

## 基于多视角距离像的弹道目标三维微动特征提取

李靖卿, 冯存前, 童宁宁, 郭良

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 针对现有估计方法提取散射点类型单一以及工程实现较为困难的问题, 提出了一种基于组网雷达的多视角距离像提取三维进动特征方法。利用雷达网中各雷达多视角观测弹道目标, 提取目标的距离像序列信号, 求得最强 2 散射点在雷达视线上的投影长度, 提取目标投影长度随时间变化的关系, 利用最小二乘估计对关系式中的参数进行估计。运用组网雷达的多视角特性, 根据不同视线方向上不同进动角频率的投影分量, 提取目标三维微动特征。计算机仿真验证了提取方法的可行性与有用性, 估计效果达到预期目的。

**关键词** 组网雷达; 进动参数; 最小二乘估计; 三维特征提取

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.008

**中图分类号** TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0034-04

## Three-Dimensional Micro-motion Feature Extraction of Ballistic Target Based on the Multi-view Range Profile

LI Jing-qing, FENG Cun-qian, TONG Ning-ning, GUO Liang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To solve the problem of single scattering point type of feature extraction of existing estimation method, and the difficulties of engineering implementation, a kind of method for extracting three-dimensional precession features based on netted radars is proposed. Firstly, the length of the radar line of sight direction between two strongest scattering points is obtained by using the netted radar to observe range profile sequences of ballistic target, and the relation that projected lengths with time is extracted. Then, the parameters in the equation is estimated by the Least squares estimated method (LSCE). After that, profited from the multi-view of netted radar, Three-Dimensional Precession Features is extracted on the basis of projected components of different precession angular frequency. Computer simulation proves the effectiveness and stability of the extraction method, and the results reach up to the expected effects.

**Key words:** netted radar; precession parameters; least squares estimated method (LSCE); three-dimensional precession feature

为满足反导的作战需求, 弹道目标中段预警显 得更为迫切, 组网雷达的出现为弹道目标中段特征

**收稿日期:** 2013-12-30

**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:** 李靖卿(1989-), 男, 湖北天门人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理研究. E-mail: lijingqing\_1025@126.com.

**引用格式:** 李靖卿, 冯存前, 童宁宁, 等. 基于多视角距离像的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(5): 34-37. LI Jingqing, FENG Cunqian, TONG Ningning, et al. Three-dimensional micro-motion feature extraction of ballistic target based on the multi-view range profile [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 34-37.

提取和目标识别提供了更多可测参数,有效地克服了单部雷达视角的局限性以及提取信息精度较低的缺点。弹道目标的微动特性是目标识别的重要依据。通过实验可知,微多普勒效应与目标的方位角有关<sup>[1]</sup>。当姿态角发生变化时,所获得的微多普勒频率的频移发生极大变化。文献[2]等利用组网雷达提取回波信号微多普勒曲线的变化频率与幅度,提取有旋转目标三维微动特征;文献[3]利用多载频 MIMO 雷达空间分集特性在 Hough 变换下提取旋转目标微动特性,提取目标三维微动参数;文献[4]通过遗传算法求解近似最优解,再以最小二乘法估计锥形弹头的进动参数;文献[5]运用组网雷达的多视角特性提取目标的进动角、锥面长度等数据。但文献[2]仅提取锥旋目标锥顶的微动特征,提取散射点类型单一;文献[4~5]虽然考虑了多视角问题,但依然不涉及提取弹道目标的三维微动特征,且工程实现较为复杂。

本文主要通过构建组网雷达系统模型,提取目标三维微动特征。

### 1 三维模型构建

构建三维组网雷达系统见图 1。

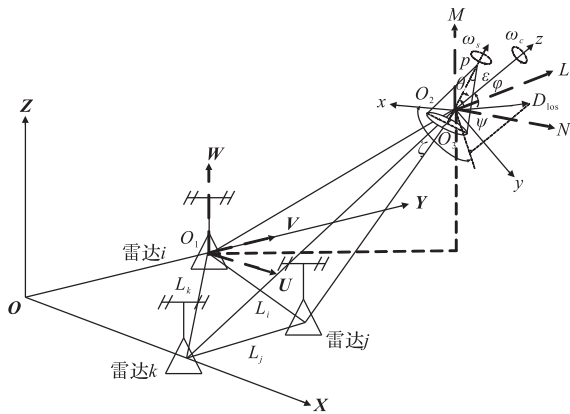


图 1 三维组网雷达系统构成

Fig.1 Three-dimensional netted radar system

OXYZ 为全局坐标系,UVW 为雷达坐标系,NLM 为目标参考坐标系, $x_2y_2z_2$  为目标进动坐标系,且与 UVW 平行。 $L_1, L_2, \dots$  分别为雷达 1 与雷达 2、雷达 2 与雷达 3... 之间的间距。假定弹头是锥体,且旋转对称。目标进动坐标系为  $x_2y_2z_2$ ,  $O_2$  为弹头对称轴与进动轴  $z_2$  的交点。定义初始时刻弹头对称轴与进动轴构成平面  $yO_2z_2$ ,  $x_2$  轴方向符合右手螺旋法则。锥体半锥角为  $\epsilon$ , 雷达视线与锥体对称轴的夹角为  $\delta$ , 与进动方向的夹角为  $\varphi$ , 在目标进动坐标系  $x_2y_2z_2$  上的方位角为  $\zeta$ , 且进动角为  $\theta$ 。其中,  $\delta = \varphi + \epsilon$ 。且雷达视线方向和锥体对称轴(自旋轴)

构成平面与底面相交点为  $m, n$ 。

### 2 进动参数估计

由文献[6]可知,锥体在雷达视线上的投影可等效为滑动型散射中心最强 2 个散射点  $P, m$  在雷达视线上的长度,有:

$$l(t) = L \cos\theta \cos\delta + L \sin\theta \sin\delta \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1)$$

根据组网雷达融合特性,可预先通过文献[7~8]的方法获取锥体锥旋速度  $\omega_c$ 。令  $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})$  则:

$$\begin{cases} \rho_1 = L \cos\theta \cos\delta \\ \rho_2 = L \sin\theta \sin\delta \cos\varphi \\ \rho_3 = L \sin\theta \sin\delta \sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\rho} = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3]^T$ ;  $\boldsymbol{\theta} = [\theta \ \delta \ \varphi]^T$ 。

在雷达组网中任取 1 个子雷达,假定离散等间隔采样后的信号模型矩阵形式为:

$$\mathbf{l}(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{H}\boldsymbol{\rho} \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\omega_c \Delta t) & \sin(\omega_c \Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos\omega_c (N-1)\Delta t & \sin\omega_c (N-1)\Delta t \end{bmatrix} \quad (4)$$

由上可知式(3)中  $\mathbf{l}(\boldsymbol{\rho})$  与  $\boldsymbol{\rho}$  呈线性关系,由最小二乘估计法可得  $\boldsymbol{\rho}$  的估计量  $\hat{\boldsymbol{\rho}}_{ls}$  为:

$$\hat{\boldsymbol{\rho}}_{ls} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{x} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为雷达  $N$  次采样的值,即为雷达获取的滑动型散射中心最强 2 个散射点  $P, m$  在雷达视线上的长度,且  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$ 。式(2)整理得:

$$\begin{cases} \hat{\varphi}_{ls} = \arctan(\hat{\rho}_{3ls} / \hat{\rho}_{2ls}) \\ \hat{\rho}_{1ls} / L \cos\theta = \cos\delta \\ \hat{\rho}_{2ls} / (L \sin\theta \cos\varphi_{ls}) = \sin\delta \end{cases} \quad (6)$$

当组网雷达中  $M$  部子雷达同时观测目标时,由式(6)可构建信号模型,最终可得  $\mathbf{W}$  的估计值为:

$$\hat{\mathbf{W}}_{ls} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{Q} \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{Q} = [(\hat{\rho}_{21ls})^2 \ \dots \ (\hat{\rho}_{2Mls})^2]^T$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & -[(\hat{\rho}_{11ls} \cos\varphi_{ls})^2 - (\hat{\rho}_{21ls})^2] \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -[(\hat{\rho}_{1Mls} \cos\varphi_{ls})^2 - (\hat{\rho}_{2Mls})^2] \end{bmatrix}$$

进一步可得:

$$\begin{cases} L_{ls} = \sqrt{u_{ls} / [(1 - v_{ls})v_{ls} (\cos\varphi_{ls})^2]} \\ \theta_{ls} = \arcsin \sqrt{v_{ls}} \\ \delta_{ls} = \arccos(\hat{\rho}_{1ls} / L_{ls} \cos\theta_{ls}) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\hat{\rho}_{1ls}$  为第  $i$  部子雷达估计的参数。

### 3 提取三维微动特性

组网雷达中不同子雷达观测目标的视线不同,若已知第*i*部子雷达视线方向的单位向量 $\mathbf{D}_{ilos}$ ,及该子雷达视线方向与进动轴的夹角 $\varphi_i$ ,则可依据向量夹角公式确定进动方向,进而求得锥体锥旋速度在不同分量上的投影。由式(8)可得 $\hat{\varphi}_i = \delta_{ils} - \epsilon$ 。

现设全局坐标系OXYZ中进动轴的单位方向矢量为 $\mathbf{n} = (x, y, z)$ ,  $\mathbf{D}_{ilos} = (\cos\alpha_i \cos\beta_i, \sin\alpha_i \cos\beta_i, \sin\beta_i)$ , 则 $|\mathbf{n}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 1$ ,  $|\mathbf{D}_{ilos}| = 1$ 。由向量的夹角公式 $\cos\varphi_i = \langle \mathbf{n}, \mathbf{D}_{ilos} \rangle / (|\mathbf{n}| |\mathbf{D}_{ilos}|)$ 及组网雷达的多视角特性可得方程组为:

$$\begin{cases} \cos\alpha_i \cos\beta_i x + \sin\alpha_i \cos\beta_i y + \sin\beta_i z = \cos\varphi_i \\ \cos\alpha_j \cos\beta_j x + \sin\alpha_j \cos\beta_j y + \sin\beta_j z = \cos\varphi_j \\ \cos\alpha_k \cos\beta_k x + \sin\alpha_k \cos\beta_k y + \sin\beta_k z = \cos\varphi_k \end{cases} \quad (9)$$

若式(9)只由2组雷达数据联立求解,会得到2组满足条件的解。因而需用3组雷达数据联合求解方程组,并将结果代入方程 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 验证。

若已知组网雷达中第*i*部子雷达的视角,它距目标和第*j*部子雷达的距离或各子雷达在全局坐标系OXYZ中的三角坐标(地球坐标系中的经纬度)。将第*i*部子雷达看作校准雷达,根据组网雷达数据高度融合的特性,将所求其他视线子雷达的数据与基准雷达数据进行求和平均,以提高数据精度。正角度默认为反时针方向。算法流程图见图2。

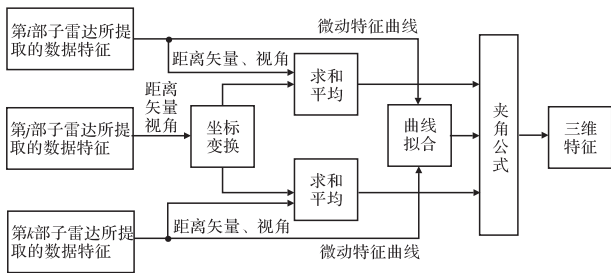


图2 算法流程图

Fig.2 Algorithms flow chart

### 4 仿真分析

现假设锥面长度为3.5 m,  $\epsilon = 0.2618$  rad,  $\delta = 0.6597$  rad,  $\theta = 0.2$  rad, 初相为1.255 rad, 锥体进动角速度为 $4\pi$ rad/s。LOS分别为 $(\pi/3, \pi/6)$ 、 $(\pi/4, \pi/4)$ 、 $(\pi/6, \pi/3)$ , 单位为rad。线性调频信号的载频为10 GHz, 脉冲重复频率为2 kHz, 带宽为4

GHz, 信噪比SNR=0 dB, 雷达精度值为*F*。3部雷达视线在目标进动坐标系的视角分别为 $(30^\circ, 15^\circ)$ 、 $(60^\circ, 15^\circ)$ 、 $(70^\circ, 10^\circ)$ 。

图3为散射点*P*、*m*、*n*的微动时间距离像(线性调频信号下), 可以看出散射点*n*的变化并不明显。由于散射点*n*仅在较小的视角范围可见, 因此此文仅考虑提取散射点*P*、*m*。根据文献[9~10]的方法, 该子雷达在对微动时间距离像采样过程中, 采用广义Hough变换(GHT)提取目标投影长度在一系列采样时刻的值。且第1次采样在*t*=0时刻进行, 后续的*i*-1次采样按相等的时间间隔 $\Delta t$ 进行, 这里, $i=1, 2, \dots, N$ 。估计结果见表1。

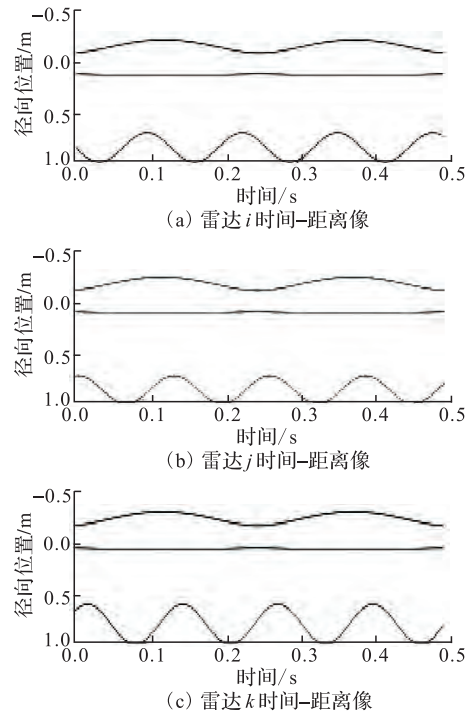


图3 同一时间段3部雷达所测最强散射点的距离像  
Fig.3 The time-profile of the strongest scattering points of three radars in the same time

表1 不同精度雷达参数估计结果

Tab.1 Different precision of radar parameters estimation results( $N=1000, \Delta t=0.01$  s)

<i>F</i> /cm	$\varphi$ /rad	<i>L</i> /m	$\theta$ /rad	$\delta$ /rad
1	1.256 3	3.502 8	0.199 8	0.660 8
10	1.256 6	3.504 8	0.199 9	0.661 7
20	1.257 2	3.506 8	0.201 0	0.664 4
40	1.261 7	3.387 3	0.204 6	0.640 6

由表1可知, 随着雷达精度的提高, 目标参数估计的结果会更加接近真实值, 即误差更小。且雷达精度不高时也能得到较准确的估计值。取3部雷达, 利用Monte Carlo仿真可以得出, 本方法估计的锥面长度和进动角的均方误差(RMSE)均略高于文献[4]的方法, 但明显优于文献[6]的估计方法。本

方法估计所得到的 RMSE 与文献[4]的 RMSE 之比约为 1.35,与文献[6]的 RMSE 之比约为 0.67。这是因为本文采用最小均方估计来估计目标的进动参数,与文献[4]相比,其误差较大;但本文综合运用  $M$  部雷达参数,有效克服了文献[6]中单部雷达测角精度不足的缺点。以 3 部雷达为例,以下将 3 组视角数据直接叠加融合所得估计值、改进后估计值与真实值进行比较后参数见表 2。

表 2 三维进动参数提取(雷达精度取 1 cm)

Tab.2 Three-dimensional precession feature extraction

类别	$(\alpha_i, \beta_i)$	$(\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz})$
直数值	$(\pi/3, \pi/6)$	(0.701 1, 13.966 0, 8.296 6)
改进值	$(\pi/4, \pi/4)$	(0.801 4, 13.936 9, 8.193 1)
真实值	$(\pi/6, \pi/3)$	(0.867 7, 13.910 9, 8.170 6)

令 3 部子雷达在全局坐标系中的坐标分别为 (10, 0, 0)、(40, 40, 0)、(50, 30, 0),单位为 km,取第 2 部子雷达为基准雷达(高精度雷达),它与目标的径向距离为 20 km。由表 2 可以得出,将 3 组视角数据直接叠加融合所得估计值与真实值之间的误差较大;而改进算法后,利用视角变换公式所求值与所求得视线方向上的雷达数据进行求和平均,可以很大程度地缩小误差,提高测量精度。运用 Monte Carlo 仿真,可得所估计参数的 RMSE 明显低于改进前算法所得 RMSE,且二者之比接近于 0.766 8。如果改进后的估计值与 3 组视角数据直接叠加融合所得估计值有较大偏差,可以判断部分雷达出现故障。因此,本文方法测量精度较高,纠错性强。

## 5 结语

本文主要通过多视角提取弹道目标不同视线上的最强散射点,利用目标在弹道切线方向的投影长度随时间的变化关系对进动参数进行估计,然后运用组网雷达的多视角特性,通过不同视线方向上不同进动角频率的投影分量,提取目标三维微动特征。仿真结果得出,该方法能有效提高测量精度,且可以避免个别雷达故障突变引起的数据紊乱,很大程度上提高了组网系统的稳定性。本方法利用的都是当前比较成熟的技术,工程实现相对简单,且测量精度较高,系统稳定性高,是一种实效性较强的方法。

### 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] 罗迎,张群,李松,等.基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取[J].电子学报,2012,40(6):1079-1085.  
LUO Ying, ZHANG Qun, LI Song, et al. Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks [J]. Acta electronica Sinica, 2012, 40(6): 1079-1085. (in Chinese)
- [3] 罗迎,张群,朱仁飞,等.多载频 MIMO 雷达中目标旋转部件三维微动特征提取方法[J].电子学报,2011,39(9):1975-1981.  
LUO Ying, ZHANG Qun, ZHU Renfei, et al. Three-dimensional micro-motion feature extraction of target with rotating parts in multi-carrier MIMO radar[J]. Acta electronica Sinica, 2011, 39(9): 1975-1981. (in Chinese)
- [4] 贺思三,赵会宁,冯存前.多视角距离像序列弹道目标的进动参数估计[J].信号处理,2013,29(8):1027-1035.  
HE Sisan, ZHAO Huining, FENG Cunqian. Precession parameter estimation for ballistic targets based on multi-aspect range-profile sequence [J]. Signal processing, 2013, 29(8): 1027-1035. (in Chinese)
- [5] 艾小峰,李永祯,赵峰,等.基于多视角一维距离像序列的进动目标特征提取[J].电子与信息学报,2011,33(12):2846-2851.  
AI Xiaofeng, LI Yongzhen, ZHAO Feng, et al. Feature extraction of precession targets using multi-aspect observed HRRP sequences [J]. Journal of electronic & information technology, 2011, 33(12): 2846-2851. (in Chinese)
- [6] 贺思三,周建雄,付强.利用一维距离像序列估计弹道中段目标进动参数[J].信号处理,2009,25(6):925-929.  
HE Sisan, ZHOU Jianxiong, FU Qiang. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. Signal processing, 2009, 25(6): 925-929. (in Chinese)
- [7] Liu Y X, Li X, Zhuang Z W. Estimation of micro-motion parameters based on micro-Doppler[J]. IET signal processing, 2010, 4(3): 213-217.
- [8] Gao H W, Xie L G, Wen S L, et al. Micro-Doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [9] Zhang Qun, Yao Tatsoon, Tan Hweesiang, 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.
- [10] Wu Xiaofang, Wang Xuesong, Lu Huanzhang. Motion feature extraction for stepped frequency radar based on Hough transform[J]. IEE radar, sonar & navigation, 2010, 4(1): 17-27.

(编辑:田新华)