

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、中段和再入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^[1]。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^[2-7]。

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^[8]

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

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

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

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—),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—),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—),男,博士生,主要研究方向为目标识别和计算机仿真等;雷 蕾(1988—),女,博士生,主要研究方向为智能信息处理和机器学习等。

$\frac{2(R_i(t_m) + vt)}{c}$, 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_s 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 σ_i , 进一步由散射中心回波模型得到 LFM CW 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]。

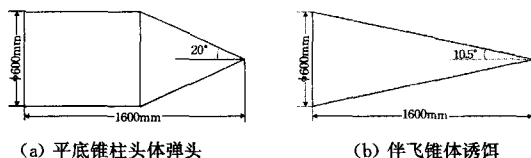


图 2 弹头和伴飞锥体诱饵的外形尺寸

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 $T_p = 1\text{ms}$, 采样率为 $N_s = 4096$, 载频为 $f_0 = 35\text{GHz}$, 扫频宽度为 $\Delta F = 500\text{MHz}$, 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。

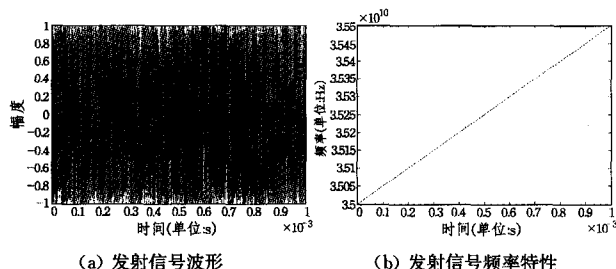


图 3 发射信号波形和频率特性

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 $(-1292 \times 10^3\text{m}, -746 \times 10^3\text{m}, 6194 \times 10^3\text{m})$, 导弹关机点坐标为 $(1426 \times 10^3\text{m}, 823 \times 10^3\text{m}, 6258 \times 10^3\text{m})$, 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]。

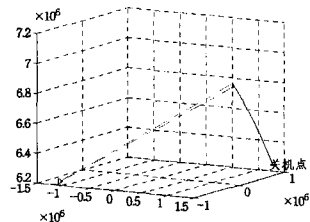


图 4 弹道导弹中段飞行仿真场景

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 $2 \times 10^3\text{N} \cdot \text{m/s}$, 设弹头的纵向转动惯量为 $116\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 横向转动惯量为 $248\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 诱饵的纵向转动惯量为 $38\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 横向转动惯量

为 $156\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 代入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。

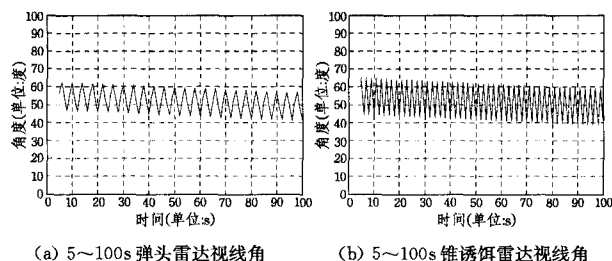


图 5 目标微动引起的雷达视线角类周期性变化

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^[13]。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。

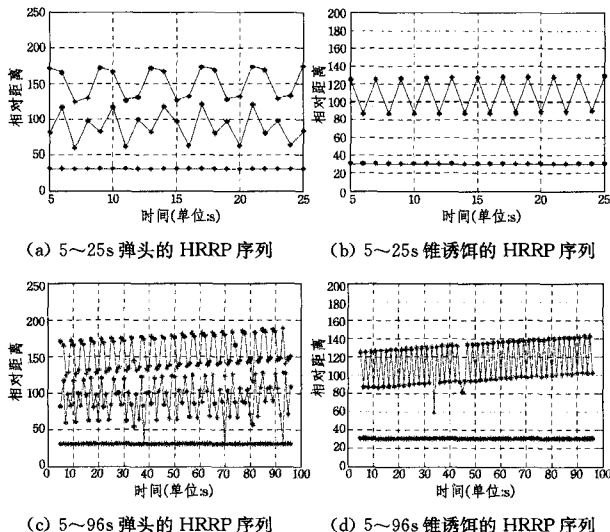


图 6 归一化后的 HRRP 序列

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, Eberhart R 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[J]. 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, 11(3):781-785

(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发展[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

- [6] 章慧云, 黄晓伟, 张红华, 等. 混合型粒子群优化算法研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5):131-133
- [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法[J]. 计算机科学, 2007, 34(8):199-201
- [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, Jeeves 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

- [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 technology and application IV. Orlando, 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 LFM CW 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