之间的相关性,在不同视角下实现了微动参数和结构参数的提取。文献[8]利用组网雷达多视角特性实现了微动参数的求取,同时对求取的参数进行数据融合优化,实现了参数的高精度求取。文献[9]采用循环迭代的方法实现了微动参数的求解,但是循环迭代的方法易受初始值的影响,同时迭代的次数也不易确定。文献[10]对雷达参数与目标参数之间关系进行了分析,得出了要对参数进行解耦至少需要 2 个不同视角的观测信息。同时分析了在一定范围内,2 个雷达视角之间差距越大,参数估计的越精确。

本文对基于窄带雷达网的弹道目标进动特征提取进行了研究。

1 微动建模

1.1 锥体进动建模

进动锥体目标模型见图 1,锥体对称轴与锥旋转轴交于 O 点,锥体底面半径为 r ,锥顶与 O 点的距离为 h_1 ,底面中心与 O 点的距离为 h_2 ,半锥角为 ϵ ,进动角为 θ ,进动角速度为 ω 。雷达视线与锥体对称轴的夹角(观测角)为 β ,与进动轴的夹角为 α 。在弹道中段的大部分时间内,由于遮挡效应,雷达只能观测到 A 和 C 2 个强散射点,此时雷达视角满足 $\beta \in (0, \pi/2 - \epsilon)$ ^[7]。

通过几何推导可得雷达视线角 $\beta(t)$ 满足:

$$\cos\beta(t) = \cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\alpha\cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: φ_0 为初相。

假设平动分量已补偿,设初始时刻雷达距 O 点的距离为 R_0 且满足远场条件。散射点 A 和 C 到雷达的径向距离表达式为:

$$\begin{cases} R_A = R_0 - h_1\cos\beta(t) \\ R_C = R_0 + h_2\cos\beta(t) - r\sin\beta(t) \end{cases} \quad (2)$$

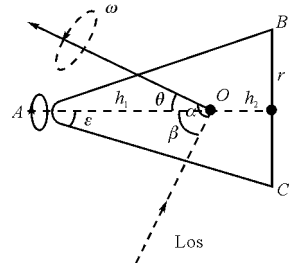


图 1 锥体进动模型示意图

Fig. 1 The sketch map of cone precession model

1.2 窄带信号模型

假设窄带雷达发射单频脉冲信号,在光学区,目标回波可以等效为几个强散射中心的回波之和^[8],若目标上第 k 个散射点的散射系数为 σ_k , t 时刻与雷达的距离为 $R_k(t)$,则经正交双通道解调可以得到回波基带信号为:

$$s_b(t) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp\left[j \frac{4\pi f}{c} R_k(t)\right] \quad (3)$$

对式(3)进行时频分析可得到第 k 个散射点的微多普勒表达式为:

$$f_k(t) = \frac{2f}{c} \frac{d}{dt} R_k(t) \quad (4)$$

由式(2)可以得到锥体散射点的微多普勒表达式为:

$$\begin{cases} f_A = 2\omega h_1 \sin\theta \sin\alpha \sin(\omega t + \varphi_0) / \lambda \\ f_C = \frac{2\omega(-h_2 + r/\tan\beta(t)) \sin\theta \sin\alpha \sin(\omega t + \varphi_0)}{\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,锥顶散射点 A 的微多普勒满足正弦变化,锥底散射点 C 的微多普勒由于进动,变化规律不再是简单的正弦形式。本文从 2 个方面对非正弦变化的散射点进行处理:①对非正弦分量进行泰勒级数展开,忽略很小的高阶分量,实现非正弦理想化;②非正弦分量表现在式(2)中的 $\sin\beta(t)$,可以考虑在特定的时刻求出 $\sin\beta(t)$ 的大小,利用散射点的瞬时频率进行参数求取。

2 散射点匹配

2.1 散射点分析

根据文献[11]对式(2)中的非正弦变化的分量 $r\sin\beta(t)$ 进行泰勒展开,可得式(2)近似为:

$$\begin{cases} R_A = l_A + m_A \cos(\omega t + \varphi_0) \\ R_C \approx l_C + m_C \cos(\omega t + \varphi_0) + n_C \cos(2\omega t + 2\varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_A, b_A, a_C, b_C, c 均为调制系数,且只与锥体目标的尺寸、进动参数有关。

结合式(4)可得锥体散射点的微多普勒表达式:

$$\begin{cases} f_A = \frac{2\omega m_A \sin(\omega t + \varphi_0)}{\lambda} \\ f_C \approx \frac{2\omega(m_C \sin(\omega t + \varphi_0) + n_C \sin(2\omega t + 2\varphi_0))}{\lambda} \end{cases} \quad (7)$$

其中调制系数 m_A 、 m_C 、 n_C 的表达式为:

$$\begin{cases} m_A = h_1 \sin\theta \sin\alpha \\ m_C = -h_2 \sin\theta \sin\alpha - r \frac{\sin\theta \sin\alpha \cos\theta \cos\alpha \sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha}}{1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha} \\ n_C = \frac{r \sin^2\theta \sin^2\alpha (3 - \cos\theta \sin\alpha) \sqrt{1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha}}{16 (1 - \cos^2\theta \cos^2\alpha) (1 - \cos\theta \cos\alpha)} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 频谱分析

为了充分利用组网雷达信息,需要对不同雷达视角下相同散射点进行匹配关联。文献[9]通过计算频谱熵的方法对散射点进行了判别,认为频谱熵大的频率分量对应的散射点为锥底散射点。然而锥底散射点的高阶频谱分量较小,在雷达的某些视角下,锥顶散射点的频谱熵并不一定比锥底的频谱熵小,方法存在着一定的缺陷。

本文采用频谱分析的方法来判别散射点的类型,实现不同雷达相同散射点的匹配。由式(3)可知回波中 2ω 的分量较小,对应的频率分量较小,为了提高获取频率分量幅值的精确度,采用 Cabor 变换来获取散射点时频曲线,再通过改进的 Viterbi 算法^[12]来对提取出的散射点曲线进行频谱分析。其中含有 2ω 的分量的微多普勒曲线即为锥底散射点对应的曲线。

3 微动参数求解

由式(5)可知,锥底与锥顶微多普勒频率分量均含有相同形式的正弦分量,假设锥底的正弦分量被锥顶完全补偿,定义为 f_C^* 。补偿系数理论值为 $\eta = h_2/h_1$,则当 $\sin(\omega t + \varphi_0) = 1$,锥底微多普频率为:

$$f_C^* = -\frac{2\omega}{\lambda} \frac{r \sin\theta \sin\alpha \cos\theta \cos\alpha}{\sqrt{1 - (\cos\theta \cos\alpha)^2}} \quad (9)$$

当有 2 部雷达从不同的视角观测时,可得:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{f_C^*(\alpha_1)}{f_C^*(\alpha_2)} = \frac{\cos\alpha_1 \sin\alpha_1 \sqrt{1 - (\cos\alpha_2 \cos\theta)^2}}{\cos\alpha_2 \sin\alpha_2 \sqrt{1 - (\cos\alpha_1 \cos\theta)^2}} \\ T_2 = \frac{f_A(\alpha_1)}{f_A(\alpha_2)} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,2 个方程中含有 α_1 、 α_2 、 θ 3 个未知参数。考虑到 2 部雷达 2ω 分量的调制系数的比值也仅与上述 3 个参数有关,可得到新的方程式:

$$T_3 = \frac{n_C(\alpha_1)}{n_C(\alpha_2)} \quad (11)$$

联立式(10~11)可解出进动角和 2 部雷达视角。

关于锥旋角速度 ω ,由式(8)可知回波中 2ω 分量较小,回波中主要是含有 ω 的正弦分量,因此可通过对雷达回波进行自相关处理来估计锥旋角速度 ω 。结构参数 h_1 、 h_2 、 r 可通过散射点瞬时频率取极值的时候,即 $\sin(\omega t + \varphi_0) = \pm 1$ 时,由式(5)求解得到。

现对补偿系数 η 基于雷达视角最小方差的准则进行搜索估计。令补偿的残余分量为 \tilde{f}_C ,则满足:

$$\tilde{f}_C = f_C^* - \eta f_A \quad (12)$$

设组网雷达中有 3 部雷达,按照上述 2 部雷达即可求解出雷达视角的方法进行组合,共有 3 种组合方式,其中每部雷达均有 2 个不同的视角估计值,定义雷达视角方差 $\sigma_\eta = \text{mean}(\text{var}(\alpha_{ij}))$, $i=1,2,3$, $j=1,2$ 。当 $\hat{\eta} = \eta$ 时,锥底的正弦分量被完全补偿,不同组合求出同一雷达的视角是相同的或者是接近的,此时 σ_η 很小。由此可对补偿系数 $\hat{\eta}$ 在某一范围内进行搜索,求出 σ_η 最小时 $\hat{\eta}$ 的值。由文献[13]可知,锥体弹头底部密度较大,其质心接近底面,所以补偿系数的搜索范围为 $[0, 0.333]$ 。

综上所述,基于窄带雷达网的空间目标进动特征提取的具体步骤如下:

步骤 1 建立微动模型,通过几何分析求出了散射点到雷达的径向距离表达式并由窄带雷达信号体制求出了散射点的微多普勒表达式。

步骤 2 对锥底散射点中非正弦分量进行泰勒展开实现散射点理想化,并对散射点进行频谱分析实现散射点的区分。

步骤 3 根据 2 部雷达锥顶与锥底同一时刻微多普勒的比值和锥底 2ω 分量调制系数的比值可得到 3 个方程,联立即可求解出雷达视角和进动角。

步骤 4 运用自相关法求出锥旋角速度 ω ,并根据基于雷达视角方差最小的准则求解补偿系数。

4 仿真实验

假设目标为旋转对称锥体,目标参数设置为: $h_1 = 2.5 \text{ m}$, $h_2 = 0.8 \text{ m}$, $r = 0.5 \text{ m}$, $\theta = 10^\circ$,锥旋角速度 $4\pi \text{ rad/s}$, $\varphi = \pi/4$ 。假设组网中有 3 部雷达,雷达参数设置均为:载频 $f = 8 \text{ GHz}$,信号带宽为 5 MHz ,雷达脉冲重复频率为 1000 Hz ,观测时间 2 s ,信噪比为 10 dB 。雷达 1 视线与旋转轴的夹角 $\alpha_1 = 40^\circ$,雷达 2 视线与旋转轴的夹角 $\alpha_2 = 60^\circ$,雷达 3 视线与旋转轴的夹角 $\alpha_3 = 80^\circ$ 。

图 2 为雷达 2 获得的目标回波时频分布,可以看出散射点微多普勒曲线具有很好的周期性,可通过自相关处理得到微动周期为 0.5 s ,见图 3。

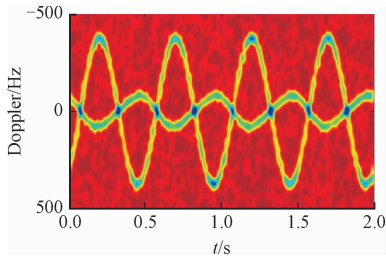


图2 雷达2时频分析结果

Fig. 2 The result of radar's frequency analysis

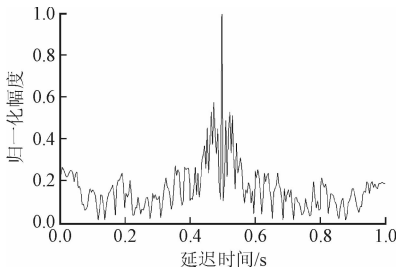


图3 微动周期估计

Fig. 3 Estimation of micro-motion period

图4为采用改进的Viterbi算法对图2时频曲线抽取的结果,可以看出经过Viterbi算法提取的时频曲线具有更好的时频聚集性,有效抑制了各分量的交叉项。为了有效地区分锥顶散射点与锥底散射点的时频曲线,可以对抽取的曲线进行频谱分析。

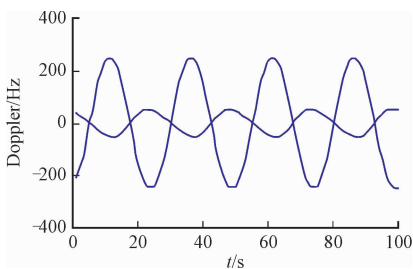


图4 Viterbi算法抽取的曲线

Fig. 4 The curve of Viterbi algorithm decimation

图5为锥底散射点频谱分析的结果,在频率为2和4时,谱图具有峰值,因为锥底散射点时频曲线具有频率二次调制项,而锥顶散射点不具有。

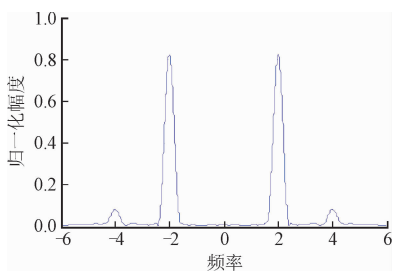


图5 锥底散射点频谱分析结果

Fig. 5 The bottom of cone scattering point frequency spectrum analysis's result

根据第3节补偿系数的定义,可以得到补偿系数 η 随归一化方差变化的结果,见图6。

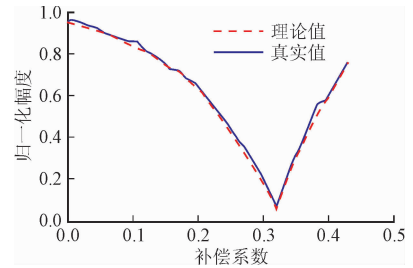


图6 补偿系数求解结果

Fig. 6 Solving results of compensation coefficient

在补偿系数 $\eta=0.322$ 时,归一化方差最小,接近理论值0.32,可根据式(9)和式(10)求解出微动参数。参数求取的结果见表1,各参数估计误差均小于5%,满足目标识别精度的要求。而文献[9]中目标参数的估计误差接近15%,高于本文误差,验证了本文方法的准确性。

表1 锥体弹头进动及结构参数估计结果

Tab. 1 The estimation result of cone-shaped warhead's parameters

参数	理论值	估计值	相对误差
$\alpha_1/(\circ)$	40	38.725	3.18%
$\alpha_2/(\circ)$	60	61.658	2.76%
$\alpha_3/(\circ)$	80	80.785	1.31%
$\theta/(\circ)$	10	10.358	3.58%
r/m	0.5	0.523	4.60%
h_1/m	2.5	2.443	2.28%
h_2/m	0.8	0.8314	3.92%

5 结语

本文对窄带雷达网如何进行弹道目标微动特征提取进行了研究。在散射点匹配和补偿系数求解的基础上,联立不同视角微动信息方程组,求解得到了微动参数。仿真结果表明,本文方法提取的目标特征参数估计精度高,可以较好地为目标识别提供特征信息。考虑到雷达网获取弹道目标散射点的数量可能不一致,下一步将对雷达网各雷达获取不同散射点数量的情况进行研究。

参考文献(References):

- [1] 赵艳丽. 弹道导弹雷达跟踪与识别研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
ZHAO Y L. Study on Ballistic Missile Radar Tracking and Recognition [D]. Changsha: The National U-

- niversity of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 周万幸. 弹道导弹雷达目标识别技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 12-48.
ZHOU W X. Ballistic Missile Radar Target Recognition Technique [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 12-48. (in Chinese).
- [3] 王鸿章, 刘新德. 世界弹道导弹 [M]. 沈阳: 辽宁人民出版社, 2014: 48-246.
WANG H Z, LIU X D. Ballistic missile in the world [M]. Shenyang: Liaoning People Press, 2014: 48-246. (in Chinese).
- [4] Cohort 311-1210/Team LCS, Missile Defense in the 21st Century Acquisition Environment: Exploring a BMD-Capable LCS Mission Package [A]. Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 2013: 1-8.
- [5] CHEN V C. Analysis of Radar Micro-Doppler Signature with Time-Frequency Transform [C]// Pocono Manor: Proceedings of IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, 2000: 463-466.
- [6] YE C M, XU J, PENG Y N, et al. Key Parameter Estimation for Radar Rotating Object Imaging with Multi-aspect Observations [J]. Science China: Information Sciences, 2010, 53(8): 1641-1652.
- [7] 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 X H, AI X F, LI Y Z, 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. (in Chinese).
- [8] 许丹, 田波, 冯存前, 等. 基于多站雷达自适应融合的光滑对称锥体三维重构与参数估计 [J]. 信号处理, 2017, 33(4): 627-634.
XU D, TIAN B, FENG C Q, et al. Three-dimensional Reconstruction and Parameter Estimation of Smooth Symmetric Cone Based on Multistatic Radar Adaptive Fusion [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(4): 627-634. (in Chinese).
- [9] 韩勋, 杜兰, 刘宏伟. 基于窄带雷达组网的空间锥体目标特征提取方法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2956-2962.
HAN X, DU L, LIU H W. Feature Extraction of Space Cone-shaped Target Based on Narrow-band Radar Networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(12): 2956-2962. (in Chinese).
- [10] 宁超, 黄璟, 黄培康. 基于HRRP的进动锥体目标特征参数求解方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 650-655.
NING C, HUANG J, HUANG P K. Solution for Characteristic Parameters of Precession Cone-shaped Target Using HRRP [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 650-655. (in Chinese).
- [11] 雷腾, 刘进忙, 杨有春, 等. 基于三站一维距离像融合的弹道目标特征提取方法研究 [J]. 宇航学报, 2012, 33(2): 228-234.
LEI T, LIU J M, YANG Y C, et al. Study on Feature Extraction Method of Ballistic Target Based on Three-station Range Profiles [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(2): 228-234. (in Chinese)
- [12] FANG H Q, CHEN L, RAGHAVENDIRAN S. Influence of Time and Length Size Feature Selection for Human Activity Sequences Recognition [J]. ISA Transactions, 2014, 53(1): 134-140.
- [13] 马梁. 弹道中段目标微动特性及综合识别方法 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
MA L. The Micro-motion Characteristic and Combining Classification of Ballistic Target [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese).

(编辑: 徐敏)