# 基于移动散射点模型的雷达回波仿真及分析

### 薛爱军 王晓丹 宋亚飞 雷 蕾

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

摘 要 针对中段目标宽带雷达回波信号难于获取的问题,进一步研究了目标雷达视线角和中段目标姿态的建模方法,给出了基于移动散射点模型的散射中心位置计算公式,然后基于几何绕射理论计算了各散射中心的散射强度,最后对雷达一维距离像进行归一化处理,提取了散射点的相对距离特征,得到了散射点相对距离变化的特征序列。实验结果显示,对雷达一维距离像进行特征提取,可以得到中段目标的姿态信息,为中段目标识别奠定基础。

关键词 移动散射点模型,几何绕射理论,相对距离,目标识别

中图法分类号 TP391

文献标识码 A

### Simulation and Analysis of Radar Echo Based on Moving Scattering Center Model

XUE Ai-jun WANG Xiao-dan SONG Ya-fei LEI Lei (School of Air and Missile Defense, AFEU, Xi'an 710051, China)

Abstract Because it is difficult to obtain Midcourse Target's Wideband Radar Echo, the aspect angles and posture of warhead target modeling methods was further studied. Computational formula of scattering center locations were raised based on the moving scattering center model. Then, scattering intensities of every scattering center were calculated based on geometry diffraction theory. Lastly, after normalizing the high resolution range profiles(HRRP), relative ranges of scattering center were calculated and relative ranges variation array of scattering center was obtained. Experiment result shows that feature extraction of HRRP can get the information for Midcourse Target's posture and provide important foundations to mid-course target recognition.

Keywords Moving scattering center model, Geometry diffraction theory, Relative range, Target recognition

#### 1 引言

近年来,弹道导弹防御系统中的目标识别技术受到越来越多的关注,导弹防御系统可在助推段、中段和再人段实现目标识别和拦截。在中段,目标飞行时间长,可以实现较长时间的识别与拦截,是导弹防御的关键阶段<sup>[1]</sup>。由于获取弹道导弹中段飞行的雷达回波信号比较困难,因此,针对弹道导弹中段目标的雷达回波仿真成为该领域的研究热点<sup>[2-7]</sup>。

文献[2,3]利用微波暗室测量数据插值得到弹头全姿态下的电磁散射特性,对中段目标的识别过程进行了仿真研究。文献[4]对弹道导弹中段目标姿态进行了仿真研究。文献[5] 给出了目标雷达视线角的计算方法,但没有给出雷达视线与进动轴夹角随时间变化的计算公式。文献[6]对弹体不同位置散射中心的微运动特性进行了完整建模,首次得到了滑动型散射中心微 Doppler 的数学表达式。文献[7]推导了弹头散射点的坐标变换公式,但在推导过程中忽略了滚转运动只发生在本体坐标系中这一事实,且文献[6,7]都没有给出移动散射点坐标的计算方法。

本文对目标雷达视线角的建模方法进行了改进,并基于

移动散射点模型,进一步研究了中段目标散射点的坐标转换 关系,给出了移动散射点坐标的计算方法,最后对得到的雷达 一维距离像进行归一化处理,提取了散射点的相对距离特征, 并对实验结果进行了分析。

#### 2 弹道导弹中段运动特性及其建模

雷达目标的散射特性与目标相对于雷达的视线角有关, 因此,为了获得弹道导弹的雷达回波特性,需要对目标雷达的 视线角进行建模。

#### 2.1 目标雷达视线角建模

对于地面观测雷达而言,目标雷达的视线角将随质心的平动和弹头的姿态运动而变化。设雷达视线与进动轴的夹角为β,则雷达视线与目标轴线的夹角为<sup>[8]</sup>

$$\phi = \arccos[\sin\theta\sin\theta\cos(\Omega t + \Omega_0) + \cos\theta\cos\beta] \tag{1}$$

在式(1)中,根据参考文献[7],弹头的空间进动速率  $\Omega$  和进动角  $\theta$  的计算公式如下:

$$\begin{cases}
\Omega = \frac{\sqrt{I_z Q^2 \cos^2 \gamma + I_z^2 Q^2 \cot^2 \gamma}}{I_z I_z} \\
\theta = \arctan(\frac{I_z \sin \gamma}{I_z \cos \gamma})
\end{cases} \tag{2}$$

到稿日期:2012-11-28 返修日期:2013-05-21 本文受国家自然科学基金项目(60975026,61273275,61102109)资助。

**薛爱军**(1989一),男,硕士生,主要研究方向为目标识别和计算机仿真等;王晓丹(1966一),女,教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息处理和机器学习等;宋亚飞(1988一),男,博士生,主要研究方向为目标识别和计算机仿真等;雷 曹(1988一),女,博士生,主要研究方向为智能信息处理和机器学习等。

式中, I, 为横向转动惯量, Q为横向干扰冲量矩, I。为纵向转 动惯量 $I_z$ 为Z轴的主惯量 $\gamma$ 为冲量与目标自旋轴夹角。

为了保证弹头在进入再入段时具有较小的空气阻力并保 持姿态稳定,要求弹头再入时具有零攻角,即进动轴的方向与 再入时弹头速度矢量方向一致。因此,本文假设进动轴的方 向在导弹飞行过程中不会发生变化,进动轴的方向向量和弹 头质心与雷达连线的方向向量之间的夹角即为 $\beta$ 。

根据关机点参数可以得到中段目标的弹道运动参数,进 而得到进动轴的方向向量户。弹头质心与雷达连线的方向向 量为L。可以得到雷达视线与进动轴的夹角 $\beta$ 的计算公式为:

$$\beta = \arccos(\frac{\vec{H} \cdot \vec{L}}{|\vec{H}||\vec{L}|}) \tag{3}$$

#### 2.2 弹头散射中心的位置建模

为了仿真目标的雷达回波,还需要得到弹头各散射中心

$$R(\xi, \psi, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \xi \cos \psi & -\sin \xi \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma & \sin \xi \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \xi & \cos \xi \cos \gamma & -\cos \xi \sin \gamma \\ -\cos \xi \sin \gamma & \sin \xi \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \gamma & -\sin \xi \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \end{bmatrix}$$
(5)

式中, $\xi$ 为俯仰角, $\phi$ 为偏航角, $\gamma$ 为滚动角,其定义见参考文献  $\lceil 7 \rceil$ 

本体坐标系绕自旋轴的旋转矩阵  $R_1$  各参数定义为:

$$\begin{cases} \xi_1 = 0 \\ \psi_1 = 0 \\ \gamma_1 = a_1 t \end{cases} \tag{6}$$

式中,
$$\omega_s = \frac{Q\cos\gamma}{I_Z\sin\gamma}$$

自旋坐标系绕进动轴的旋转矩阵 R<sub>2</sub> 各参数定义为:

$$\begin{cases} \xi_2 = \arcsin(\cos\Omega t \sin\theta) \\ \phi_2 = \arctan(\sin\Omega t \tan\theta) \\ \gamma_2 = 0 \end{cases}$$
 (7)

由弹道方程可以得到进动轴的俯仰角 & 和偏航角 46,且 滚转角  $\gamma_3 = 0$ 。

散射中心在本体坐标系的坐标为(x,y,z),弹头质心在大 地坐标系的坐标为(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>),通过坐标变换,将散射点在本 体坐标系的坐标变换到大地坐标系的变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = Rot \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$
 (8)

随着弹头的进动和平移,目标雷达视线角将发生变化,散 射中心点将在弹体上滑动[6]。散射中心处于雷达视线弹头自 旋轴构成的平面与弹体表面的相交线上。根据文献[6]可知, 随着弹头的运动,散射中心点在本体坐标系的坐标是变化的。 因此,本文根据目标雷达视线角,计算出散射中心点在本体坐 标系的坐标。

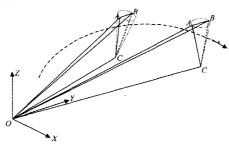


图 1 散射中心位置示意图

到雷达的距离,这个过程可以通过多次坐标转换来完成。以 目标质心为原点建立与雷达坐标系平行的三轴坐标系,为 了方便计算,以质心为原点建立3个坐标系,分别为本体 坐标系、自旋坐标系和进动坐标系,坐标转换关系参考文 献[2,7]。

把散射点在本体坐标系的坐标变换到雷达坐标系中,假 设目标旋转矩阵  $Rot=R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  分别为绕自旋 轴、进动轴的旋转矩阵和进动坐标系到大地坐标系的转换 矩阵[9]。坐标系 xyz 与坐标系 x<sub>1</sub> y<sub>1</sub> z<sub>1</sub> 之间的变换公式

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R(\xi, \psi, \gamma) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$
 (4)

其中:

由图 1 可知,雷达视线与弹头自旋轴构成的平面和平底锥 弹头表面相交为三角形 ABC, 三角形的顶点 A, B, C 即为散射 中心点。根据几何知识可知,散射中心点 A、B 分别为平底锥 底部圆上距离雷达最近的点和最远的点,散射中心点 C 为平 (6) 底锥的锥顶点,并且 C 不随弹头运动而变化。因此,对于不同 形状的旋转对称体弹头计算其散射中心点的坐标,只需要计算 弹头表面不连续处圆周上距离雷达最近点和最远点的坐标。

设雷达在大地坐标系中的坐标为 $(x_r, y_r, z_r), X$ 为不连续 处圆周上所有点的集合,对于 X 中的点(x,y,z),其到雷达的 距离为  $d(x,y,z) = \sqrt{(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2}$ ,则第 i(7) 个散射点的坐标( $x_d, y_d, z_d$ )的计算公式为:

$$(x_d, y_d, z_d) \in \{(x_j, y_j, z_j) \mid (x_j, y_j, z_j) \in X, d(x_j, y_j, z_j) \}$$

$$\geqslant d(x, y, z) \not\equiv d(x_j, y_j, z_j) \leqslant d(x, y, z) \}$$
 (9)

最后结合雷达在大地坐标系中的坐标 $(x_r, y_r, z_r)$ 和第 i个 散射点的坐标 $(x_d, y_d, z_d)$ ,得到  $t_m$  时刻该散射点回波延迟距 离 $R_i(t_m)$ :

$$R_i(t_m) = \sqrt{(x_r - x_d)^2 + (y_r - y_d)^2 + (z_r - z_d)^2}$$
 (10)

#### 3 散射中心回波模型建模

雷达散射中心模型是一种等效的目标散射模型,它较好地 反映了高分辨力雷达目标回波信息,广泛应用于雷达目标识别 中。对于雷达目标散射中心的散射系数,文献[9]利用电磁软 件根据目标的 CAD 模型计算得到目标的电磁计算数据,但电 磁计算软件的计算时间复杂度较大日软件的数据不能很好地 与弹道仿真模块和目标识别模块进行交互;文献[2,3]根据暗 室测量数据插值得到动态散射数据,但暗室测量具有实验条件 较为苛刻、实验成本较高的缺点。结合弹头类目标结构简单的 特点,本文参考文献[10]中基于几何绕射理论的弹头类目标计 算方法,大大提高了计算效率。

本文针对连续波线性调频体制的雷达研究回波仿真,根据 文献[11],连续波线性调频体制雷达解调后的回波可以用下式 描述:

$$S(t,t_m) = \sum_{i=1}^{N} \sigma_i \cos\{2\pi \left[\mu t \tau_i(t) - \frac{\mu \tau_i^2(t)}{2} + f_0 \tau_i(t)\right]\}$$
 (11)

式中,  $\mu = \frac{\Delta F}{T_c}$  为调频斜率,  $\Delta F$  为扫频宽度;  $\tau_i(t) =$ 

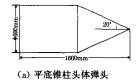
 $\frac{2(R_i(t_m)+vt)}{c}$ , v 为目标相对雷达的径向速度。

对 S(t) 在有效采样时段内以采样频率 f, 进行 AD 采样,得到数字信号 S(l)。对数字信号 S(l) 做 FFT 分析,便可得到目标的一维距离像。

# 4 仿真实验及分析

#### 4.1 实验及结果

本文首先仿真弹道导弹运行轨迹及中段目标的微运动,然后通过电磁计算得到散射系数  $\sigma_i$ ,进一步由散射中心回波模型得到 LFMCW 回波,最后脉冲压缩产生一维距离像。实验选取平底锥柱头体弹头和伴飞锥体诱饵作为仿真目标。目标外形及尺寸如图 2 所示[7]。



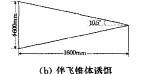


图 2 弹头和伴飞锥诱饵的外形尺寸

假定脉冲压缩雷达的发射波为连续波线性调频信号,调制周期为  $T_p=1$ ms,采样率为  $N_s=4096$ ,载频为  $f_0=35$ GHz,扫频宽度为  $\Delta F=500$ MHz,运用 MATLAB 对一个调制周期的信号进行仿真。图 3 为发射信号波形和发射信号频率特性曲线。

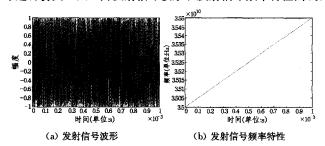


图 3 发射信号波形和频率特性

弹道的场景参数:弹头和诱饵采用了同一条弹道,导弹关机点高度为 100km,速度为 5000m/s,采用最小能量弹道。忽略地球扁平率并且不考虑地球自转的影响,此时的发射面应与弹道平面重合。假设雷达在大地坐标系中的坐标为(-1292×10³m,-746×10³m,6194×10³m),导弹关机点坐标为(1426×10³m,823×10³m,6258×10³m),从关机点开始到弹着点飞行时间为 12.18 分钟。图 4 就是场景参数下的弹道导弹中段飞行仿真场景[12]。

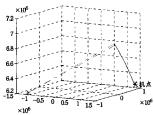


图 4 弹道导弹中段飞行仿真场景

为了仿真弹头的姿态运动,必须根据弹头的质量分布、受到的冲量矩等参数计算进动参数,设弹头质量分布均匀,受到的冲量方向与对称轴方向的夹角为 2°,冲量大小为 2×10³N · m/s,设弹头的纵向转动惯量为 116kg · m²,横向转动惯量为 248kg · m²,诱饵的纵向转动惯量为 38kg · m²,横向转动惯量

为 156kg·m²,代人微进动参数计算公式得弹头自旋角频率为 6.56rad/s,进动周期为 4.03s,进动角为 8.37,诱饵的自旋角频率为 22rad/s,进动周期为 2.1s,进动角为 10.4°。

由 2.1 节的目标雷达视线角的建模方法可以得到弹头和 锥诱饵相对雷达视线角的变化曲线,如图 5 所示。

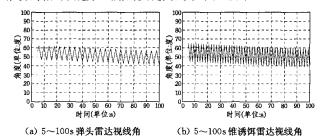


图 5 目标微动引起的雷达视线角类周期性变化

为了直观显示雷达回波仿真结果,对雷达回波做 FFT 变换得到一维距离像(HRRP)域。雷达一维距离像具有平移敏感性、方位敏感性和幅度敏感性,所以利用雷达一维距离像提取目标特征必须进行预处理<sup>[13]</sup>。进行预处理,首先对一维距离像进行速度补偿,消除畸变,然后以其中一个峰值点为参考点,做出散射点相对距离随时间变化的曲线。图 6 给出了弹头和锥诱饵归一化处理后的一维距离像序列。

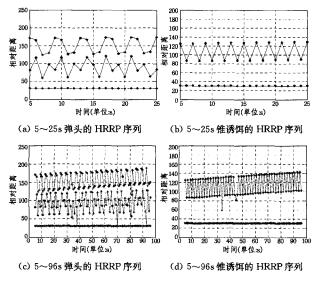


图 6 归一化处理后的 HRRP 序列

## 4.2 实验结果分析

从图 5 可以看出目标相对雷达视线角随时间的变化为类周期的变化,与文献[5]的仿真结果相比更接近真实。目标的微运动特性和质心的平移都会导致目标雷达视线角的变化,目标雷达视线角的变化又会导致目标散射特性的变化,因此,对目标雷达视线角建模方法的进一步完善可以更加真实地对中段目标宽带雷达回波进行仿真。

雷达目标一维距离像的幅度峰值对应于目标的散射点,峰值点之间的相对距离表征了散射点在雷达视线方向上投影的相对位置。从图 6(a)(b)可以看出,相对距离呈现出周期性的变化,其变化周期与目标微动引起的雷达视线角的变化周期相同,并且与目标的进动周期相一致。因此,可以根据相对距离的变化周期识别出锥体类弹头和伴飞锥诱饵。

目标雷达视线角的减小将引起目标在雷达视线方向上投(下转第 207 页)

问题,本文给出了一种把局部搜索技术和二次插值技术与 PSO 算法相结合的混合 PSO 算法。为了寻找更好的粒子位 置和避免陷入局部最优,本文引入了二次插值技术,为了提高 求解精度又引进了 Hooke-Jeeves 局部搜索技术,从而提高了 算法的收敛速度与求解精度,数值结果表明算法是有效的,取 得的结果令人满意。

# 参考文献

- [1] Kennedy J, Eberhartr C. Particle swarm optimization: [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth Australia, IEEE Service Center, 1995; 1942-1948
- [2] Angeline P J. Using selection to improve particle swarm optimization[C]//Proceedings of the IEEE congress on Evolutionary Computation. Anchorage, Alaska, IEEE press, 1998; 84-89
- [3] 窦全胜,周春光,张忠波,等.基于微分演化的 PSO 参数选择策 略[]]. 计算机科学,2007,34(4):288-230
- [4] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self- organizing hierarchical particle swarm optimizer with time varying accelerating coefficients [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3), 240-255
- [5] Grimaccia F, Mussetta M, Zich R E. Genetical swarm optimization; self-adaptive hybrid evolutionary algorithm for electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007,55(3):781-785

# [7] 肖丽,张伟,张元清.一种结合自适应局部搜索的粒子群优化算

算机应用研究,2011,28(5):131-133

法[J]. 计算机科学,2007,34(8):199-201

[6] 章慧云,黄晓伟,张红华,等. 混合型粒子群优化算法研究[J]. 计

- [8] 陈红安,张英杰,吴建辉.基于非线性共轭梯度法的混沌微粒群 优化算法[J]. 计算机应用,2009,29(12):3273-3276
- [9] 徐文星,耿志强,朱群雄,等. 基于 SQP 局部搜索的混沌粒子群 优化算法[J]. 控制与决策,2012,27(4):557-561
- [10] 吴建辉,章兢,陈红安. 融合 Powell 搜索的粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2012,27(3):343-348
- [11] 高卫峰,刘三阳. 一种高效粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2011,26(8):1158-1161
- [12] Hooke R, Jeevers T A. Direct search solution of numerical and statistical problems [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1961, 8:212-229
- [13] Yao X, Liu Y, Lin G. Evolutionary programming made faster [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3 (2):82-101
- [14] Shi Y, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization [C] // Proc of Congress on Computational Intelligence. Washington, USA, IEEE Service Center, 1999: 1945-1950
- [15] Zhan Z H, Zhang J, Li Y, et al. Adaptive particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part B,2009,39(6):1362-1381

## (上接第 203 页)

影的相对距离增大,这一变化体现在图 6(c)(b)中,可以看到 散射点的相对距离也在增大。因此,基于散射点的相对距离 信息还可以提取目标的长度变化特征,作为下一步目标识别 的依据。本文的仿真结果与文献[7]相比更能反映出散射点 的变化特性,可以表征目标此时相对于雷达视线的姿态,其变 化特性可以进一步作为对雷达目标进行识别的特征变量。

结束语 本文针对中段目标特有的运动形式自旋和进 动,完善了中段目标雷达视线角的建模方法,并基于移动散射 点模型,进一步推导了移动散射点坐标的转换公式,给出了移 动散射点坐标的计算方法。最后给出了中段目标宽带雷达回 波仿真结果,实验所得结果与参考文献[5]中微波暗室的实测 结果相一致。仿真结果表明,中段目标宽带雷达回波与目标 的姿态运动参数、形体参数都有较大关系,为中段目标特征提 取、目标识别提供了基础。

# 参考文献

- [1] 刘永祥,黎湘,庄钊文. 导弹防御系统中的雷达目标识别技术进 展[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(8):1188-1193
- [2] 冯德军,陶华敏,丹梅.弹道目标雷达宽带识别仿真与评估[J]. 系统仿真学报,2006,18(1):225-228

- [3] 刘进,冯德军,赵锋.弹道中段雷达目标识别仿真系统的关键模 型及实现[J]. 系统仿真学报,2008,20(17):4588-4592
- [4] 谢代华. 基于弹道导弹的雷达系统场景仿真研究[D]. 成都:电 子科技大学,2006
- [5] 冯德军. 弹道中段目标雷达识别与评估研究[D]. 长沙: 国防科 技大学,2006
- [6] 马梁,刘进,王涛. 旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J]. 中国科学:信息科学,2011,41(5):605-616
- [7] 金光虎,高勋章,黎湘.中段目标微运动建模方法与宽带雷达回 波仿真[J]. 系统仿真学报,2010,22(4):867-871
- [8] Hanson F, Beaghler G. Discriminating interceptor technology program(DITP)laser radar[C]//Conference on laser radar techno-logy and application IV. Oriando, Florida, 1999
- [9] 张安,卢再奇,范红旗. 基于散射中心模型的舰船 LFM 雷达回 波仿真[J]. 雷达科学与技术,2011,9(4):316-320
- [10] 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
- [11] 蒋兰兰. 高分辨率 LFMCW 雷达信号处理算法研究[D]. 南京: 南京理工大学,2007
- [12] 张毅. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999
- [13] 王云飞,李辉,赵乃杰. 雷达目标一维高分辨距离像的特性分析 及预处理方法研究[J]. 现代电子技术,2011,34(5):9-14