

# 空间目标 RCS 序列的盒维数分析

肇 刚,曹占辉,李言俊

(西北工业大学航天学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**针对采用常规理论从空间目标 RCS 序列中提取有效特征非常困难的问题,在空间目标 RCS 序列的研究中引入非线性理论的盒维数法。分析影响空间目标 RCS 序列产生混沌的机理,运用盒维数理论研究空间目标 RCS 序列,基于计算得到的盒维数探讨空间目标 RCS 序列的混沌特性。实测数据计算结果表明,与旋转目标相比,三轴稳定目标 RCS 序列所含随机噪声成分较多,混沌成分较少,接近随机噪声。这与实际分析的情况相符合,证明了方法的有效性,为空间目标的识别与分类提供了一条新的途径。

**关键词:**空间目标;雷达散射截面序列;盒维数

**中图分类号:**V556.6 **文献标识码:**A

## The Box Dimension of RCS Series of Space Object

ZHAO Gang, CAO Zhan-hui, LI Yan-jun

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

**ABSTRACT:** To solve the problem that it is difficult to choose features from the Radar Cross Section (RCS) based on conventional theory, the box dimension of the nonlinear theory is introduced into the research of RCS of space object. The box dimension is used to analyze the RCS and research the chaotic features. The result shows that the RCS of the triaxial stabilization target has more random noise and less chaos than that of rotary object. So it is similar to random noise. The result is in line with the actual analysis and proves the effectiveness of the method. The method provides a new way for the recognition and classification of space objects.

**KEYWORDS:** Space object; Radar cross section series; Box dimension

### 1 引言

随着人类航天活动越来越频繁,日益增长的空间碎片对人类航天活动构成了严重的威胁,逐步恶化的空间环境使卫星的发射和监测面临越来越严峻的挑战<sup>[1]</sup>,因此,为了确保航天活动的安全可靠,保护本国太空安全,如何有效对空间目标(卫星、碎片等)进行监视、识别和编目对于维护国家安全和促进人类的航天活动都具有重要意义。

RCS 包含了目标丰富的信息,但是,由于实测数据较难获得和保密的原因,基于 RCS 的空间目标研究方面的文献较少,主要是国内的文献。文献[2,3]基于 RCS 序列用随机游程检验方法对姿态稳定类目标和旋转类目标进行识别,其结果与实际情况相符。戴征坚<sup>[4,5]</sup>从低轨卫星的轨道和姿态特性出发,在具体分析窄带雷达特性的基础上,将非参数检验法用于低轨卫星是否为三轴稳定姿态的判别中。马君国<sup>[6]</sup>提出了基于小波变换的低分辨率雷达空间目标识别算法。

该算法首先对空间目标的雷达回波信号进行离散小波变换,然后在时间-尺度平面上提取十个有效的统计特征,最后基于模糊分类来识别六类空间目标,结果表明,即使在较低的输入信噪比下,该算法对六类目标取得了比较好的识别效果。另外,他在另一篇论文<sup>[7]</sup>中,提出了基于高阶统计量的空间目标识别算法。以上文献都是基于常规理论进行分析的,然而,这些常规的理论手段面对复杂的实际工程问题,如弱信号检测、复杂目标信号、空间目标 RCS 序列的识别,有时显得束手无策。非线性理论是研究系统过程而非状态的科学,由于具有常规理论所不具备的一些特点,因此,人们期待非线性理论能够为难度很大的弱信号检测和识别开辟一条崭新的途径,同时也为空间目标 RCS 序列的研究提供新的理论手段。

非线性理论包括盒维数法、最大 Lyapunov 指数法、功率谱法、关联维数法等,由于盒维数法具有计算简单、实时性好等优点,本文拟采用盒维数法对空间目标 RCS 序列的混沌特性进行研究。

基金项目:国家自然科学基金(60575103);

高等学校博士点学科专项科研(20060699024)

收稿日期:2008-02-27 修回日期:2008-03-02

## 2 空间目标 RCS 序列产生混沌的机理

雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)<sup>[8]</sup>,是表征雷达目标对于照射电磁波散射能力的一个物理量,是雷达目标特性中最基本最重要的一个参数。

对于高频电磁散射问题,目标的 RCS 可近似被分解为  $N$  个离散散射体或散射中心的组合,在给定频率上总的 RCS 可表示为

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} \exp(j\phi_n) \right|^2 \quad (1)$$

式中,  $\sigma_n$  是第  $n$  个散射体的 RCS 值,  $\phi_n$  是该散射体的相对相位,取决于该散射体在空间的实际位置。上式中散射体数目是随观察而变化的,因为散射体之间的相互遮挡效应,可能会减少或增加某些有贡献的散射体。此外,单个散射体的幅度  $\sigma_n$  和相位  $\phi_n$  对观测角很敏感,并且还随雷达工作频率而变化,因此使总的 RCS 随观测角急剧起伏。

由于受空间轨道与姿态动力学等限制,空间目标一般形态相对简单。如卫星主要由卫星主体、太阳能帆板、天线和传感器等部件构成。在一定的观测条件下,对于像三轴稳定目标一类的空间目标,如果在跟踪期间(一小段时间内)雷达波束的指向可以认为基本不变,正常情况下其 RCS 观测值应该为一常数,但由于上述因素的影响,目标 RCS 观测值有一定起伏。对于自旋稳定卫星或翻滚目标等旋转类目标,其 RCS 序列将呈现周期性,尽管也有其它因素的影响,但这种周期性并不会被掩盖。本文采用实测数据,由于保密和篇幅的原因,本文只列出以下具有代表性的四组两种目标类型的 RCS 序列为研究对象,如图 1 所示。可以看出,旋转目标的 RCS 序列图明显具有周期性,而三轴稳定目标的 RCS 序列图周期性就不是特别明显。

在某些姿态下,目标姿态变化很小都可能导致目标 RCS 的较大起伏变化,对于实际的高频目标,目标姿态的微小变化可能引起 RCS 几十分贝的变化,即对初始条件变化具有高度敏感性,而混沌信号也具有对初始条件的敏感性。因此,空间目标 RCS 可能具有确定性混沌特性。

电磁波在空间传输过程,受到太阳辐射、地球磁场、大气、云雾和降水等因素的影响,使得 RCS 存在不确定性。在这些因素中,湍流已被证明存在混沌,还有一些到目前为止还没有发现的导致混沌产生的因素,这引起都可能导致 RCS 混沌现象的产生。

对于三轴稳定目标,在规定的观测时间范围内,由于其姿态基本不动,它所产生的混沌是在电磁波传输过程及处理过程中产生的。而对于旋转目标,由于自身的旋转,电磁波传输及在处理过程中都可能导致 RCS 的不确定。因此三轴稳定目标 RCS 序列含有混沌的成分比旋转目标要少一些。而混沌介于确定性和随机性之间,即混沌程度越小,越接近于确定性,反之,混沌越剧烈,越接近于随机性。即使经过降噪处理,任何 RCS 序列都要受到随机噪声的污染。对于含噪 RCS 序列来说,由于三轴稳定目标 RCS 序列的混沌成分较

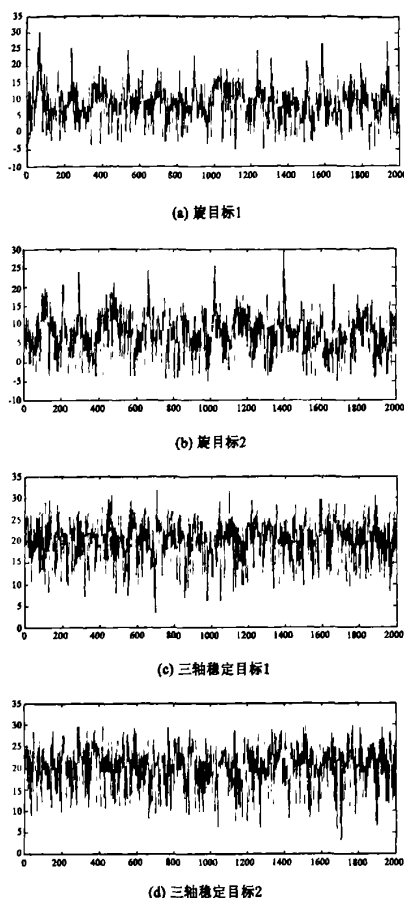


图 1 空间目标 RCS 序列图

少,相应地,其随机噪声的成分较多,则 RCS 序列越接近随机噪声。而旋转目标 RCS 序列的混沌成分较多,相应地,其随机噪声成分较少,则 RCS 序列越接近确定性序列。从信号的整体来分析,三轴稳定目标 RCS 序列的较复杂,旋转目标 RCS 序列复杂程度较低。

## 3 盒维数法

盒维数<sup>[9]</sup>的研究可追溯到 20 世纪 30 年代,又称为闵可夫斯基(Mindowski)维数、嫡维数、度量维数等。盒维数是一种被广泛应用的分形维数,在分形理论应用研究中提出的许多维数的概念都是盒维数的变形。由于盒维数是由相同形状集的覆盖确定的,计算起来比 Hausdorff 维数容易,易于进行程序化计算,得到了理论与应用工作者的广泛关注。盒维数及其变形<sup>[10,11,12]</sup>则由于易于进行程序化计算,在分形理论应用研究中得到了广泛的应用。

盒维数的定义比较直观,它不是从测度出发的。首先定义  $R^n$  中的  $\delta$  坐标网立方体,它是下面形式的集合:

$$[m_1\delta, (m_1+1)\delta] \times \cdots \times [m_n\delta, (m_n+1)\delta]$$

其中  $m_1, m_2, \dots, m_n$  都是整数,显然直线  $R$  上的网立方体

就是边长为  $\delta$  的区间,而  $R^2$  中的是边长为  $\delta$  的正方形。

设  $F$  是  $R^n$  中的一个非空有界集合,  $N_\delta(F)$  是直径最大为  $\delta$ , 可以覆盖  $F$  的集的最少数, 则  $F$  的下、上盒维数定义为:

$$\dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (2)$$

$$\overline{\dim}_B F = \overline{\lim}_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (3)$$

如果这两个值相等, 则称其共同的值为  $F$  的盒维数 (Box 维数), 记为  $\dim_B F$ , 即

$$\dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (4)$$

盒维数有一系列的等价定义, 上述是盒维数的原始定义, 由于该定义过于理论化, 在实际应用中不好理解, 下面给出盒维数的另一个定义:

设有集合  $A$ , 用一个网状栅格将其覆盖, 网格边长为  $s$ ,  $N(s)$  为网格中含有集合  $A$  任何一部分的网格数, 则盒维数为

$$D_0 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\log N(s)}{\log(1/s)} \quad (5)$$

从以上定义可以看出, 盒维数是在使用不同尺寸盒子时得到的分维数的近似值, 而分维数则是盒维数变量在盒子尺寸趋于 0 时的极限值。实际中盒子不可能无穷小, 但只要小到一定程度后, 其结果的差距非常微弱, 可以用盒维数来代替作为分析的对象。

维数的计算是一个基本而重要的问题。而盒维数的实质就是改变粗视化程度。在计算盒维数时, 一般先从小盒子开始, 依次减小盒子的尺度, 只计算那些“非空”盒子。在实际计算过程中,  $s$  不宜取得太大, 否则不能反映 RCS 序列的分形特征, 但  $s$  也有宜取得太小, 否则 RCS 序列中一切偶然的噪声都会表现出来, 影响计算结果。一般在特定的标度范围内才存在盒维数。本文基于定义求取盒维数, 采用最小二乘法拟合  $\log N(s) \sim \log(1/s)$  直线, 求出此直线的斜率即为盒维数  $D_0$ 。具体实现过程为:

1) 将空间目标 RCS 序列  $F$  的长度和幅度归一化到正方形区域, 得到归一化信号  $x(t)$ ;

2) 选取间距为  $s_i (i = 1, 2, \dots, M)$  的方格网, 每个网格称为盒子, 用盒子去覆盖正方形, 将有一定数目的盒子与信号  $F$  相交, 计算不同尺寸下  $s_i$  与  $F$  相交的盒子个数  $N(s_i)$ 。显然, 盒子尺寸越小, 每个盒子包含的信号数目越小, 盒子数目  $N(s_i)$  越大。当  $s_i \rightarrow 0$  时, 则盒子恰好包含  $F$  的一个点, 可认为此时盒子与点的形状完全符合, 正好填满  $F$ ;

3) 改变  $s_i$  的大小, 计算相应的  $\log N(s_i), \log(s_i)$ ;

4) 令  $x_i = \log(s_i), y_i = \log N(s_i), i = 1, 2, \dots, M$

利用  $(x_i, y_i)$  用最小二乘法拟合直线  $y = kx + b$ , 由于  $s_i$  越小,  $N(s_i)$  越大, 即  $s_i$  和  $N(s_i)$  呈反比关系,  $k < 0$ , 但盒维数都大于零, 因此  $-k$  即为盒维数  $D_0$ 。Mandelbrot 的有效维数概念也说明分形特征是有尺寸范围的。因此, 在实际处理盒维数时, 应该从对数比值趋于稳定, 对数比曲线趋于直线的范围内开始拟合。

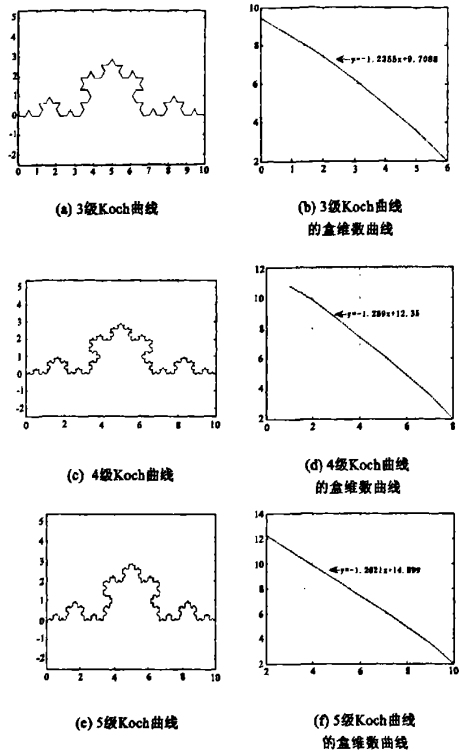


图 2 Koch 曲线及其盒维数曲线图

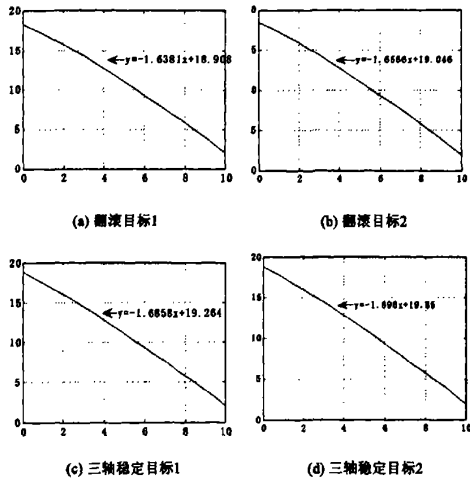


图 3 不同类别 RCS 序列的盒维数曲线图

#### 4 算例分析

Koch 曲线的理论分形维数为  $D_{Koch} = \ln 4 / \ln 3 = 1.2619$ , 而由于无穷级的 Koch 曲线是不可得的, 因此本文分别采用 3 级、4 级和 5 级 Koch 曲线, 如图 2 所示, 利用前述方法计算, 所得的盒维数结果如表 1 所示, 可以看出, 分维数的整数部

分代表其拓扑维数,小数部分代表分形体的复杂程度和其充满空间的能力。理论维数与实际维数有一定的误差,这是由于理论 Koch 曲线具有无限的细节,而实际的 Koch 曲线则仅有有限的细节造成的。随着级数的增加,实际维数越来越接近理论维数。同时这也说明了,盒维数的大小可以体现曲线的复杂程度,曲线越复杂,盒维数越大,反之亦然。另外,在拟合的过程中,也存在误差,因此 5 级 Koch 曲线出现了大于理论值的现象。

表 1 不同序列的盒维数

目标类别	Koch 曲线			旋转			三轴稳定目标 2
	3 级	4 级	5 级	目标 1	目标 2	定目标 1	
盒维数	1.2355	1.259	1.2621	1.6381	1.6556	1.6858	1.696

图 3 为空间目标 RCS 序列的盒维数曲线图。表 1 给出了相应的旋转目标和三轴稳定目标的盒维数。依据此表可以用盒维数对这两类目标进行分类。从表中可以看出,由于三轴稳定目标的 RCS 序列,没有周期性的趋势,比旋转目标的 RCS 序列要复杂、不规则的多,因此,三轴稳定目标的盒维数要比旋转目标的盒维数大。不过它们也不至于充满整个二维空间,所以空间目标 RCS 序列的盒维数要大于盒维数为 1 的直线,但小于盒维数为 2 的平面。

5 结论

目标 RCS 是所有特征测量雷达都可利用的信息,包含了丰富的目标信息。由于常规理论的局限性,本文将非线性理论引入到空间目标 RCS 序列的研究中,运用盒维数法分析了空间目标 RCS 序列的混沌特性。实测数据计算结果表明,所得结果与实际情况相符,验证了该方法的有效性,为空间目标的分类和识别提供了一种新的途径。

参考文献:

[1] 何远航,王萍. 空间碎片环境的研究与控制方法[J]. 中国航天,2003,(7):27-31.

[2] 牛威,杜凯,李少敏. 空间目标 RCS 动态测量及特性分析[J]. 飞行器测控学报,2005,24(5):44-48.

[3] 全备,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.

[4] 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.

[5] 戴征坚. 空间目标的雷达特性与识别[D]. 国防科技大学博士学位论文,2000.

[6] 马君国,等. 基于离散小波变换的低分辨雷达空间目标识别算法[J]. 信号处理,2006,22(1):70-72.

[7] 马君国,等. 基于高阶统计量的低分辨雷达空间目标识别算法[J]. 信号处理,2006,22(2):211-214.

[8] 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.

[9] B B Mandelbrot. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco:Freeman,1982.

[10] 李旭涛,曹汉强,越鸿燕. 分形布朗运动模型及其在地形分析中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):50-52.

[11] 梁东方,李玉梁. 测量分维的“数盒子”算法研究[J]. 中国图形图像学报(A 辑),2007,7(3):246-250.

[12] 李厚强,刘政凯,林峰. 基于分形理论的航空图像分类方法[J]. 遥感学报,2001,(5):34-38.

[作者简介]



肇 刚(1962-),男(汉族),辽宁沈阳人,博士研究生,高级工程师,研究领域:航天器导航、制导与控制;

曹占辉(1977-),男(汉族),河北枣强人,在读博士研究生,研究方向为图像和雷达信号处理;

李言俊(1944-),男(汉族),教授,博导,研究方向为先进控制理论。

(上接第 50 页)

[4] Tilt Rotor Research Aircraft Project Office Staff . A Mathematical Model For Real Time Flight Simulation of The Bell Model 301 Tilt - Rotor Research Aircraft[R] . NASA - CR - 114614 , 13 April 1973 .

[5] Joseph F Horn, Derek O Bridges, Charu Sharma, Leonard V Lopes, Kenneth S Brentner. A Multi - Disciplinary Rotorcraft Simulation Facility Composed of Commodity Components and Open Source Software [R] . American Helicopter Society 60th Annual Forum . June 2004 .

[6] B Cervin, C Mills, B C Wünsche . A 3D Interface for an Unmanned Aerial Vehicle[D] . Department of Computer Science,

The University of Auckland. 27 - Oct - 2004 .

[7] Jon S Berndt. JSBSim: An Open Source Flight Dynamics Model in C + + [M]. AIAA Paper 2004 - 4923 . 2004 .



[作者简介]

顾安平(1980-),男(汉族),江苏南京人,硕士生,主要研究方向为飞行器仿真;

徐锦法(1963-),男(汉族),浙江湖州人,博导,主要研究方向为直升机控制,仿真。

## 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/>