

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0042- 06

# 基于球体- 椭球体联合模型的中段目标几何特性反演\*

张月辉, 龚仕仙

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对弹道中段目标 RCS(Radar Cross Section) 序列识别问题, 在分析中段目标电磁散射特性及运动特性的基础上, 结合传统的基于球体、椭球体的目标几何特性反演模型, 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二维几何尺寸的算法, 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:** 雷达散射截面积; 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

## The Characteristic Inversion of the Mid-course Missile Based on the Sphere-ellipse Model

ZHANG Yue-hui, GONG Shi-xian

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper is for the identification of the RCS sequence of the mid-course missile. On the basis of analyzing its motion and electromagnetic scattering characteristic, a new method using RCS magnitude changes with respect to the object gesture angle for inverting the mid-course object's two-dimensional length was presented. Compared 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; ellipse model; mid-course missile; inversion

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<sup>[1-6]</sup>, 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<sup>[5]</sup>。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, 估计该目标在统计意义上的尺寸。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 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球体- 椭球体联合估计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几何特征参数, 并可用于识别真假弹。

\* 收稿日期: 2010- 06- 08

作者简介: 张月辉(1970-), 男, 博士生。

## 1 基于椭球体模型的弹道中段目标特性反演

### 1.1 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:

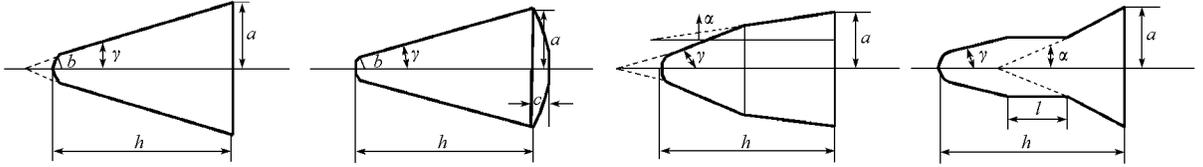


图1 典型弹头目标  
Fig. 1 Typical objective of warhead

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:

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

式中,  $\gamma(t)$  为  $t$  时刻的姿态角,  $t_0$  为起始时刻,  $\beta$  为雷达的平均视线角,  $\theta$  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 0.002s,观测时间 0.4s,进动周期为 0.4s,进动角为  $4^\circ$ ,平均雷达视线角为  $75^\circ$ ,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。

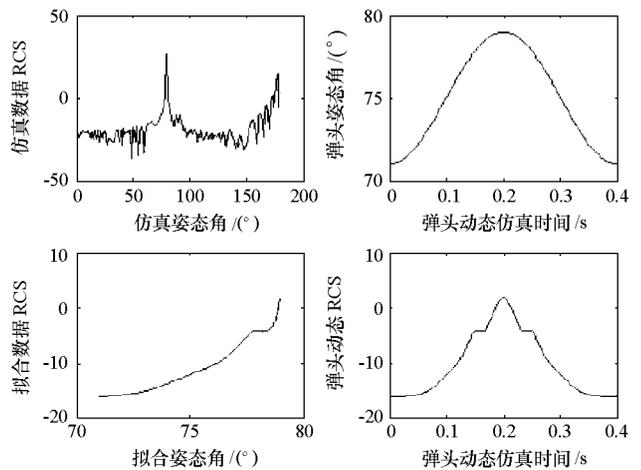


图2 弹道中段目标动态拟合  
Fig. 2 The data of the midcourse missile

### 1.2 基于球体-椭球体联合模型的目标几何特性反演

本文基于中段目标的特殊结构特性,设计了一种利用球体-椭球体联合模型估计中段目标二维尺寸的算法流程,利用球体模型反演中段进动目标的最大投影尺寸方法,利用椭球体模型反演中段进动目标长短轴比值,并通过二者的交互,获得目标二维尺寸的最优估计。

当弹道中段目标进动产生的姿态角的变化范围包含其母线与雷达视线垂直的时刻,球体模型可用于反演中段目标长度。

锥体 RCS 与姿态角的关系为:

$$\sigma_{cone}(\theta) = \begin{cases} \frac{M \tan \alpha \tan^2(\theta + \alpha)}{8\pi \sin \theta} & \theta \in (0, \pi), \theta \neq \frac{\pi}{2} - \alpha \\ \frac{8\pi L^3 \tan \alpha}{9\lambda \cos^3(\alpha)} & \theta = \frac{\pi}{2} - \alpha \end{cases} \quad (2)$$

$\lambda$ 为入射波波长,  $\alpha$ 为目标锥角,  $L$ 为弹体长度。当雷达波垂直于弹道中段目标的母线时刻, 目标回波的 RCS 存在冲击峰值。此冲击峰值远大于其他姿态角度的目标回波 RCS 值, 由此可判断中段目标母线相对于雷达视线垂直的时刻; 当冲击峰值周期性出现时, 中段目标具有周期性运动特性。选取包含至少一个进动周期内的目标回波 RCS 序列作为反演弹体长度的待处理序列。式(2)表明, 在不考虑目标锥角的情况下, 锥体目标的 RCS 大小与锥体长度和雷达发射频率具有对应关系。为模糊锥角对长度反演的影响, 建立了不同频率下的等效金属球体直径与 RCS 映射模型。

将待处理序列冲击峰值临近姿态角范围内的 RCS 值经过最小平方二次多项式滤波后, 将序列最大值代入球体尺寸映射模型中, 以其映射长度等效为弹体长度值。图3给出的是利用建立的半锥角为  $8^\circ$ 、 $11^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $17^\circ$ 、长度为 1~8m 的锥体模型静态测量全方位角度的 RCS 数据, 在尺寸映射模型坐标内验证各类锥体的长度与其 RCS 最大值的与球体尺寸映射模型具有等效性的对比关系曲线。从图3中可以看出, 不同半锥角的锥体目标的 RCS 最大值与其对应长度下的目标尺寸映射模型的 RCS 值是很接近的, 表明了利用球体尺寸映射模型对各类锥体目标的尺寸反演正确性。

### 1.3 基于椭球体模型的弹道中段目标形状反演性能分析

上节的球体模型中反演中段目标的长度尺寸, 其宽度尺寸(直径)仍然未知。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轴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:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

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:

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

$\theta$ 为椭球体相对于雷达视线的姿态角。当  $\theta = 0^\circ$  时,  $\sigma_{min} = \pi a^4 / c^2$ ; 当  $\theta = 90^\circ$  时,  $\sigma_{max} = \pi c^2$ 。得到关系:  $\sigma_{max} / \sigma_{min} \propto (\rho)^4$ , 其中  $\rho$  是目标长轴短轴比。文献[7]即通过多次观测等效椭球目标, 提取观测的极大、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, 并不一定会出现目标 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。

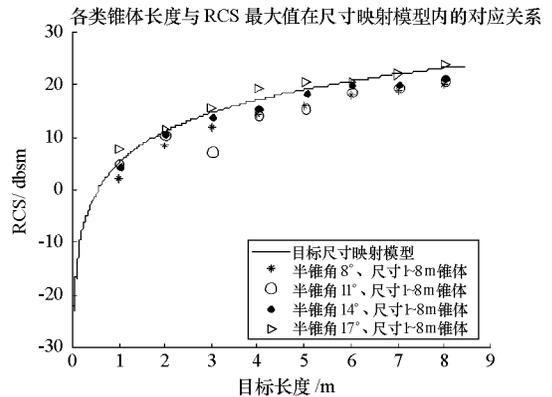


图3 各类锥体长度与 RCS 最大值在尺寸映射模型内的对应关系

Fig. 3 The corresponding relation between the length of cone and max value of RCS

#### 1.4 基于新的椭球体模型的弹道中段目标特性反演方法

对式(4)中姿态角  $\theta$  求导得到:

$$\begin{aligned} \sigma'_\theta &= \frac{-2\pi a^4 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^3} (a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)' \\ &= \frac{-2\pi a^4 c^2}{(a^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta)^3} (2a^2 \sin \theta \cos \theta - 2c^2 \cos \theta \sin \theta) \\ &= \frac{4\pi a^2 (\rho^2 - 1) \rho^2 \sin \theta \cos \theta}{(\sin^2 \theta + \rho^2 \cos^2 \theta)^3} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)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:

(1) 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  $1^\circ$ , 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  $\rho$ , 纵坐标为对应的 RCS 随姿态角的变化率。

(2) 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。

(3) 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 4(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 4(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  $4^\circ$ , 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 序列相对于雷达视线角的斜率表示为:

$$k(i) = \frac{\text{RCS}(m) - \text{RCS}(n)}{(m - n) \Delta\theta} \quad (6)$$

其中,  $m, n$  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<sup>[9-12]</sup>, 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。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  $75^\circ$  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。为进一步验证球体尺寸

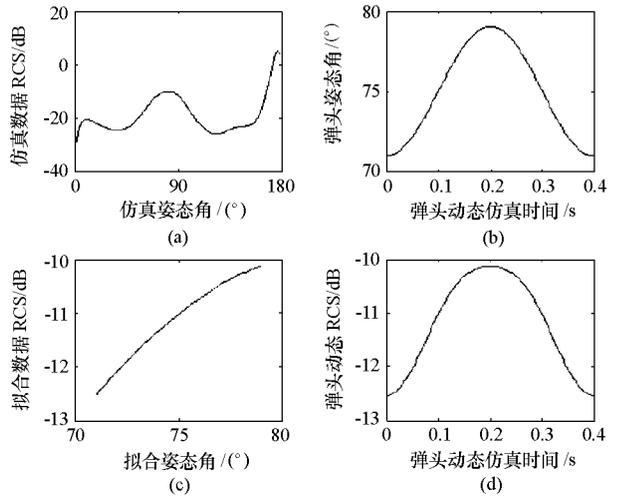


图 4 平滑弹道中段目标动态拟合数据  
Fig. 4 The dynamic RCS data of the midcourse missile

映射模型对不同类型弹头目标尺寸反演的有效性,进行对前述4种弹头类目标的尺寸反演仿真试验。依据目标静态全姿态角的 RCS 数据,拟和目标平均视角为  $75^\circ$ ,进动角度为  $10^\circ$ ,进动周期为  $2s$  的动态 RCS 数据序列,利用球体尺寸映射模型,反演的4类目标的长度如图5所示:

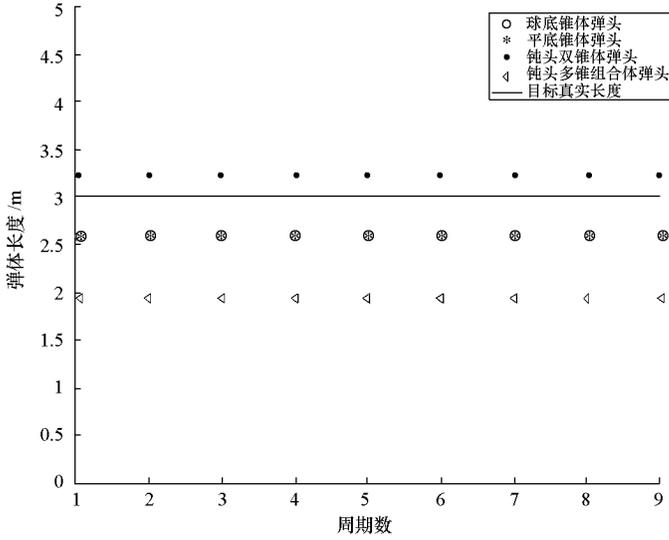


图5 球体尺寸映射模型反演4种目标长度结果

Fig. 5 The inverse results of target base on the spheroid model

对于不含噪声数据的反演,每段周期数据反演结果相同,利用球体尺寸映射模型对结构相对简单的弹头类目标,如平底锥体弹头、钝头双锥体弹头、球底锥体弹头具有较好的长度反演效果。对于含有噪声的数据,通过对不同周期内的长度反演结果取均值,得到目标的近似长度尺寸。下面是在不同的进动参数,不同的信噪比条件下利用球体尺寸映射模型对中段目标的长度的反演结果:

表1 基于椭球体模型的弹道中段目标几何特性反演结果

Tab. 1 The inverse results of the midcourse missile based on the ellipsoidal model

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

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  $8dB$  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  $\pm 0.85$ ; 信噪比大于  $8dB$  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。

## 2 试验结果

利用本文提出的球体-椭球体联合模型估计方法,对某弹头暗室数据进行动态拟合和目标特性参数反演。由本文方法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,本文方法能较好的估计弹道中段目标的二维几何特

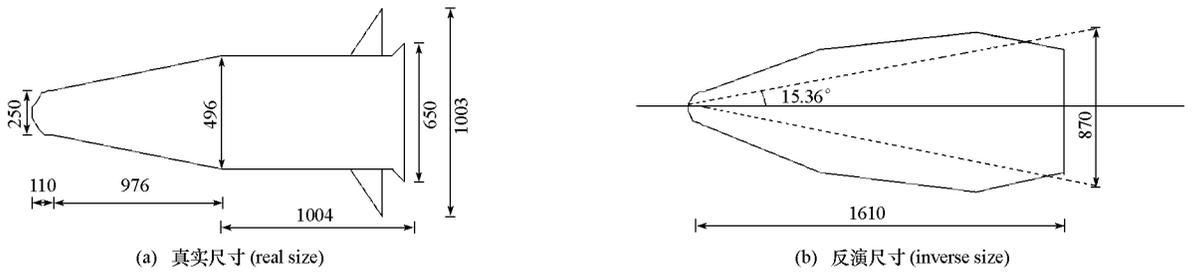


图6 某弹头模型的反演尺寸与真实尺寸比较

Fig. 6 The real size and inverse size of a warhead

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。

### 3 结束语

本文根据球体、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二维几何尺寸,对弹道中段目标的识别具有一定意义。但是在本文的分析中,没有考虑弹体覆盖材料对目标 RCS 的影响,当中段目标表面涂敷吸波材料时,雷达回波 RCS 不能利用本文计算公式简单等效,在此情况下,利用目标的 RCS 特征识别中段目标将面临极大挑战。

### 参考文献:

- [1] Sessler A M, 等. NMD 与反制 NMD[M]. 卢胜利, 等译. 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 Transaction 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]. Department of The Air Force Air University, 2006.
- [5] Lambour R, Rajan N, 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, 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.
- [8] 刘永祥. 导弹防御系统中的雷达目标综合识别研究[D]. 国防科技大学, 2004.
- [9] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 弹道中段雷达目标识别与对抗[J]. 航天电子对抗, 2004(5).
- [10] 金文彬, 刘永祥, 任双桥, 等. 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.
- [11] 陈行勇, 黎湘, 郭桂蓉, 等. 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.
- [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.