

基于椭球体模型的弹道中段目标特性反演

魏玺章 丁小峰 黎湘

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 针对弹道中段目标 RCS 序列识别问题, 在分析其运动特性与电磁散射特性的基础上, 结合传统的基于椭球体的目标形状反演模型, 提出了一种新的利用 RCS 幅度相对于目标姿态角变化率反演弹道中段目标长短轴比值和目标相对于雷达视线姿态角的方法, 克服了传统方法需要观测到目标 RCS 极大、极小值的缺陷。利用仿真和暗室测量的典型弹头类目标的 RCS 数据, 验证了方法的有效性。

关键词: RCS; 椭球体模型; 弹道中段目标; 反演

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1706-05

The Characteristic Inversion of the Mid-course Missile Based on the Ellipse Model

Wei Xi-zhang Ding Xiao-feng Li Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper is for the identification from the RCS sequence of the Mid-course missile. On the base of analyzing its motion and electromagnetic scattering characteristic, a new method using RCS magnitude changes with respect to the object gesture angle for inversing the mid-course object's long-short axis ratio and gesture angle to the line of the radar is presented. Comparing with the traditional ellipse method, the new method overcomes the disadvantage of the necessity for the maximal and minimal RCS value of the object. The experiment results tested by the simulated and darkroom measurement of the representative missile object show the effectiveness of the method.

Key words: Radar Cross Section(RCS); Ellipse model; Mid-course missile; Inversion

1 引言

弹道导弹中段目标特性反演的研究对发展弹道导弹防御系统有着重要意义^[1-6], 但同时存在诸多难点, 如: 目标对电磁波的调制机理难以揭示; 传感器受带宽和有限频段的限制, 不能获得目标的全息; 目标运动状态的不确定性等。目前, 造价相对低廉的窄带雷达, 仍然是国内一种主要的空间探测传感器, 努力发掘窄带雷达的目标识别潜力, 具有重要意义; 本文主要研究基于窄带雷达 RCS 序列信息弹道中段目标的特性反演问题。

国内外基于 RCS 序列信息反演的研究文献较少。一方面是因为反演问题的技术难点多, 另一方面是窄带雷达提供的信息量极少。针对窄带雷达提供的 RCS 序列信息, 主要是采用等效模型法对目标的几何特性进行反演。

从 1991 年起, MIT 林肯实验室协助 NASA 开展人造卫星碎片测量计划^[5]。NASA 估计目标尺寸

时采用了等效球体直径 (Equivalent Sphere Diameter, ESD) 方法, 该方法首先将目标形态假设为一等效球体, 通过一次观测估计目标在某一特定方位角下的等效直径, 然后根据多次观测的统计规律, 估计该目标的三维尺寸。

文献[7]通过将观测目标等效为椭球体, 估计出国际空间站在特定视线角范围内的二维尺寸。

采用上述两种方法对目标的尺寸进行估计需要对目标进行全方位角的多次 RCS 数据测量。因此, 并不适用于相对于雷达视线具有特定姿态角的弹道中段飞行目标。

本文在已有的研究基础上, 利用仿真和暗室测量的目标 RCS 电磁散射数据, 提出了一种新的基于椭球体模型的弹道中段目标特性的反演方法。同原有方法比较, 本方法对于任意给定时间段的 RCS 序列信息, 可反演弹道中段目标形状和相对雷达视线姿态角特性参数, 其中形状特性可用于识别真假弹头, 相对雷达视线姿态角参数可用于辅助判断弹道中段目标的进动角度。

2 基于椭球体模型的弹道中段目标特性反演

2.1 典型弹头目标电磁散射特性数据分析

战略、战术弹道导弹一般由弹头和弹体两部分组成, 中近程的弹道导弹弹头和弹体不分离, 远程或战略弹道导弹为了减少再入大气层时的 RCS, 完成助推段后, 弹头和弹体分离, 并将弹体引爆, 形成弹体碎块假目标。针对弹道导弹弹头目标的基本结构, 依据文献[4], 建立了图 1 所示的 4 种典型弹道导弹中段弹头模型:

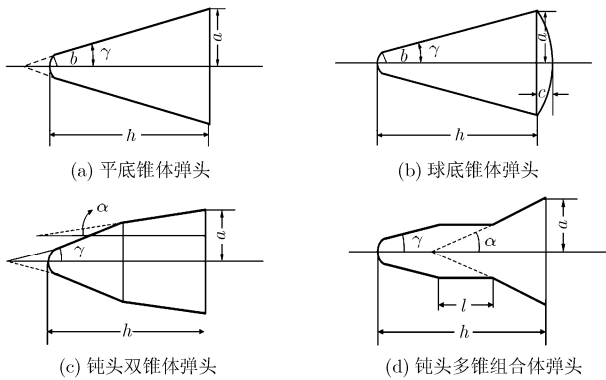


图 1 典型弹头目标

在 X 波段, 利用 RCS 仿真计算软件 GRECO, 仿真各类弹头模型的静态全姿态角的电磁散射数据。由于弹道中段目标具有进动、章动等运动特性, 在获取中段目标静态全姿态角的 RCS 数据基础上, 依据文献[8]中提供的公式, 仿真了中段目标的动态 RCS 数据。

文献中分析了进动锥体目标对雷达回波的姿态角计算公式:

$$\gamma(t) = \cos^{-1}(\sin \beta \sin \theta \cos((t_0 + t) \cdot 2\pi / T) + \cos \beta \cos \theta) \quad (1)$$

式中 $\gamma(t)$ 为 t 时刻的姿态角, t_0 为起始时刻, β 为雷达的平均视线角, θ 为锥体进动角。

当雷达对弹道中段目标进行跟踪观测时, 决定目标相对于雷达视线的姿态角变化的因素有两部分: 弹道(质心)运动和姿态运动(进动), 文献[8]通过仿真弹道中段目标的运动模型, 给出中段目标相对于雷达视线的姿态角的范围为 $65^\circ \sim 95^\circ$ 的参考值, 本文在分析中使用的弹道中段目标相对于雷达视线的姿态角度范围为 $60^\circ \sim 100^\circ$ 。

根据弹道中段目标的运动模型, 通过 B 样条拟合典型弹头的静态 RCS, 仿真得到中段目标运动情况下的 RCS 序列。

拟合采用的参数为: 采样间隔 0.002 s, 观测时

间 0.4 s, 进动周期为 0.4 s, 进动角为 4° , 平均雷达视线角为 75° , 不考虑目标平动引起的平均雷达视线角的变化, 图 2 是弹道中段目标的动态 RCS 序列动态拟合过程。

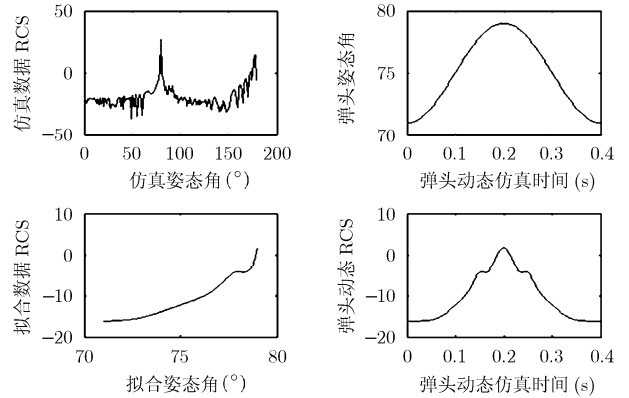


图 2 弹道中段目标动态拟合

2.2 基于椭球体模型的弹道中段目标形状反演性能分析

文献[7]将目标等效为椭球体模型, 通过对椭球体 RCS 曲线特性的分析, 验证了利用等效椭球体模型反演目标的长短轴尺寸比值方法的有效性。下面, 对椭球体 RCS 曲线的特殊性进行简要概述:

椭球体模型的数学表达式为

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 + (z/c)^2 = 1 \quad (2)$$

其中 x, y, z 是坐标变量; a, b, c 是椭球体半轴尺寸。使用的椭球体是旋转对称的。即两个短轴分别为 a, b 且 $a = b$; 长轴为 c 。利用物理光学法近似, 在光学区, 椭球体全姿态角 RCS 值的公式表示为

$$\sigma_{\text{ellipse}} = \frac{\pi a^4 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (3)$$

当 $c = 1 \text{ m}$, $a = b = 0.2 \text{ m}$ 时, 椭球体全姿态角的 RCS 值, 如图 3 所示。

θ 为椭球体相对于雷达视线的姿态角。当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\sigma_{\text{min}} = \pi a^4 / c^2$; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\sigma_{\text{max}} = \pi c^2$ 。得到关系: $\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{min}} \propto (\rho)^4$, 其中 ρ 是目标长短轴比。文献[7]即通过多次观测等效椭球目标, 提取观

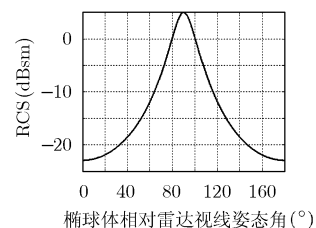


图 3 椭球体全姿态角的 RCS

测的极大、极小值,反演目标的长、短轴之比。

对于弹道中段飞行目标,相对于雷达视线具有特定姿态角,实际观测过程中,并不必定会出现目标 RCS 的极值,因此,使用传统的椭球体模型无法对弹道中段目标的长、短轴比进行反演。考虑到弹道中段目标具有进动的运动特性,其相对于雷达视线的姿态角具有周期性变化,该变化会对雷达回波进行有规律的调制。因此,弹道中段目标任意给定段的 RCS 观测序列,都包含着目标 RCS 随姿态角规律性变化的信息,基于上文分析,将目标等效为椭球体模型后,目标 RCS 幅度相对于姿态角变化率蕴含了目标长、短轴比值的形状特征信息。

下节主要阐述利用基于新的椭球体模型反演弹道中段目标特性的方法。

2.3 基于新的椭球体模型的弹道中段目标特性反演方法

对式(3)中姿态角 θ 求导得到:

$$\begin{aligned}\sigma'_\theta &= \frac{-2\pi a^4 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^3} (a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)' \\ &= \frac{-2\pi a^4 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^3} (2a \sin \theta \cos \theta - 2c \cos \theta \sin \theta) \\ &= \frac{4\pi(c-a)a^4 c^2 \sin \theta \cos \theta}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^3} \\ &= \frac{4\pi a(\rho-1)\rho^2 \sin \theta \cos \theta}{(\sin^2 \theta + \rho^2 \cos^2 \theta)^3}\end{aligned}\quad (4)$$

由式(4)得:椭球体 RCS 随姿态角的变化率可表示为函数 $\sigma'_\theta(a, \rho, \theta)$ 。据此,建立反演中段弹头目标的几何特性椭球体模型,步骤如下。

第1步 在中段飞行的弹道导弹的视角变化范围内($60^\circ \sim 100^\circ$),每隔 1° ,建立 $\sigma'_\theta(a, \rho)$ 的曲线数据模板。横坐标轴分别为短轴尺寸 a 与长短轴比 ρ ,纵坐标为对应的 RCS 随姿态角的变化率。图4是部分姿态角下的模板数据。

第2步 平滑 RCS 序列。由于测量的 RCS 数据会有剧烈的起伏,这与椭球体静态 RCS 平滑缓变的特点是不相同的,但是 RCS 数据的变化趋势和具有相同长短轴椭球体静态 RCS 曲线相似,因此,需要对测量的 RCS 序列进行平滑。

采用多项式拟合的方法平滑 RCS 序列。多项式拟合方法不能精确地拟合起伏剧烈曲线的细节,但能较好的反映曲线变化的趋势,满足对斜率估计的需要。多项式拟合处理后, RCS 序列在中段目标雷达视线角范围内具有与椭球体类似的 RCS 变化趋势。对平滑后的数据进行中段目标的动态拟合,参数与上文设定相同,平滑效果如图5所示。

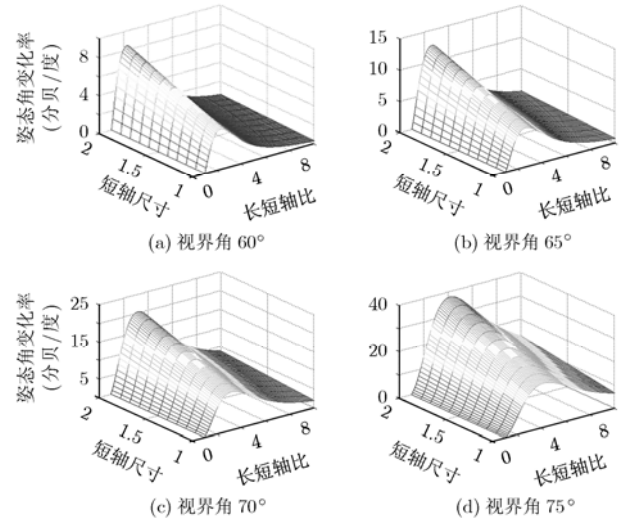


图4 部分椭球体尺寸估计模板

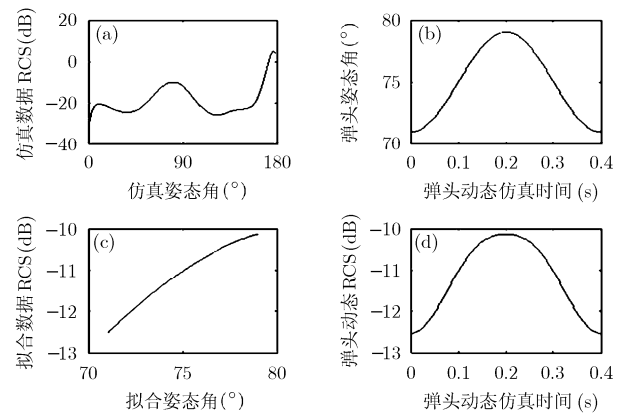


图5 平滑弹道中段目标动态拟合数据示意图

第3步 估计 RCS 随姿态角的变化率。本文使用的是中段目标的动态仿真数据。根据式(1)仿真的弹道中段目标运动模型可知,不考虑目标平动引起的平均雷达视线角变化的情况,弹道中段进动目标相对于雷达姿态角的变化是周期性的。如图5(d)所示,在弹道中段目标的一个进动周期内,弹头姿态角的变化为($71^\circ \rightarrow 79^\circ \rightarrow 71^\circ$);姿态角的变化范围由中段目标的进动角决定。

由于中段进动目标相对于雷达姿态角变化是周期性的,拟合后 RCS 序列同姿态角关系的曲线也是周期性的。如图5(d)所示,在半个周期内,中段目标的姿态角变化为($71^\circ \rightarrow 79^\circ$), RCS 序列随着姿态角的变化是单调递增的。可以利用半周期内目标的 RCS 序列变化量同姿态角的变化量的比值作为 RCS 序列相对于姿态角斜率的估计。

在仿真中,使用了200点的 RCS 拟合数据,进动角为 4° ,则 RCS 序列相邻两点之间的平均姿态角变化为 $\Delta\theta \approx 8^\circ/100$ 。目标 RCS 序列相对于雷达视

表 1 基于椭球体模型的弹道中段目标几何特性反演结果

SNR(dB)		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
长短轴比 (4.8)	平底锥弹头	4.09	4.13	4.18	4.44	4.58	4.49	4.44	4.74	4.48	4.57	4.61
	球底锥弹头	5.00	4.99	4.83	4.97	4.78	4.77	4.75	4.79	4.87	4.83	4.81
	钝头双锥体	5.13	4.43	4.49	4.42	4.75	5.02	4.75	4.85	4.82	4.80	4.88
	钝头多锥体	4.69	4.68	4.54	4.68	4.46	4.35	4.59	4.25	4.53	4.54	4.39
目标平均 姿态角 (75)	平底锥弹头	73	74	73.5	74	75	73	72.5	73	73.5	73	73
	球底锥弹头	74	74	75	75.5	74.5	74	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5
	钝头双锥体	76	74	74	74	74	75.5	74	75	75	75	75
	钝头多锥体	74.5	74.5	74	74.5	74.5	73.5	74.5	73	74.5	74.5	74

线角的斜率表示为

$$k(i) = \frac{\text{RCS}(m) - \text{RCS}(n)}{(m - n)\Delta\theta} \quad (5)$$

在实际应用中, 该斜率的估计取决于弹道中段进动目标的进动周期和进动角度。关于弹道中段目标进动周期和进动角度的提取, 有多种方法: 如时频分析法, 自相关法, 方差分析法等^[9-12], 本文不再赘述。

将斜率估计量代入到预先生成的 41 个模板中, 通过设定匹配门限, 得到 N ($N \leq 41$) 个长短轴比和目标相对于雷达视线的姿态角的结果, 对结果进行统计分析, 可以得到弹道中段目标的长短轴比值, 以及弹道目标相对于雷达视线的姿态角。

3 试验结果

根据上文的分析, 对长短轴比为 4.8, 相对于雷达视线的平均姿态角为 75° 的 4 类弹道中段目标的仿真数据进行反演, 反演结果如表 1 所示。

从表 1 看出, 在不同程度的噪声干扰下, 利用该方法都可以较好的反演出弹道中段目标长短轴比的几何特性。受噪声干扰, 反演结果有一定程度的波动, 信噪比小于 8 dB 时, 表中给出的结果是 10 次反演运算结果的均值, 试验表明不同目标各次长短轴比的反演结果偏离均值最大范围 ± 0.85 ; 信噪比大于 8 dB 时, 长短轴比反演结果趋于稳定值。单次反演可有效表示结果。利用上文方法, 对某弹头暗室数据进行动态拟合和目标特性参数反演。由文献[5]的方法得到弹头最大投影尺寸, 结合本文介绍的椭球体模型反演的弹头参数和弹头真实参数比较结果如图 6 所示。

通过对仿真数据和暗室测量数据的试验表明, 该方法能较好的估计弹道中段目标的长短轴比几何特性, 具有明显的物理意义, 为弹道中段目标的目标识别提供了一种技术方法。

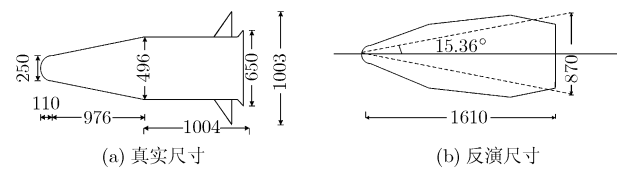


图 6 某弹头模型的反演尺寸与真实尺寸比较(mm)

4 结束语

本文根据椭球体模型特有的性质, 利用弹道导弹中段 RCS 序列相对于姿态角的变化率的统计值, 通过一定的数据分析、处理方法, 反演了平底锥弹头、球底锥弹头、钝头双锥体、多锥组合体等典型弹道中段目标的长短轴比, 对弹道中段目标的识别具有一定意义。

另外, 利用椭球体模型进行反演时, 可以根据使用模板的姿态角范围, 估计出弹道中段目标的相对于雷达视线的姿态角范围。本参数结合雷达测量的弹道轨道参数, 可估计弹道中段目标进动参数, 对于区分真实目标和诱饵具有一定意义。

参考文献

- [1] Sessler A M 等著, 卢胜利等译. NMD 与反制 NMD. 北京: 国防大学出版社, 2001: 117-120.
- [2] Knott E F. Simulation of reentry vehicle motion during laboratory measurements of radar cross section [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1969, 21(5): 242-244.
- [3] Mehrhdz D. Radar observations in low earth orbit [J]. *Advanced Space Research*, 1997, 19(2): 203-212.
- [4] Lee S H. Investigation of the effects of target feature variations on ballistic missile RCS [D]. [Master dissertation], Department of The Air Force Air University, 2006.
- [5] Lambour R, Rajan N, and Morgan T, et al. Assessment of orbital debris size estimation from radar cross section measurements [J], *Advanced Space Research*, 2004, 34:

- 1013-1020.
- [6] Hanson F and Beaghtler G. Discriminating interceptor technology program (DITP) laser radar [C]. SPIE Conference on Laser Radar Technology and Applications IV, 1999, SPIE 3707: 372-380.
- [7] 黄小红. 基于 RCS 序列的空间目标形状估计[J]. 航天电子对抗, 2005, 21(4): 44-46.
Huang Xiao-hong. Estimation of space object shapes from RCS time series[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2005, 21(4): 44-46.
- [8] 刘永祥. 导弹防御系统中的雷达目标综合识别研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2004.
Liu Yong-xiang. Integrated radar target discrimination in ballistic missile defense system[D]. [Ph.D. dissertation]. National University of Defense Technology, 2004.
- [9] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 王国玉. 弹道中段雷达目标识别与对抗[J], 航天电子对抗, 2004, (5): 31-35.
Feng De-jun, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping and Wang Guo-yu. The radar target discrimination and warfare for mid-course missile. *Aerospace Electronic Warfare*, 2004, (5): 31-35.
- [10] 金文彬, 刘永祥, 任双桥, 黎湘, 庄钊文. 锥体目标空间进动特性分析及其参数提取[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 408-410.
Jin Wen-bin, Liu Yong-xiang, Ren Shuang-qiao, Li Xiang, and Zhuang Zhao-wen. Characterizing of spatial precession for cone and its parameter extracting[J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(4): 408-410.
- [11] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉, 姜斌. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 643-646.
Chen Hang-yong, Li Xiang, Guo Gui-rong, and Jiang Bin. Radar feature extraction of macro-precession ballistic missile warhead[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 643-646.
- [12] 刘永祥, 黎湘, 庄钊文. 空间目标进动特性及在雷达识别中的应用[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1329-1332.
Liu Yong-xiang, Li Xiang, and Zhuang Zhao-wen. The precession characteristic of spatial target and its application in Radar Recognition[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(11): 1329-1332.
- 魏玺章: 男, 1976年生, 副教授, 博士, 从事雷达目标识别、目标特性等领域的研究工作.
- 丁小峰: 男, 1981年生, 博士生, 从事雷达目标识别、目标特性等领域的研究工作.
- 黎湘: 男, 1967年生, 博士, 教授, 主要从事精确制导、雷达信息处理、非线性信息处理等领域的研究工作.