

· 信号/数据处理 ·

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1004-7859(2010)05-0059-04

## 基于 RCS 的空间目标识别技术

金胜<sup>1,2</sup>, 高梅国<sup>1</sup>, 王洋<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学雷达技术研究所, 北京 100081; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 讨论了利用目标雷达散射截面(RCS)进行空间目标识别的问题。阐明了 RCS 测量机理, 介绍了国内外在利用 RCS 测量信息进行空间目标姿态判别、尺寸估计及个体识别方面的研究进展, 并提出了 RCS 测量信息在空间目标识别领域的应用方向。

**关键词:** 雷达; 雷达散射截面; 空间目标; 目标识别; 测量

### Technology of Space Target Recognition Based on RCS

JIN Sheng<sup>1,2</sup>, GAO Mei-guo<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>

(1. Radar Research Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The application of radar cross section(RCS) measurement data in space target recognition is discussed in this paper. Mechanism of radar RCS measurement is clarified, and research advancement on attitude discrimination, dimension estimation and individual identification of space target based on RCS are introduced. Application direction of space target recognition using RCS information is proposed.

**Key words:** radar; RCS; space target; target recognition; measurement

## 0 引言

随着空间技术的不断发展, 空间目标监视技术已成为全球各航天大国争相发展和竞争的新兴技术领域。地基测量雷达作为空间目标监视系统的骨干目标探测与识别设备, 以其全天候、全天时、快反应、高可靠的突出技术优势在空间目标监视系统中的重要地位和作用日益显现。窄带测量雷达技术成熟、造价低, 易于研制, 在空间目标监视系统中得到广泛使用。将基于窄带电磁散射特性测量数据的雷达目标识别技术应用到空间目标识别具有重要的工程价值和广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)包含一定目标信息<sup>[4]</sup>, 是窄带雷达能够获取的关于目标电磁散射特性的主要物理量。RCS 数据所携带易于提取的表征目标特性的信息量有限, 但具备 RCS 测量的窄带雷达造价相对低廉, 易于研制。因此, 基于 RCS 的目标识别技术一直是空间目标识别研究和应用的方向之一, 并且最早应用于空间目标的识别。1958 年, 美国从 AN/FPS-16 雷达测量的前苏联 Sputnik II 卫星的回波信号中分析出卫星上带有角反射体<sup>[5]</sup>。此

后几十年间, 国外对基于 RCS 的空间目标识别技术进行了大量研究, 并取得了一定成果。美国林肯实验室利用多套雷达的多频 RCS 测量数据建立尺寸估计模型(Size Estimation Model, SEM), 获得了 RCS 与等效球直径(Equivalent Sphere Diameter, ESD)的映射函数, 据此估算空间碎片的尺寸<sup>[6]</sup>。日本的学者也利用 RCS 测量数据的起伏特征估计出了空间目标的形状和尺寸<sup>[7]</sup>。

我国在基于 RCS 的空间目标识别技术研究方面起步较晚, 但在实现对低轨非合作简单形体目标完成分类识别方面已处于先进水平<sup>[8]</sup>, 主要利用空间轨道运动力学和姿态动力学知识, 结合目标电磁散射特性分析的基本方法, 对接收的空间目标 RCS 时间序列进行预处理和特征提取, 从而进行识别。本文阐明了雷达 RCS 测量机理, 介绍了利用 RCS 实现不同层次的空间目标识别技术, 并给出了仿真结果, 最后展望了空间目标识别的发展方向。

## 1 RCS 测量

雷达与目标的几何关系如图 1 所示。设雷达发射信号为  $E_t(t)$

$$E_t(t) = E_0 \exp\{j\omega t\} \quad (1)$$

通信作者: 金胜 Email: jinsheng1101@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2010-02-04 修订日期: 2010-04-12

当目标姿态角为 $\theta$ (雷达瞄准线与目标主轴的夹角)时目标与雷达之间的距离 $R(t)$ 为

$$R(t) = R_0(t) + y \cos\theta - x \sin\theta \quad (2)$$

则雷达接收到的目标回波可表示为<sup>[9]</sup>

$$F(\omega, \theta) = \int_{-L}^L \int_{-L}^L f(x, y) \exp\{j\omega t - j4\pi R(t)/\lambda\} dx dy = \int_{-L}^L \int_{-L}^L f(x, y) \exp(j\omega t) \times \exp\{-j4\pi[R_0(t) + y \cos\theta - x \sin\theta]/\lambda\} dx dy \quad (3)$$

式中: $f(x, y)$ 为二维目标散射函数,代表了目标上对测量回波有贡献的多散射中心的散射强度在二维上的分布; $L$ 为目标尺寸的 $1/2$ ; $\lambda$ 为雷达波长;指数项的第1项是载频相位,雷达中频检波后可以消除; $R_0(t)$ 是 $t$ 时刻雷达到目标参考中心的距离,雷达普遍采用相对标定法进行RCS测量,该项可忽略。则雷达回波可表示为

$$F(\omega, \theta) = \int_{-L}^L \int_{-L}^L f(x, y) \times \exp\{-j4\pi \cdot (-x \sin\theta + y \cos\theta)/\lambda\} dx dy \quad (4)$$

式(4)表明,雷达能从2个方面获得空间目标的信息:(1)目标回波随姿态角的变化;(2)目标回波随雷达发射频率的变化。对于大部分窄带测量雷达来说,跟踪弧段内的测量可以获得RCS幅度随姿态角变化的时间序列,以此作为目标识别的原始数据。

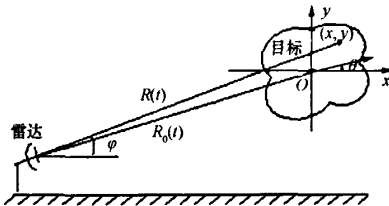


图1 雷达测量的几何关系

## 2 利用RCS的空间目标识别技术

基于RCS的雷达目标识别技术历经几十年的发展,虽然在空间目标识别方面的应用能力尚显欠缺,但在现阶段仍不失为一种比较实用有效的技术途径,在工程上可主要用以完成诸如目标姿态判别、旋转周期提取,以及初级的个体确认识别等任务。

### (1)空间目标的姿态判别

空间目标在空间轨道上运行,必须保持某种稳定的姿态,主要的姿态控制方式有三轴稳定和自旋稳定,而姿态失控的空间目标则会以“翻滚”姿态在轨道上

运动。空间目标的姿态运动会对雷达回波产生调制,表现为RCS时间序列起伏的随机性和各异性,从而为目标识别提供了重要的特征。文献[10]利用非参数统计学的随机游程检验理论对空间目标RCS序列进行分析处理,实现了对绕质心旋转和非旋转这2类目标的分类识别。文献[11]从低轨卫星的轨道和姿态特性出发,采用非参数检验法判别出目标是否为三轴稳定姿态。文献[12]利用方差分析提取RCS序列周期的方法提取了自旋卫星的自旋周期。对目标“翻滚”姿态的判别有助判断目标的工作状态,对于“翻滚”目标,可基本判定其已“失控”;而对自旋目标的判别和自旋周期的提取可用于自旋目标个体分类识别。因此,虽然目前仅能对目标运行姿态的判别给出有限的几个判决结果,但在工程上具有重要的实用价值。

根据RCS时间序列的变化规律可提取反映序列起伏随机性和周期性的统计性特征。

姿态稳定的目标,其轨道运动受控,RCS时间序列幅度起伏呈现一定的规律,即不表现为明显的随机性。因此,可采用非参数统计中的有关方法,如随机游程检验法来检验RCS序列变化的随机性。

自旋稳定(或翻滚)的目标相对于雷达视线总的姿态变化是目标沿轨道运行和目标绕自转轴(或翻滚轴)旋转两部分运动的合成,从而使RCS序列具有周期调制的特点,可采用自相关函数法或频谱分析法估计RCS变化的周期性和旋转周期。

图2给出了某空间目标的实测RCS时间序列图。通过对其进行随机游程检验,得到空间目标1不具有随机性,可初步判定此目标为旋转类目标。利用自相关函数法对其作进一步分析,其自相关函数图(图3)表现为明显的周期性,根据最高峰和次高峰的间距并结合RCS的采样时间间隔(20点/s),从而得到该空间目标的自旋周期约为12s。

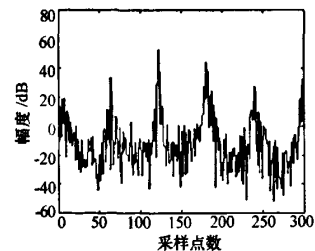


图2 某自旋空间目标RCS时间序列

如目标RCS时间序列既不表现出随机性,也不表现出周期性,则可认为具有非旋转稳定特征。三轴稳定是目前广泛采用的非旋转姿态稳定方式,三轴稳定

特征的判定需根据同一目标多圈次 RCS 序列之间的相似程度来判断,可采用多样本问题的非参数统计方法确认其姿态稳定特征。图 4、图 5 分别给出了某空间目标不同圈次实测 RCS 时间序列图。采用循环自相关法的检验结果表明,2 个圈次的 RCS 序列具有相似性,该空间目标判断为三轴稳定目标。

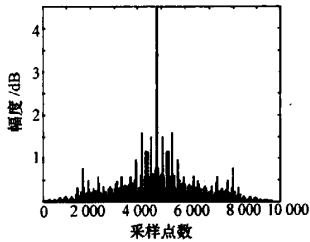


图 3 某自旋空间目标自相关特性图

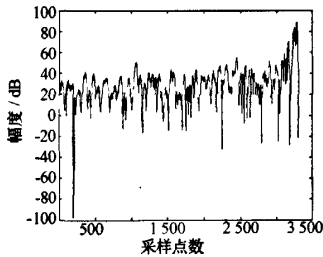


图 4 某三轴稳定空间目标 RCS 时间序列(1)

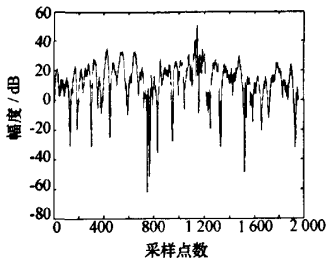


图 5 某三轴稳定空间目标 RCS 时间序列(2)

### (2) 空间目标的尺寸估计

基于 RCS 测量数据的目标尺寸估计是最早研究和应用于空间目标识别的技术之一,除国外学者取得的成果之外,国内的研究工作也取得了一定进展。文献[13]借鉴美国 ESD 的概念将空间目标尺寸等效表示为椭球体的长轴和短轴,并通过对 RCS 序列统计参数的分析提出了一种估计空间目标长轴和短轴的方法。但由于空间目标 RCS 对姿态角非常敏感,而且实际测量中不可避免地会引入测量误差,使得有效利用 RCS 进行目标尺寸估计非常困难。一种思路是通过在各姿态角位置的 RCS 测量,建立目标的 RCS 反射图<sup>[14-15]</sup>,据此估计目标的形状和尺寸<sup>[1]</sup>。但这种方

法受限于目标运行姿态,对目前最为常见的三轴稳定目标由于姿态角变化有限,不能获取较完备的目标 RCS 反射图,形状和尺寸的估计准确度和精度都不高,工程实用价值不大。总体而言,利用 RCS 测量数据估算空间目标尺寸的能力和运用都还存在相当的局限。

### (3) 空间目标的个体识别

空间目标个体识别的目的是确认被识别目标是否为目标数据库内的目标还是疑似新目标。理论上,基于轨道参数的识别是对空间目标进行个体确认最有效的方法,但对于一些特殊空间任务,如对变轨目标、失控目标的探测与识别,就有赖于轨道识别以外的其他手段了。空间目标因其动力特性的需求,结构相对简单,而且大多数空间目标姿态相对稳定,所以空间目标 RCS 多圈测量结果具有一定的稳定性,具体体现为其 RCS 序列具有相似性,可采用小波分析、分形分析等方法进行个体识别<sup>[16-17]</sup>。此外,工程上已经验证,对于三轴稳定的空间目标,其 RCS 测量序列的统计特性,如中位数、均值、方差等均是较稳定的识别特征量,对于不同平台的空间目标具有较好的分类识别率,但对于形体结构接近的目标,分类效果并不理想。

常用的统计量有描述目标 RCS 序列的平均位置与特定位置的均值、极大值、极小值、中位数等位置特征参数,和表示 RCS 序列在整个实数轴上分散程度的极差、标准差、标准均差、变异系数等散布特征参数<sup>[9]</sup>。

表 1 给出了利用实测 RCS 数据统计量特征对的空间目标识别结果。测试使用两部雷达测量获取的 7 个目标的 10 圈次数据;分类算法采用最近邻法,用不同于测试数据的实测数据进行训练。雷达 I 的作用距离比雷达 II 远。可见,当目标间形体区别较大时,基于 RCS 统计量特征的识别可获得较好的效果,对于空间目标而言,则可实现对不同平台卫星目标的初步分类和确认识别。当然,对于数以千计的空间目标而言,要实现完全的个体确认识别,还需综合利用多种测量信息和特征数据。

表 1 基于 RCS 统计量特征目标识别结果

测试目标	输出结果	训练样本数	备注
目标 A	目标 A	7	雷达 I
目标 B	目标 B	12	雷达 I
目标 C	目标 C	4	雷达 I
目标 D	目标 D	10	雷达 I
目标 E	目标 E	1	雷达 I
目标 A	未知目标	7	雷达 II
目标 B	目标 B	11	雷达 II
目标 F	未知目标	1	雷达 II
目标 G	未知目标	1	雷达 II
目标 B	目标 B	10	雷达 II

### 3 结束语

多年来国内外学者从多个方面开展了基于 RCS 的目标识别研究工作并取得了一定的成果,目标 RCS 在空间目标识别中的重要价值也得到了普遍认可。但是,对于空间目标监视系统而言,任何单一信息类型都难以圆满解决空间目标识别的系统问题,因此基于多传感器的信息融合识别是空间目标识别技术发展的必然方向。随着雷达系统工程技术、信息处理技术的飞速发展,RCS、高分辨距离像、ISAR 像、极化信息的测量精度和处理能力不断提高,为空间目标识别提供了更为丰富和精细的信息,基于 RCS 的目标识别技术与其他雷达目标识别技术相结合,有望在空间目标识别获得新的发展和突破。

### 参考文献

- [1] 戴征坚, 郁文贤, 胡卫东, 等. 空间目标的雷达识别技术[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 19-22.  
Dai Zhengjian, Yu Wenxian, Hu Weidong, et al. Techniques of radar recognition for space targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(3): 19-22.
- [2] 戴征坚, 郁文贤, 胡卫东, 等. 空间目标的雷达识别技术[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 19-22.  
Dai Zhengjian, Yu Wenxian, Hu Weidong, et al. Techniques of radar recognition for space targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(3): 19-22.
- [3] 黄培康. 反导系统中的目标识别技术[J]. 战略防御, 1981(5): 1-14.  
Huang Peikang. Target recognition technique in missile defend system[J]. Tactic Defense, 1981(5): 1-14.
- [4] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
Ruan Yingzheng. Radar cross section and stealth techniques [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [5] 许小剑, 黄培康. 防空雷达中的目标识别技术[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(5): 48-62.  
Xu Xiaojian, Huang Peikang. Target recognition by means of air-defense radars[J]. Systems Engineering and Electronics, 1996, 18(5): 48-62.
- [6] Lambour R, Morgan T, Rajan N. Orbital debris size estimation from radar cross section measurements[C]// Proceeding of the 2000 Space Control Conference. 2000, ADA377625.
- [7] Sato T. Shape of space debris as estimated from RCS variations[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1994, 31(4), 665-670.
- [8] 陈曾平, 黄小红, 倪友平. 雷达目标识别工程化技术进步[C]//全国第十届信号与信息处理、第四届 DSP 应用技术联合学术会议论文集, 2006: 6-8.  
Cheng Zengping, Huang Xiaohong, Ni Youping. Technology progress of radar recognition engineering [C]// Tenth National Signal and Information Process, Fourth Joint Conference on DSP Applications, 2006: 6-8.
- [9] 许小剑, 黄培康. 利用 RCS 幅度信息进行雷达目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 1992, 14(6): 1-9.  
Xu Xiaojian, Huang Peikang. Radar target recognition using RCS magnitude signatures [J]. Systems Engineering and Electronics, 1992, 14(6): 1-9.
- [10] 全备, 戴征坚, 胡卫东, 等. 两类空间目标的非参数姿态判别方法[J]. 中国空间科学技术, 2000(3): 1-4.  
Quan Bei, Dai Zhengjian, Hu Weidong, et al. The non-parameter method of recognizing two-types space target[J]. Chinese Space Science and Technology, 2000(3): 1-4.
- [11] 戴征坚. 一种基于窄带雷达特性的低轨卫星三轴稳定姿态判别法[J]. 航天电子对抗, 2001(4): 13-15.  
Dai Zhengjian. Discriminace of low orbit satellites 3-axes stabilization guise based on narrow-band radar[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2001(4): 13-15.
- [12] 黄小红, 姜卫东. 空间目标 RCS 序列周期性判定与提取[J]. 航天电子对抗, 2005(2): 29-30.  
Huang Xiaohong, Jiang Weidong. Determinant and extraction of serial periodicity for space targets RCS [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005(2): 29-30.
- [13] 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, 21(6): 639-641.  
Huang Xiaohong, Ma Yun, Chen Zengping. Research on size of space object estimated from RCS [J]. Signal Processing, 2005, 21(6): 639-641.
- [14] 白广周, 张洪祥. 基于雷达 RCS 测量的空间翻滚目标识别研究[J]. 飞行器测控学报, 1999, 18(1): 50-58.  
Bai Guangzhou, Zhang Hongxiang. A study on roll targets recognition based on RCS measurement [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 1999, 18(1): 50-58.
- [15] 金胜, 李玉书. 利用 RCS 信息的空间目标雷达识别[J]. 飞行器测控技术, 1998, 17(4): 43-51.  
Jin Sheng, Li Yushu. Space targets recognition for radar using RCS [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 1998, 17(4): 43-51.
- [16] 黄小红, 邱兆坤, 陈曾平. 空间目标 RCS 序列的分形分析[J]. 中国空间科学技术, 2005(1): 33-36.  
Hang Xiaohong, Qiu Zhaokun, Chen Zengping. The fractal feature of space object RCS [J]. Chinese Space Science and Technology, 2005(1): 33-36.
- [17] 卜正明, 李相迎, 黄顺东. 基于小波功率谱估计的空间目标 RCS 特性分析[J]. 现代雷达, 2004, 26(2): 47-49, 60.  
Bu Zhengming, Li Xiangying, Huang Shundong. Analysis of characteristics of space target RCS based on wavelet power spectrum estimation [J]. Modern Radar, 2004, 26(2): 47-49, 60.

金胜男, 1973年生, 在职博士生. 研究方向为雷达系统总体、雷达信号处理与目标识别。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

#### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>