http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0463

基于自适应融合的弹道目标空间位置重构

许丹, 田波, 冯存前*, 贺思三, 赵双

(空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

摘 要: 由于进动锥体目标参数存在耦合,单部雷达不易获取同时参数估计误差较大。针对这一问题,提出了一种联合多部雷达不同视角微动信息进行参数提取与融合的新方法。首先,对进动目标进行了建模和散射点距离像分析,并利用 Hough 变换实现了锥顶散射点的关联。然后,联立 2 部雷达的微动信息作为求解单元来对耦合参数进行解耦,求出相应的参数。同时以进动角为例进行了误差方差分析,以融合后误差方差最小为原则对权系数进行了求解,并对其余参数进行了相同的处理。最后,在一个进动周期内,根据求出的锥体顶点坐标和锥旋轴矢量实现了锥体目标空间位置的重构。仿真结果表明该融合方法能够提高参数精度并能对锥体空间位置进行重构。

关 键 词: 进动; Hough 变换; 融合; 空间位置重构; 性能分析

中图分类号: TN957

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2017)06-1216-08

近年来,弹道导弹攻防技术得到了很大的发展,传统的利用目标雷达散射截面积(RCS)、结构和形状等信息进行识别的技术已不能满足要求,需要采用不依赖于目标形状和电磁特性的方法进行目标识别[1]。自美国海军实验室的 Chen 教授将微动拓展到雷达领域以来[2],利用微动特征进行目标识别的方法越来越受到国内外学者们的关注[3]。另外,随着战场环境的日趋复杂,单部雷达也暴露出对目标姿态敏感、由于遮挡效应不能获取目标完整的微动信息、部分进动参数无法解耦等缺点。组网雷达能够获得不同视角下目标的微动信息,能够克服单部雷达存在的上述缺点。同时针对传统组网雷达进行目标参数特征提取时,仅仅利用其多视角信息而并没有充分利用所有信息这一不足,本文在利用组网雷达多视角信息进行参数提取的基础上,还对提取的参数进行了融合处理,合理利用了组网雷达信息,提高了参数估计的精度。

窄带雷达因其距离分辨率有限,在刻画目标尺寸、结构等细节上存在不足,所以一般用于空间目标的粗分辨。宽带雷达距离分辨率高,在对目标进行观测时,可将目标等效为一些强的散射点[4],通过对这些孤立散射点的分析来提取目标参数并进行成像。文献[5]利用单部雷达对进动目标参数进行了提取,但由于单一视角的局限性,在对参数进行提取过程中,对锥体目标底面半径进行了近似,同时对部分模糊参数进行了优化,过程较为复杂。文献[6]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。文献[7]利用广义 Hough 变换、参数拟合等方法从多视角距离像中提取出目标参数,但是广义 Hough 变换解算复杂,同时在推导

收稿日期: 2016-06-01; **录用日期**: 2016-10-01; **网络出版时间**: 2016-11-24 09:59
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161124.0959.001.html
基金项目: 国家自然科学基金 (61372166,61501495)
* **通讯作者**: E-mail: fengcunqian@sina.com

引用格式: *许丹, 田波, 冯存前, 等. 基于自适应融合的弹道目标空间位置重构[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1216-1223. XU D, TIAN B, FENG C Q, et al. Space position reconstruction of ballistic target based on adaptive fusion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6): 1216-1223 (in Chinese).*

过程中忽略了底面半径对参数的影响。

为充分利用组网雷达信息,本文在利用宽带多视角信息进行参数求解的基础上,提出了一种根据雷达性能指标进行融合的新算法。首先,通过距离像分析和 Hough 变换实现了锥顶散射点关联和参数提取。然后,以进动角为例,通过文献[8]分析得出的融合权系数与雷达性能之间的关系对进动角进行了融合,同时根据融合后的参数重构了目标的空间位置。最后,在不同信噪比条件下,通过定义一个整体参数误差公式,利用不同融合方法对整体参数误差进行了仿真,结果表明本文融合算法得到的精度较好,验证了算法的适用性。

1　进动锥体目标距离像分析

1.1　锥体进动建模

进动锥体目标模型如图 1 所示,锥体对称轴与锥旋轴的交于 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。由文献[9]可知,雷达观测到的散射点数量与雷达视角相关。当满足 $\beta\in(0,\varepsilon)\cup(\pi/2,\pi-\varepsilon)$ 时,锥体目标上可观测到 A、B、C 3 个强散射点。由于 ε 较小[9],因此本文主要对 $\beta\in(\pi/2,\pi-\varepsilon)$ 进行锥体进动分析。

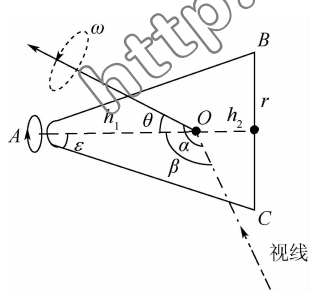


图 1　进动锥体目标模型示意图

Fig. 1　Sketch map of precession cone-target model

由文献[6]可知,雷达视线角 $\beta(t)$ 满足式(1),其中 φ_0 为初相。

$$\cos\beta(t)=\cos\theta\cos\alpha+\sin\theta\sin\alpha\cos(\omega t+\varphi_0) \tag{1}$$

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、B、C 到雷达视线的径向距离变化表达式为

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

分析式(2)可知,散射点 A 满足正弦变化,散射点 B、C 由于进动,径向距离变化存在着非正弦变化的分量 $r\sin\beta(t)$。同时由式(1)可知,进动角 θ 与雷达视角 α 存在耦合,仅依靠单一视角不易获取参数。所以本文考虑利用组网雷达多视角的优点,从满足正弦变化的散射点 A 进行参数提取。

1.2　散射点关联

组网雷达中每部雷达由于观测视角不同,得到的距离像也不同。利用组网雷达多视角信息,首先要确定各雷达站距离像中属于同一散射点的峰值位置,即距离像匹配。由式(2)可知,A、B、C 3 个散射点的径向距离变化之和满足正弦变化,与 A 点有相同的频率 ω 和初相 φ_0。

$$\frac{R_A+R_B+R_C}{R_A}=\frac{h_1-2h_2}{h_1} \tag{3}$$

在一个周期内,利用相同时间间隔对 3 个散射点径向距离和进行采样,通过最小二乘拟合,可估计出频率 ω 和初相 φ_0。此时,可采用二参数 Hough 变换提取距离像中散射点 A 的振幅和中值参数,由此便可利用组网雷达散射点 A 的信息。

2　参数求解

2.1　进动角 θ、结构参数 h_1 和雷达视角 α_i 的求解

由式(1)和式(2)可得,第 i 部雷达观测得到的散射点 A 的振幅 l_{Ai} 和中值 l_{Ci} 表达式为

$$\begin{cases}l_{Ai}=h_1\sin\theta\sin\alpha_i\\ l_{Ci}=h_1\cos\theta\cos\alpha_i\end{cases} \tag{4}$$

为解决进动角 θ 与雷达视角 α_i 之间的耦合,对式(4)进行变形,可得

$$\frac{l_{Ai}^2}{h_1^2\sin^2\theta}+\frac{l_{Ci}^2}{h_1^2\cos^2\theta}=1 \tag{5}$$

式(5)有 2 个未知参数 h_1 和 θ,可通过第 i 部和第 j 部雷达联立 2 个方程组进行求解。

$$\theta=\arctan\sqrt{\frac{l_{Ai}^2-l_{Aj}^2}{l_{Cj}^2-l_{Ci}^2}} \tag{6}$$

$$h_1=\sqrt{\left(\frac{l_{Ci}^2}{\cos^2\theta}+\frac{l_{Ai}^2}{\sin^2\theta}\right)} \tag{7}$$

$$\alpha_i=\arccos\left(\frac{l_{Ci}}{h_1\cos\theta}\right) \tag{8}$$

2.2　结构参数 h_2、r 的求解

联立式(3)和式(7)即可求出结构参数 h_2。当 $\cos(\omega t+\varphi_0)=0$ 时,由式(2)得

$$|R_B-R_C|=2r\sqrt{1-(\cos\theta\cos\alpha)^2} \tag{9}$$

在提取出散射点 A 信息时条件下,利用“clean”算法[10]减去雷达回波中散射点 A 的分

http://bhxb.buaa.edu.cn

量,再运用峰值法提取散射点 B、C 某个时间上的距离值,求出 $|R_B - R_C|$ 的值,此时联立式(6)、式(8)和式(9)可求出 r 的值。

3 进动角自适应融合

3.1 进动角加权系数矩阵求解

在第2节参数求解的公式中,可以看出进动角与雷达视角和结构参数均有关系,一定程度上进动角的估计精度影响着雷达视角和结构参数的估计精度。同时可知利用2部不同视角的雷达即可求出进动角等参数,现以组网雷达中任意2部雷达作为参数求解单元,则 n 个单元求得的矩阵 $\boldsymbol{U} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \cdots, \hat{\theta}_n)^{\mathrm{T}}$,满足:

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{V} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{\theta} = (\theta, \theta, \cdots, \theta)^{\mathrm{T}}$,$\theta$ 为进动角真实值;$\boldsymbol{V} = (v_1, v_2, \cdots, v_n)^{\mathrm{T}}$,$v_k$ 为第 k 个单元求出进动角产生的误差,满足 $(0, \sigma_k^2)$ 的高斯分布且进动角误差之间相互独立($k = 1, 2, \cdots, n$),σ_k^2 为第 k 个单元求出的进动角误差方差。令进动角估计值 $\hat{\theta} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{U}$,$\boldsymbol{A} = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$ 为权系数矩阵,系数满足 $\sum_{i=1}^{n} a_i = 1$。令进动角估计值误差为 $\tilde{\theta}$,满足 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$,以 $\tilde{\theta}$ 方差最小为最佳权系数求取准则,则 $\tilde{\theta}$ 方差满足:

$$D(\tilde{\theta}) = E(\tilde{\theta}^2) - (E(\tilde{\theta}))^2 \tag{11}$$

式中:$E(\tilde{\theta}^2) = E((\boldsymbol{A}\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{V}))$;$E(\tilde{\theta}) = E(\theta - \hat{\theta}) = 0$。运用多元函数求极值法可得到加权系数矩阵为

$$\boldsymbol{A} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\sigma_k^2}} \left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \cdots, \frac{1}{\sigma_n^2} \right) \tag{12}$$

3.2 进动角误差方差分析

由式(12)和式(6)可知,加权系数与进动角误差的方差有关,而进动角与散射点 A 距离像的振幅 l_A 和中值 l_C 有关。

以第 k 求解单元中雷达1与雷达2为例进行分析,提取散射点 A 距离像的中值与振幅。为简化分析,令 $x_1 = l_{A1}$,$x_2 = l_{C1}$,$x_3 = l_{A2}$,$x_4 = l_{C2}$,$\theta_k = f(\boldsymbol{x})$,$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$。现对 θ_k 进行全微分,得

$$\hat{\theta}_k \approx \theta_k + \mathrm{d}\theta_k \qquad \mathrm{d}\theta_k = \sum_{i=1}^{4} \frac{\partial f(\boldsymbol{x})}{\partial x_i} \mathrm{d}x_i \tag{13}$$

根据误差的传递性,θ_k 的估计方差为

$$D(\mathrm{d}\theta_k) = \sum_{i=1}^{4} \left[\left(\frac{\partial f(\boldsymbol{x})}{\partial x_i} \right)^2 D(\mathrm{d}x_i) \right] \tag{14}$$

由式(10)可知 $\hat{\theta}_k = \theta + v_k$,与式(13)对比发现:$v_k(0, \sigma_k^2)$ 与 $\mathrm{d}\theta_k$ 是相对应的,可通过求解 $D(\mathrm{d}\theta_k)$ 来确定 σ_k^2。

在相同观测时间内,同部雷达同一散射点距离像幅值与中值的微分是一致的,仅与雷达分辨力相关,所以 $\mathrm{d}x_i$ 满足 $\mathrm{d}x_1 = \mathrm{d}x_2$、$\mathrm{d}x_3 = \mathrm{d}x_4$。在多数情况下锥体目标散射点之间是稀疏的,散射点 B、C 对散射点 A 的影响可以忽略。在雷达达到其理想分辨力的情况下,由文献[8]可以得到 $D(\mathrm{d}x_i)$ 满足:

$$D(x_k) = D(\mathrm{d}x_i) = \frac{3}{2\pi^2} \cdot \frac{\delta_{\mathrm{r}}^2}{\mathrm{SNR}} \tag{15}$$

式中:SNR 为散射点 A 在距离像上的峰值信噪比;δ_{r} 为距离分辨率,即为 $c/(2B)$。c 为光速,B_{r} 为雷达带宽。综上分析加权系数矩阵满足的表达式为

$$\boldsymbol{A} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\sigma_k^2}} \left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \cdots, \frac{1}{\sigma_n^2} \right) \qquad \sigma_k^2 = \Lambda f(\boldsymbol{x}) \tag{16}$$

$$\begin{cases} \Lambda = \left(\dfrac{\partial}{\partial x_1} + \dfrac{\partial}{\partial x_2} \right) \dfrac{3}{2\pi^2} \cdot \dfrac{\delta_{\mathrm{r1}}^2}{\mathrm{SNR}_1} + \\ \qquad \left(\dfrac{\partial}{\partial x_3} + \dfrac{\partial}{\partial x_4} \right) \dfrac{3}{2\pi^2} \cdot \dfrac{\delta_{\mathrm{r2}}^2}{\mathrm{SNR}_2} \\ f(\boldsymbol{x}) = \arctan \sqrt{\dfrac{x_1^2 - x_3^2}{x_4^2 - x_2^2}} \qquad \boldsymbol{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4) \end{cases} \tag{17}$$

式中:δ_{r1} 和 δ_{r2} 为第1、2部雷达分辨率;SNR_1 和 SNR_2 为第1、2部雷达信噪比。

由此可看出,进动角权系数矩阵与雷达带宽和回波信噪比有关,而这2个因素也正是判断雷达性能指标的依据之一。当雷达带宽确定时,可通过提高回波的信噪比来提高提取数据的精度。而文献[11]仅仅指出加权因子与雷达性能有关,却并没有具体指出与雷达性能的关系。

3.3 融合求解

经过上述推导,进动角 θ 可通过每个求解单元求出的进动角通过加权系数矩阵进行融合来提高估计精度,表达式如下:

$$\hat{\theta} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{U} \tag{18}$$

对于结构参数,可以运用同样的方法进行融合处理,在此不具体阐述。雷达视角 α_i 仅与雷达和目标之间的空间位置有关,无法进行融合,可利

http://bhxb.buaa.edu.cn

用融合后的结构参数 θ 和 h_1 对 α_i 进行求解来提高 α_i 的估计精度。

4　锥体目标三维空间位置重构

4.1　组网雷达模型

图 2 为组网雷达观测锥体目标示意图,假设目标平动已补偿,N 部雷达均可达到时间上和空间上的同步要求。以 O 为原点建立参考坐标系 O-XYZ,其中 OZ 为锥旋轴,初始时刻锥体对称轴与 Z 轴所在平面为 YOZ 面,XYZ 满足右手坐标系,同时建立全局坐标系 O_0-$X_0Y_0Z_0$。参考坐标系与全局坐标系之间的坐标转换可参考文献[12]。设雷达网中有 N 部雷达,R_i 表示第 i 部雷达,$\boldsymbol{n}_i$ 表示 R_i 雷达的视线,其中 $i=1,2,\cdots,N$。设雷达 R_i 在 O_0-$X_0Y_0Z_0$ 全局坐标系中的俯仰角和方位角为(γ_i,χ_i),则雷达视线方向矢量为 $\boldsymbol{n}_i=[\cos\gamma_i\cos\chi_i,\ \cos\gamma_i\sin\chi_i,\ \sin\gamma_i]$。

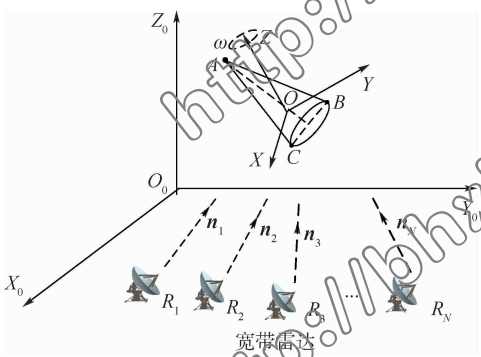


图 2　宽带组网雷达示意图

Fig. 2　Sketch map of wideband netted radar

4.2　三维矢量求解

文献[13]中指出三维微动特征为旋转矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 及旋转轴的单位矢量 $\boldsymbol{e}$。在结构参数已知的条件下,可利用旋转矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 和旋转轴的单位矢量 $\boldsymbol{e}$ 对锥体目标进行空间位置重构。由图 2 可知,$\overrightarrow{OA}$ 的单位矢量、$\boldsymbol{\omega}$ 的单位矢量和 $\boldsymbol{e}$ 构成三角关系,所以可通过矢量 $\overrightarrow{OA}$ 和 $\boldsymbol{e}$ 对锥体空间位置进行重构。

在全局坐标系下,令 $\overrightarrow{OA}=(x_A,y_A,z_A)^{\mathrm{T}}$,$R_{Ai}$ 即为 $\overrightarrow{OA}$ 在第 i 部雷达视线上的投影长度,即为每一时刻散射点 A 的径向距离的值。联立第 k 个求解单元中第 1 部雷达和第 2 部雷达散射点 A 的径向距离值,可得

$$\begin{cases} R_{A1}=\boldsymbol{n}_1\cdot\overrightarrow{OA} \\ R_{A2}=\boldsymbol{n}_2\cdot\overrightarrow{OA} \\ x_A^2+y_A^2+z_A^2=h_1^2 \end{cases} \tag{19}$$

式中:R_{A1} 和 R_{A2} 为同一时刻获得的散射点径向距离值。不同时刻获得的 R_{Ai} 不同,求解得到的锥顶坐标也不同。在一个进动周期内,在等间隔时间对锥顶坐标进行求取,可重构出锥顶在空间中位置。

令旋转轴矢量 $\boldsymbol{e}=(e_x,e_y,e_z)^{\mathrm{T}}$,根据全局坐标系下雷达视线方向矢量 $\boldsymbol{n}_i$、参考坐标系下雷达视角 α_i 和进动角 θ,在一个求解单元中,可联立如下方程组:

$$\begin{cases} \cos\theta=\boldsymbol{e}\cdot\dfrac{\overrightarrow{OA}}{\|\overrightarrow{OA}\|} \\ \cos\alpha_1=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{n}_1 \\ \cos\alpha_2=\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{n}_2 \end{cases} \tag{20}$$

利用式(19)和式(20)解出的旋转矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 和旋转轴的单位矢量 $\boldsymbol{e}$ 即可重构出锥体顶点的空间位置。锥体底面 2 个散射点由于具有滑动性,不同的雷达视角观测得到的位置不同,不易进行重构。在结构参数已知的条件下,通过锥顶的空间位置,即可确定出锥体目标的位置。

综上,基于自适应融合的弹道目标空间位置重构具体步骤如下:

步骤 1　建立锥体进动模型,由几何关系求出散射点径向距离表达式。通过分析 3 个散射点径向距离和与锥顶散射点径向距离的关系实现锥顶散射点匹配关联。

步骤 2　利用 Hough 变换提取出锥顶散射点的中值与幅值,联立 2 部雷达解出进动角、雷达视角和结构参数。

步骤 3　以进动角误差方差最小来求解最佳权系数矩阵,再根据系数矩阵求出融合后进动角的估计值。对于结构参数上述融合算法进行了处理。

步骤 4　建立组网雷达模型,在利用融合的估计值求出锥顶坐标和锥旋轴矢量的基础上,实现了锥体目标空间位置的重构。

5　仿真分析

5.1　仿真结果

雷达参数设置:组网雷达系统中有 3 部雷达,均发射线性调频信号,载频分别为:10、20、20 GHz,信号带宽分别为 2、3、3 GHz,现有的国内公开报道的高分辨雷达的带宽可以达到 3.2 GHz[14],所以本文的参数设置具有合理性。现对 3 部雷达进行编号分别为 1、2、3。3 部雷达雷达观测时间均为 2 s,脉宽均为 50 μs,重复频率为 500 Hz,在全局坐标系下的俯仰角和方位角分别为(π/8,π/4) rad、(π/6,π/8) rad、(π/8,π/4) rad,回波信噪比分别为 10、8、10 dB。目标参数设置:目

http://bhxb.buaa.edu.cn

标为旋转对称锥体，$h = 2.5$ m，$h_1 = 2$ m，$h_2 = 0.5$ m，$r = 0.5$ m，$\theta = 10°$，锥旋角速度为 $\omega = 4\pi$ rad/s，锥旋轴在全局坐标系下的视角为 $(\pi/2, \pi/4)$ rad，$\varphi_0 = -45°$。根据设置的雷达视角和锥旋轴视角参数，由式(20)可解出 3 部雷达在参考坐标下的理论值分别为 $\alpha_1 = 145.34°$、$\alpha_2 = 167.53°$和 $\alpha_3 = 177.04°$，满足锥体目标 3 个散射点可见的条件。

组网雷达中的 3 部雷达，以雷达 1 和雷达 2 为求解单元 1，雷达 1 和雷达 3 为求解单元 2，雷达 2 和雷达 3 为求解单元 3。图 3 为单元 1 中的 2 部雷达得到的时间距离像。图 4(a)为雷达 2 散射点距离和序列。由1.2节分析可知，通过距离和序列可求出锥旋角速度 ω 和初相 φ_0。利用已知的锥旋频率 ω 和初相 φ_0 对雷达 2 散射点进行二参数 Hough 变换，如图 4(b)，可提取出散射点 A 的中值和幅值。运用上述方法均可提取得到3 部雷达散射点 A 的中值和幅值。

表 1 为 3 个求解单元得到的进动角、锥体顶点坐标($t = 0.25$ s)和锥旋轴矢量。在一个锥旋周期内($t = 0 \sim 0.5$ s)，以 0.025 s 为一个时间步长，确定出相应时刻 R_3 的值，通过式(19)可求出对应的锥顶坐标。求锥顶坐标时利用到了散射点 A 的距离值，可按照进动角的融合法则进行融合。对旋转轴矢量的融合是将 3 个单元求出的结果取平均。表 2 为提取出的相关参数。

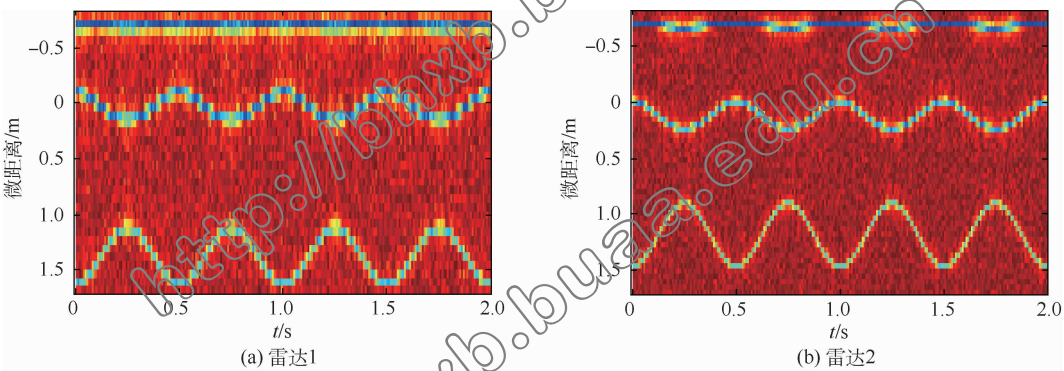


图 3 求解单元 1 中 2 部雷达测得的时间-距离像

Fig. 3 Time-range profiles measured by two radars of solving unit 1

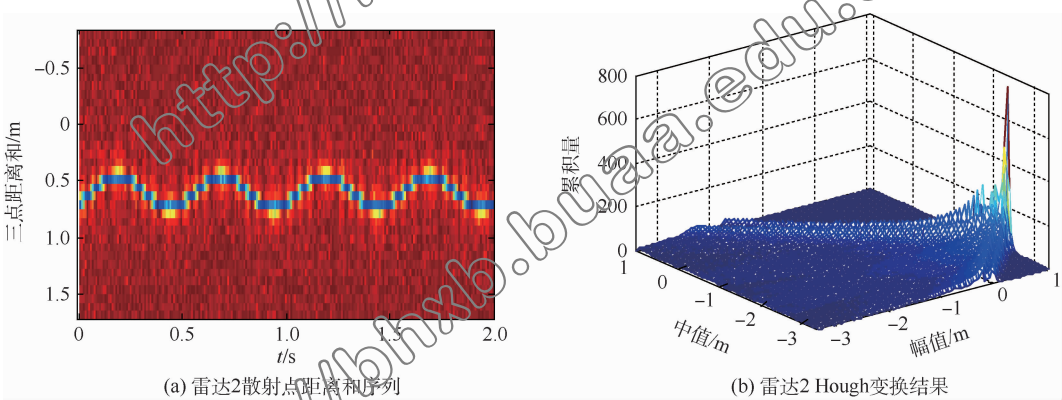


图 4 提取雷达 2 散射点 A 中值和幅值过程

Fig. 4 Extraction process of scattering point A's mean value and amplitude value from radar 2

表 1 求解单元估计结果

Table 1 Estimation results of solving unit

参数	理论值	单元 1		单元 2		单元 3		3 个单元参数融合	
		估计值	误差/%	估计值	误差/%	估计值	误差/%	参数融合	误差/%
θ	10°	10.332°	3.32	10.317°	3.17	9.774°	2.26	10.184°	1.84
x_A	-0.275	-0.282	2.54	-0.268	2.54	-0.271	1.45	0.272	1.10
y_A	1.286	1.318	2.49	1.307	1.63	1.305	1.48	1.310	1.87
z_A	1.262	1.292	2.38	1.288	2.06	1.284	1.74	1.286	1.90
e_x	0	0.0001	0.01	0.0001	0.01	0.0001	0.01	0.0001	0.01
e_y	0.707	0.724	2.40	0.720	2.16	0.721	1.98	0.722	2.18
e_z	0.707	0.723	2.26	0.720	1.84	0.719	1.70	0.721	1.98

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 2　参数估计结果

Table 2　Estimation results of parameters

参数	理论值	雷达 1		雷达 2		雷达 3		3 部雷达参数融合	
		估计值	误差/%	估计值	误差/%	估计值	误差/%	参数融合	误差/%
h_1	2 m	2.053 m	2.65	1.968 m	1.60	1.972 m	1.40	1.977 m	1.25
h_2	0.5 m	0.514 m	2.80	0.512 m	2.40	0.507 m	1.40	0.511 m	1.80
r	0.5 m	0.492 m	1.60	0.507 m	1.40	0.507 m	1.40	0.506 m	1.20
α_1	145°	146.58°	1.09						
α_2	167°			165.74°	0.75				
α_2	177°					176.15°	0.48		

由表 1 和表 2 的数据可看出,融合后的参数整体上比未融合的数据误差小。利用融合后的参数和在一个锥旋周期求出的锥顶坐标($t=0.025$ s 为步长)对锥顶散射点进行了空间位置重构,如图 5 所示。由图可看出重构后的轨迹与理论值几乎重合,从而验证了重构方法的准确性和数据融合算法的精确性。

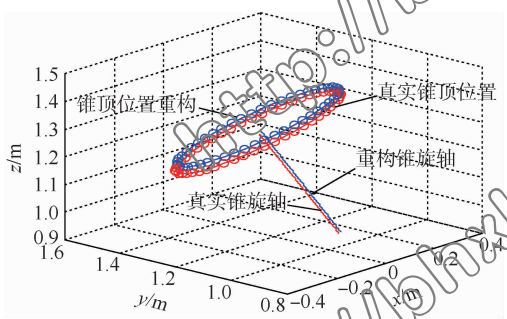


图 5　锥体顶点的三维重构

Fig. 5　Three-dimensional reconstruction of conic node

5.2　算法性能分析

为了有效地分析参数的整体估计性能,定义一个整体参数误差来分析不同数量单元融合后整体数据的误差大小。由于参数的类型不同对目标姿态和微动特性影响程度也不同,现对所有估计出的参数按照影响大小设定不同的权值。定义参数误差矩阵 $\boldsymbol{P}=(\tilde{\theta},\tilde{M},\tilde{E},\tilde{h}_1,\tilde{h}_2,\tilde{r})$,$M=(x_A+y_A+z_A)/3$,$E=(e_x+e_y+e_z)/3$,权值矩阵为 $\boldsymbol{Q}=(0.3,0.2,0.2,0.1,0.1,0.1)$,则平均误差可表示为

$$\eta=\boldsymbol{P}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

以 5.1 节中雷达参数的设置进行分析,设组网中有 3 部雷达,按照每 2 部雷达作为一个求解单元,一共有 3 种求解单元。图 6 为不同求解单元数在不同信噪比条件下得到的平均误差示意图。横坐标表示的是在原来雷达回波信噪比的基础上进行提高信噪比和降低信噪比。为了验证本文算法的适用性,减少由于雷达参数不同而引入的系统误差。其中 1 个单元的结果是由单元 1、2、3 的结果平均得到的。2 个单元的结果是单元 1 与单元 2 融合得到的。3 个单元的结果是单元 1、2、3 平均得到的。

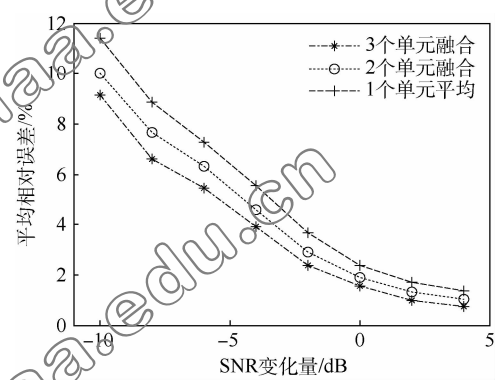


图 6　求解单元误差性能分析

Fig. 6　Error performance analysis of solving unit

6　结　论

本文通过对进动目标距离像进行分析实现了参数求解,并以各个单元(雷达)所求参数误差方差最小为准则对参数进行了融合求解。通过理论分析和仿真实验,表明:

1)进动角和结构参数误差的大小与雷达性能是相关的。可通过组网雷达的不同性能进行融合处理,降低参数误差。

2)锥顶坐标和锥旋矢量可以实现锥体目标空间位置的重构,利用融合的参数重构出的目标位置与理论位置接近。

3)所有单元求出参数进行融合估计与直接将所有参数进行平均估计相比,参数整体误差要小。

4)进动目标空间位置重构可以为目标识别和目标二维成像提供一定参考。

5)本文方法不仅可以运用在微动层面,在利用组网进行参数优化求解上均有一定的参考意义。

由于本文未考虑遮挡效应,后期将对不同雷达获取的不同散射点数量进行分析和参数提取。

http://bhxb.buaa.edu.cn

参考文献（References）

[1] 陆伟宁. 弹道导弹攻防对抗技术[M]. 北京：中国宇航出版社，2007：221-222.
LU W N. Ballistic missile attack-defense countermeasure technology[M]. Beijing: Astronautics Press of China, 2007: 221-222(in Chinese).

[2] CHEN V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform[C]// Proceedings of IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000: 463-466.

[3] HAN Y, SUN H Y, GUO H C. Analysis of influential factors on a space target's laser radar cross-section[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56(1): 151-157.

[4] 黄培康，殷红成，许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京：电子工业出版社，2005：86-99.
HUANG P K, YIN H C, XU X J. Radar target characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 86-99(in Chinese).

[5] 贺思三，周剑雄，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 S S, ZHOU J X, FU Q. Using HRRP sequence to estimate the precession parameters of midcourse target[J]. Journal of Signal Processing, 2009, 25(6): 925-929(in Chinese).

[6] 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).

[7] 艾小锋，李永桢，赵锋，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 X F, LI Y Z, ZHAO F, et al. Feature extraction of precession targets using multi-aspect observed HRRP sequences[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2846-2851(in Chinese).

[8] 周剑雄，石志光，付强. 雷达目标散射中心参数估计的极限性能分析[J]. 电子学报，2006，34(4)：726-730.
ZHOU J X, SHI Z G, FU Q. Performance analysis for scattering center parameter estimation of radar targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 726-730(in Chinese).

[9] 邹小海，艾小锋，李永桢，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).

[10] CANER O. Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012: 274-287.

[11] 张栋，冯存前，贺思三，等. 组网雷达弹道目标三维进动特征提取[J]. 西安电子科技大学学报，2015，42(2)：146-151.
ZHANG D, FENG C Q, HE S S, et al. Extraction of three-dimensional precession features of ballistic targets in netted radar[J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(2): 146-151(in Chinese).

[12] 杨有春. 弹道目标滑动型散射中心的微多普勒研究[D]. 西安：空军工程大学，2011：15-20.
YANG Y C. Research on micro-Doppler of sliding-type scattering center on ballistic targets[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2011: 15-20(in Chinese).

[13] 罗迎，张群，封同安，等. OFD-LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 电子与信息学报，2011，33(1)：8-13.
LUO Y, ZHAN G Q, FENG T A, et al. Micro-Doppler effect analysis of rotating target and three-dimensional micro-motion feature extraction in OFD-LFM MIMO radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 8-13(in Chinese).

[14] ALABASTER C. Pulse Doppler radar: Principles, technology, application[M]. Edison, NJ: SciTech Publishing, 2012: 36-42.

作者简介：

许丹 男，硕士研究生。主要研究方向：雷达信号处理。

冯存前 男，教授。主要研究方向：雷达信号处理与电子对抗。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Space position reconstruction of ballistic target based on adaptive fusion

XU Dan, TIAN Bo, FENG Cunqian*, HE Sisan, ZHAO Shuang

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

Abstract: Aimed at the problem that signal radar extracts parameters difficultly and has higher error in estimating parameters due to coupling of precession cone target parameters, a novel algorithm based on uniting the multi-aspect micro-motion information is proposed for parameter extraction and fusion. First, cone-shaped precession model are established and scattering points profile sequence are analyzed. After that, different-aspect conic node scattering point is matched and identified using Hough transform. Then, the micro-motion information of two radars is united as one solving unit to solve the coupling parameters, and other parameters also can be solved. Moreover, precession angle is taken as an example to analyze the variance of error, and each unit is fused by the weighed fusion array based on minimum variance. And other parameters are optimized in the same way. Finally, in one precession period, cone target space position can be reconstructed based on solving the coordinates of conic node and coning vector. Simulation results prove that the proposed method can realize the extraction of high accuracy parameters and cone's reconstruction availably.

Keywords: precession; Hough transform; fusion; space position reconstruction; performance analysis

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2016-06-01; **Accepted**: 2016-10-01; **Published online**: 2016-11-24 09:59

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161124.0959.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61372166,61501495)

* **Corresponding author**. E-mail: fengcunqian@sina.com