0254-6124/2010/30(3)-250–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yu Chunrui, Liang Diannong, Dong Zhen, Yu Anxi. Size estimation of space object based on narrowband radar. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(3): 250-254

基于窄带雷达 RCS 序列的空间目标尺寸估计

于春锐 梁甸农 董 臻 余安喜

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要 从窄带雷达横截面积 (RCS) 序列中提取目标尺寸特征对空间目标的分类识别具有重要价值. 本文在研究椭球体 RCS 序列特性的基础上, 提出了一种空间目标形状估计方法, 并进一步研究了空间目标尺寸估计问题, 提出了一种新的尺寸估计方法. 实测数据的验证表明, 该方法能有效估计卫星、碎片等空间目标的形状和二维尺寸.

关键词 雷达散射截面; 空间目标的形状与尺寸; 目标识别

中图法分类号 V 524, TN 959

Size Estimation of Space Object Based on Narrowband Radar

YU Chunrui LIANG Diannong DONG Zhen YU Anxi

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

Abstract Earth orbiting spacecrafts have become an integral part of our everyday lives. A real and growing concern for the safety and reliability of these satellites is the threat from collision with other orbiting objects including space debris. Size estimation of space object is an important task in evaluating its danger of a possible collision with operational spacecraft. RCS (Radar Cross Section) includes much information of space object, and extracting the feature of the object size from the RCS time series of narrowband radar is very helpful to radar target identification. Unfortunately, it is very difficult to get the information of target shape and size from its RCS. In this paper, based on the research of the characteristic of the ellipsoid's RCS, a shape estimation method of space object is proposed, and the problem of size estimation is studied further with a new method of size estimation proposed. The result using real radar data shows that this method is feasible to estimate the shape and two-dimensional sizes of the space object.

Key words Radar Cross Section (RCS), Shape and size of space object, Target recognition

2009-04-08 收到原稿, 2009-06-13 收到修定稿

E-mail: ycrzxc@163.com

1 引言

随着人类航天活动的增加, 空间碎片日益增多, 对卫星等航天器的安全造成极大威胁, 因此对于卫星和碎片等空间目标进行监视变得非常重要 [1]. 将雷达目标识别技术应用于空间目标识别具有重要意义和应用前景. 地基窄带雷达造价相对低廉, 目前仍然是一种主要的空间探测传感器, 应尽力挖掘窄带雷达目标识别的潜力. 研究发现, 尽管窄带雷达的距离分辨力一般远大于目标尺寸, 但可利用目标固有特性与反射信号随时间的变化规律之间的对应关系来推演有关目标的特征信息 [2].

目标的雷达横截面积 (Radar Cross Section, RCS) 反映了目标反射能量到雷达接收天线的能力, 通常将其表述为一个受到雷达波长和目标材料结构、形状、姿态等多种因素影响的复杂函数, 因此对 RCS 数据进行解译是非常困难的. 美国 NASA 开发了一种尺寸估计模型 (Size Estimation Model, SEM), 建立了 RCS 到目标物理尺寸的映射函数 [3], 可以粗略估计目标尺寸. 该方法的基本思想是将目标看做等效导体球体, 利用 SEM, 由测得的 RCS 求出等效球体的直径, 作为目标的特征尺寸. 文献 [4] 提出了将空间碎片等效为椭球体的思想, 利用多频段雷达建立目标尺寸估计模型, 基于 RCS 序列估计出等效椭球体的长轴和短轴, 实现了对空间碎片的尺寸估计. 文献 [5] 在此基础上进一步研究了对空间目标 (卫星) 尺寸的估计方法, 提出了一种用于划分目标长轴和短轴的门限确定方法. 但是以上方法都需要建立目标尺寸估计模型, 而模型的建立需要大量实测数据, 因此, 受到条件限制. 本文在研究椭球体 RCS 序列特性的基础上, 提出了一种基于 RCS 序列的方差估计空间目标形状的方法, 并进一步研究了空间目标尺寸估计问题, 提出了一种不需要建立目标尺寸估计模型的新的尺寸估计方法. 实测数据的验证表明, 该方法能有效估计卫星、碎片等空间目标的二维尺寸. 基于 RCS 时间序列估计空间目标尺寸, 具有重大的现实意义, 有助于空间目标的分类识别.

2 椭球体 RCS 特性

由于空间目标一般形态相对简单, 可以将其等效为椭球体, 文献 [5] 给出了空间目标等效椭球体模型的建立方法. 将空间目标等效为椭球体, 可以获得椭球体的长短轴二维信息, 与一维的直径尺寸相比, 包含了更丰富的信息, 对空间目标的分类和识别十分有利. 因此, 有必要对椭球体 RCS 序列的性质进行分析, 本节的 RCS 序列特指椭球体的 RCS 方向图, 即 RCS 随目标观测角或测量时间的变化曲线.

在光学区 (高频区), 椭球体模型的 RCS (定义符号 S_{RC}) 可以表示为 [6]

$$S_{\mathrm{RC}}=\frac{\pi a^2b^4}{(a^2\cos^2\theta+b^2\sin^2\theta)^2}. \tag{1}$$

其中, a 和 b 分别为椭圆长轴半径和短轴半径, θ 为从长轴顶端入射算起的视角. 以投影面积 πb^2 归一化的椭球体 RCS 可以表示为

$$N_{\mathrm{RCS}}=\frac{S_{\mathrm{RC}}}{\pi b^2}=\frac{a^2b^2}{(a^2\cos^2\theta+b^2\sin^2\theta)^2}. \tag{2}$$

通过分析可知, 当 $\theta=90^\circ$ 时, 椭球体 RCS 取得最大值

$$S_{\mathrm{RC,max}}=\pi a^2, \tag{3}$$

当 $\theta=0^\circ$ 时, 椭球体 RCS 取得最小值

$$S_{\mathrm{RC,min}}=\pi\Big(\frac{b}{a}\Big)^2b^2. \tag{4}$$

图 1 给出了轴比 (长轴与短轴的比值) 为 2:1, 5:1, 10:1 时椭球体归一化 RCS 随视角的变化曲线. 可见, 轴比越大, RCS 随视角的起伏也越大. 这种起伏反映了序列偏离均值的程度, 可以用标准差或方差来描述, 即目标的轴比越大, RCS 序列的标准差越大.

图 2 给出了椭球体 RCS 序列的标准差随轴比变化曲线, 可见椭球体 RCS 序列的标准差随轴比的增加而单调增加. 图 3 给出了轴比为 2:1 的椭球体 RCS 序列的标准差随空间目标短轴长度的变化曲线, 可见标准差不随短轴长度变化. 通过分析曲线变化可以看出, 椭球体 RCS 序列的标准差只与轴比有关, 而与短轴或长轴的大小无关, 是一个稳定的特征参数. 因此, 在已知椭球体 RCS 序列标准差的情况下, 可以直接通过图 2 得出对应的轴比.

3 形状估计方法

文献 [7] 给出了一种利用 RCS 序列极大值与极

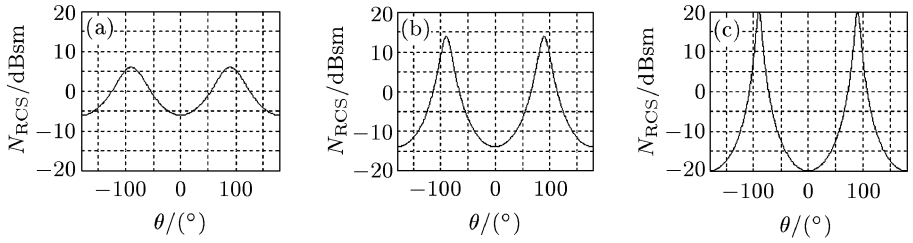


图 1 不同轴比情况下的椭球体归一化 RCS 方向图

Fig. 1 RCS of ellipsoid with aspect angle

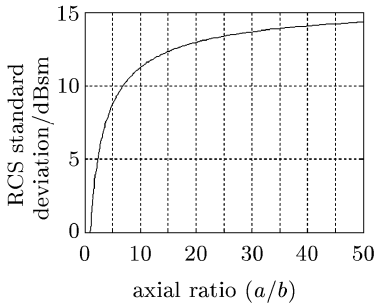


图 2 椭球体 RCS 序列的标准差随轴比变化的曲线

Fig. 2 Standard deviation of an ellipsoid with axial ratio

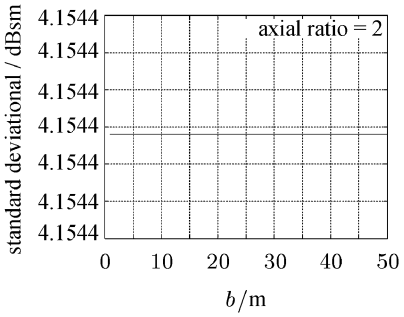


图 3 椭球体 RCS 序列的标准差随短轴长度变化的曲线

Fig. 3 Standard deviation of an ellipsoid with b-radius

小值之比估计空间目标长短轴比的方法. 但是, 在实际测量中, 由于测量环境的复杂多变, 目标 RCS 序列存在很大的随机性, 使用上述方法估计目标形状存在一定的不确定性, 并且此方法只能对自旋目标进行处理.

分析表明, 椭球体 RCS 序列的标准差只与目标的轴比有关, 与目标的实际大小无关. 设空间目标 RCS 序列为 $\{x_i|1 \leqslant i \leqslant N\}$, 则其均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i, \tag{5}$$

序列的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}. \tag{6}$$

对空间目标进行形状估计, 可以将目标等效为椭球体, 通过估计等效椭球体的轴比, 实现对目标的形状估计. 具体方法是将实测的 RCS 序列按照式 (6) 计算序列的标准差 σ, 然后从图 2 查找出对应的等效轴比.

实际测量的 RCS 序列数据, 由于受到多种因素的影响, 不可避免地会引入随机误差. 序列的标准差是比极值更加稳定的量, 根据标准差估计目标形状, 得出的结果更加稳健, 反映了目标的形状信息.

4 尺寸估计方法

基于椭球体模型进行尺寸估计, 一般都是将 RCS 序列映射为尺寸序列后, 设置一个门限将尺寸序列分为两部分, 一部分代表目标长轴, 另一部分代表目标短轴. 一种尺寸估计方法是将长轴对应的数据取平均估计长轴, 得出的尺寸称为均值尺寸; 另一种尺寸估计方法是将长轴对应的数据取中值估计长轴, 得出的尺寸称为中值尺寸. 本文分析表明, 在任何时刻椭球体 RCS 序列的取值范围为 $\left[\pi\left(\frac{b}{a}\right)^2 b^2, \pi a^2\right]$, 因此, 可以考虑直接对 RCS 序

会导致目标长轴过长或过短, 直接决定所求的目标长轴、短轴是否合理正确. 对尺寸序列设置门限已有很多研究 [4−5], 本文采用直接对 RCS 序列设置门限的方法. 图 4 为实际测量的三轴稳定卫星 1 的某段 RCS 序列, 图 5 给出了对应的 RCS 分布直方图及门限设置方法.

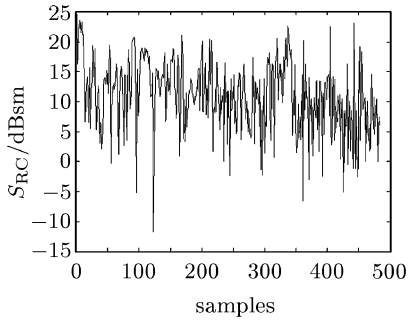


图 4 三轴稳定卫星 1 的某段 RCS 序列

Fig. 4 RCS time series of a satellite

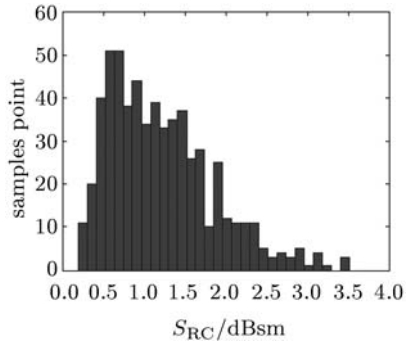


图 5 三轴稳定卫星 1 的 RCS 分布直方图及门限

Fig. 5 RCS histogram and the threshold

利用本文给出的目标形状估计方法, 估计出目标等效椭球体的轴比, 只需再估计出长轴长或者短轴长, 即可估计出等效椭球体的二维尺寸. 式 (3) 和式 (4) 表明, 椭球体 RCS 的最大值只与长轴有关, 而最小值与短轴长和轴比有关. 因此, 本文利用大于门限值的 RCS 序列估计目标长轴, 结合利用 RCS 序列估计出的轴比, 即可求出目标短轴. 具体步骤如下.

①计算 RCS 序列的标准差 σ, 估计出目标的等效轴比 a/b.

②计算 RCS 序列的均值 $\bar{x}$, 设置门限为 $\alpha = \bar{x} + \sigma$.

③提取出 RCS 序列中大于门限的值组成新的集合 $\boldsymbol{L} = \{x_i | x_i > \alpha\}$.

④计算 $\boldsymbol{L}$ 的均值或中值, 记作 $\bar{x}_L$.

⑤利用公式 (3) 求出目标长轴半径为 $\hat{a} = \sqrt{\bar{x}_L/\pi}$.

⑥利用第①步和第⑤步的结果, 估计目标的短轴半径 $\hat{b} = \hat{a}/(a/b)$.

5 实测数据处理结果

对某空间碎片的 6 组 RCS 数据进行处理, 按照文献 [5] 给出的方法估计了该目标的均值长轴和均值短轴, 并计算了相应的长轴与短轴的比值, 结果分别对应表 1 的第 2~4 列. 按照本文提出的形状估计方法, 可以估计出该目标的轴比 (见表 1 第 5 列). 通过对比可以看出, 使用本文提出的方法估计轴比的结果与文献 [5] 求出的结果非常接近, 并且可以适用于对非自旋目标的形状估计, 比文献 [7] 给出的方法适用性更广.

表 2 给出了对某三轴稳定卫星的 RCS 序列进行尺寸估计的结果. 在处理过程中, 将 10 组不同圈次的数据分别进行处理, 分别估计目标的均值尺寸和中值尺寸. 由于 RCS 序列本身是一个随机序列, 与很多因素有关, 采用同一目标不同 RCS 序列估算目标尺寸存在一定的偏差, 对上述 10 组数据的估计结果取平均作为对该目标的尺寸估计结果 (见表 2 最后一行). 从表 2 结果看出, 无论是均值长轴和短轴, 还是中值长轴和短轴, 都比较接近目标实际尺寸, 并且变化幅度较小. 这说明利用本文提出的方法估计空间目标的大致尺寸稳定性好, 提取出的尺寸特征可以用于目标分类和识别.

表 1 某空间碎片的形状估计结果

Table 1 Shape estimation result of a debris

数据段	均值长轴/m	均值短轴/m	长轴/短轴	本文估计轴比
1	4.7366	1.8376	2.5776	2.6867
2	3.8985	1.6515	2.3606	3.0945
3	4.5641	1.9634	2.3246	2.4422
4	3.5846	1.7730	2.0218	2.2419
5	6.9596	3.0593	2.2749	2.3409
6	8.3907	3.1370	2.6748	2.6758

表 2 某三轴稳定卫星的尺寸估计结果

Table 1 Size estimation result of a satellite

数据段	均值长轴/m	均值短轴/m	中值长轴/m	中值短轴/m
1	2.0609	0.9566	2.0517	0.9523
2	2.3997	1.1197	2.2366	1.0436
3	2.4215	1.0771	2.3094	1.0273
4	4.0292	1.6186	3.3012	1.3262
5	2.5566	1.1260	2.4718	1.0886
6	2.4779	0.9764	2.4383	0.9608
7	2.2785	0.9672	2.1992	0.9335
8	2.1959	0.9232	2.1386	0.8992
9	2.2871	1.0312	2.1667	0.9769
10	3.6526	1.5119	3.5489	1.4690
平均值	2.6360	1.1308	2.4862	1.0677

6 结论

利用空间目标的等效椭球模型, 根据对椭球体 RCS 方向图特性的分析, 提出了利用 RCS 序列的标准差估计空间目标轴比的方法, 并在此基础上, 提出了一种新的空间目标的尺寸估计方法. 该方法首先利用 RCS 序列的标准差估计空间目标的形状, 并进一步估计出目标等效椭球体的长轴尺寸, 从而得出目标的尺寸估计结果. 该方法无需建立目标尺寸估计模型, 可以适用于处于雷达高频区的各类空间目标的尺寸估计, 为空间目标分类识别提供重要的特征信息, 具有较强的实用性.

参考文献

[1] Ma Junguo, *et al*. Survey of radar space target recognition technology [J]. *Mod. Def. Tech.*, 2006, **34**(5):90-94. in Chinese (马君国, 等. 雷达空间目标识别技术综述 [J]. 现代防御技术, 2006, **34**(5):90-94)

[2] Dai Zhengjian, *et al*. Techniques of radar recognition for space targets. systems engineering and electronics [J]. 2000, **22**(3):19-22. in Chinese (戴征坚, 等. 空间目标的雷达识别技术 [J]. 系统工程与电子技术 [J]. 2000, **22**(3):19-22)

[3] National Aeronautics and Space Administration. Handbook For Limiting Orbital Debris [M]. Washington: NASA-HANDBOOK 8719.14. 2008

[4] Lambour R, *et al*. Assessment of orbital debris size estimation from radar cross-section measurements [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**:1013-1020

[5] Huang Xiaohong, Ma yun, Chen Zengping. Research on size of space object estimated from RCS [J]. *Signal Processd.*, 2005, **21**(6):639-641. in Chinese (黄小红, 马云, 陈曾平. 利用 RCS 序列估计空间目标尺寸的方法研究 [J]. 信号处理. 2005, **34**(6):639-641)

[6] Bassem R M. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab (2ed) [M]. Florida: Chapman & Hall/CRC, 2005

[7] Huang Xiaohong. Estimation of space object shapes from RCS time series [J]. 2005, **34**(4):44-46. in Chinese (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, **34**(4):44-46)