

文章编号:1002-0640(2005)08-0027-04

## 小波理论的单脉冲雷达目标 RCS 特性测量\*

陈大庆<sup>1</sup>, 韩九强<sup>2</sup>

(1. 太原卫星发射中心, 山西 太原 030027; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710047)

**摘要:**随着现代信号处理技术的发展, 对非平稳信号分析和处理的小波分析技术已成功应用于雷达目标特性分析领域, 大功率单脉冲雷达作为我国航天测控网当中的主干设备, 具有一定的目标特性识别能力。主要针对目前靶场的现有装备, 讨论了基于小波理论的单脉冲雷达空间目标 RCS 特性测量, 并对窄带低分辨率雷达在未来空间目标识别中发挥其作用谈了作者的看法。

**关键词:**雷达; 小波变换; 目标特性; 回波

**中图分类号:**TN958      **文献标识码:**A

## Measurement of Characteristics of Monopulse Radar Target RCS based on Wavelet Theory

CHEN Da-Qing<sup>1</sup>, HAN Jiu-Qiang<sup>2</sup>

(1. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, China

2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With the development of modern signal processing technology, the technology of wavelet analysis which is usually used to analyse and process non-stationary signal, is used successfully in the field of radar target characteristics analysis. Great power monopulse radar as an important device of aerospace measure network of China has certain recognition ability of target characteristics. In allusion to the equipment of shooting range at present, it is mostly discussed characteristics measurement of space target RCS by monopulse radar based on Wavelet theory, and it is given author's opinion which is about that narrowband low distinguish radar is used in the field of space target recognition in the future.

**Key words:** radar, wavelet transform, target characteristics, echo

### 引言

空间雷达目标识别在航天科技和战略目标识别中具有广阔的应用前景。雷达目标识别是现代雷达技术发展的一个重要组成部分, 起始于本世纪 50 年代的雷达目标识别技术, 由于其具有广泛的军用、民用前景, 因而在国内外已经形成热点。作为我国航天

试验靶场, 如何利用目前有限的外弹道测量资源对空间目标进行实时有效的识别, 已经成为摆在我们面前的一个课题。对弹道导弹的目标识别, 随着导弹突防能力的提高而变得越来越困难, 因为突防辅助系统包括燃尽的弹体或弹体碎片以及目标专用诱饵。目前对弹道导弹目标识别所面临的挑战是如何在众多的目标当中确定哪一个目标才是真正具有威胁而必须摧毁或使其无效的目标。

雷达目标识别中, 信息量决定处理方式, 而特定的频率和特定的目标姿态角信息量有限, 不足以实现目标识别, 为此可通过空间积累来取得目标随姿态角的变化信息, 也可通过宽带信号得到目标随频率变化的信息。窄带雷达信息量有限, 但它造价低廉, 目前仍然是我国航天测控网中主要的测量传感

收稿日期:2004-08-11      修回日期:2004-12-12

\* 基金项目: 军队重点研究课题

作者简介: 陈大庆(1964- ), 男, 山西太原人, 在读博士研究生, 主要从事雷达目标特性测量, 雷达系统建模与仿真。

器,因而应尽力挖掘窄带雷达目标识别的潜力。

## 1 雷达目标有效散射截面积(RCS)

雷达目标通常用雷达有效散射面积来表征,目标的有效散射面积有时也称为有效反射面积,常用字母  $\sigma$  来表示。所谓有效反射面积就是把目标看成一个假想的,垂直于天线波束方向的无损耗的各方向均匀的反射体,它在雷达处产生的功率密度和实际目标相同,这个假想的反射体的面积就是实际目标的有效散射面积  $\sigma$ 。其表达式为:

$$\sigma = \frac{w_2}{w_1} \times 4\pi R^2 \quad (1)$$

式中:  $w_2$  表示为目标散射所引起雷达站处的功率密度。

$w_1$  表示为雷达发射时,在目标处所形成的功率密度。

$R$  表示为雷达到目标的斜距。

从电磁场理论可知,功率密度与电场强度有如下关系:

$$w = \frac{E^2}{120\pi} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得目标的有效散射截面积为:

$$\sigma = 4\pi R^2 \left| \frac{E_2}{E_1} \right|^2 \quad (3)$$

从式(3)可以看出,目标的有效散射面积是用目标散射电磁波的能力来描述的,是目标对雷达入射能量进行散射能力的测量。其大小主要取决于目标的参数(如目标的形状、尺寸及表面电器性能)和雷达参数(如一次场的极化形式、波长等)以及目标的视角。作为窄带低分辨率的单脉冲跟踪雷达由于其波长远小于目标尺寸处于高频区。因此,充分利于空间轨道运动力学和姿态动力学知识,结合现代信号处理方法,对接收的空间目标 RCS 散射时间序列进行预处理和特征提取,可以对递归非合作目标完成分类、识别工作,包括:确定目标的稳定姿态;确定围绕目标自身质心旋转的角速度和目标横向尺寸;通过在重要的各姿态角位置 RCS 的测量,确定目标形状尺寸;完成雷达特征数据的统计分析,根据判别准则对雷达目标分类<sup>[10]</sup>。

## 2 小波分析理论

小波分析是一种信号联合时频分析方法,传统信号分析是建立在 Fourier 变换基础之上的。传统的 Fourier 变换将在时域上是无限延伸的三角函数作为正交基函数,因此 Fourier 分析只能获得信号

万方数据

的整体频谱,而不能描述信号的时频局域性质,这种性质是非平稳信号关键的性质。为了对非平稳信号进行分析,又发展了短时 Fourier 变换(SFFT),短时 Fourier 变换是将非平稳信号在短的时间窗内看作平稳信号,利用 Fourier 变换的性质对信号进行处理。短时 Fourier 变换可利用信号  $s(t)$  与基函数  $g_{mn} = g(t - mT) e^{j2\pi n F_t}$  的内积  $\langle s(t), g_{mn}(t) \rangle$  统一表示。

### 2.1 小波变换

连续小波变换实质上是将一维信号  $x(t)$  等距映射到二维尺度——时间  $(a, b)$  平面,其自由度明显增加,从而得到小波变换含有容余度。小波变换可以应用于在不同频率处包含非静态能量分布的时间序列分析<sup>[9]</sup>。假定有一时间序列  $x_n$ ,具有相同的时间采样间隔  $\delta_t, n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。同时假定存在小波函数  $\Psi(t)$ ,为了使它满足允许条件,小波函数必须

具有零均值,即  $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ 。此外还要求小波具有单位能量,即  $\|\Psi(t)\|^2 = \langle \Psi, \Psi \rangle^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt = 1$ 。通常小波变换是指正交或非正交小波,而小波基是指一系列正交的小波函数。正交小波变换适用于离散小波变换,而非正交小波变换既可以适用于离散小波变换也可以适用于连续小波变换,本文中的小波变换均指连续小波变换。平方可积函数  $x(t)$  的连续小波变换定义为:

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt = \langle x(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle \quad (4)$$

式中  $x(t)$  为信号,上标  $(*)$  表示复共轭,  $\Psi(\cdot)$  为按照尺度伸缩  $a$  和时间平移  $b$  变换的小波基函数。离散时间序列  $x_n$  的连续小波变换定义为  $x_n$  与经过尺度变换和平移变换的小波函数  $\Psi(t)$  的卷积:

$$WT_n(s) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \Psi^* \left[ \frac{(n-d)\delta t}{s} \right] \quad (5)$$

式(5)中  $(*)$  表示复共轭。通过小波尺度变化因子  $s$  和时间平移因子  $d$  即可构造出信号的特性幅度与尺度的变化图,同时可得到幅度随时间变化的特征图。小波相对于 Fourier 变换具有很大优势。它不仅能够得到目标散射的频率与能量分布特性,而且还可以看出这种分布随时间的变化情况。虽然窄带雷达的信息量有限,但其空间目标 RCS 序列中隐含有目标的几何特征、电磁散射特征和运动特征等。通过对空间目标的 RCS 小波变换分析,可以获得目标的运动特征。在工程实践中为了加快对离散时间序列信号的连续小波变换,需把信号变换到 Fourier 空

间<sup>[9]</sup>,因为为了得到信号的连续小波变换,对于每一个尺度  $s$ ,式(5)需进行  $N$  次卷积运算。当  $N$  值确定后,由卷积理论可知,在 Fourier 空间运用离散 Fourier 变换只需进行一次计算。

## 2.2 小波变换的模极大值边缘检测

雷达 RCS 及其起伏特征一直是低分辨率雷达目标识别可资利用的特征之一,它包括如均值、方差、极大值、极小值、极差等。通过抽取波形序列蕴含的目标特征信息,结合波形参数对目标进行识别。

小波变换的模极大值边缘检测法,其实质就是尺度边缘检测。多尺度边缘检测是在不同尺度上先对信号进行平滑,再由平滑后的信号的一阶和二阶导数检测出信号的剧变点(畸变点)。

设实函数  $\theta(x)$  满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x) dx = 1 \quad (6)$$

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \theta(x) = 0 \quad (7)$$

则称  $\theta(x)$  为光滑函数。设  $\theta(x)$  二阶可导,定义其一阶和二阶导数为

$$\Psi^I(x) = \frac{d}{dx} \theta(x), \quad \Psi^{II}(x) = \frac{d^2}{dx^2} \theta(x) \quad (8)$$

这时由式(6)可得

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^I(x) dx = 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^{II}(x) dx = 0 \quad (9)$$

条件式(9)表明,  $\Psi^I, \Psi^{II}$  就是小波。

引入记号

$$\xi_s(x) = \frac{1}{s} \xi(\frac{x}{s}) \quad (10)$$

$f(x)$  关于小波  $\Psi^I, \Psi^{II}$  在尺度  $s$  和位置  $x$  上的规范小波变换定义为

$$W_s^I f(x) = f^* \Psi_s^I, \quad W_s^{II} f(x) = f^* \Psi_s^{II} \quad (11)$$

而通常的积分小波变换定义为

$$(W_h f)(a, b) = \langle f, h_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (12)$$

其中  $h_{a,b} = |a|^{-1/2} h\left(\frac{t-b}{a}\right)$

由定义式(10)可以得到

$$W_s^I f(x) = \langle f, \Psi_s^I \rangle = f^* \left( s \frac{d\theta_s}{dx} \right)(x) = s \frac{d}{dx} (f^* \theta_s)(x) \quad (13)$$

$$W_s^{II} f(x) = f^* \left( s^2 \frac{d^2\theta_s}{dx^2} \right)(x) = s^2 \frac{d^2}{dx^2} (f^* \theta_s)(x) \quad (14)$$

由式(13)与式(14)可以看到,  $f(x)$  关于  $\Psi^I, \Psi^{II}$  的规范小波变换,变成了与光滑函数  $\theta_s$  的卷积关于  $s$  的一、二阶导数乘  $s$  与  $s^2$ 。这样,  $W_s^I f(x)$  的局部极值对应  $W_s^{II} f(x)$  的零交叉点和  $f^* \theta_s(x)$  的拐点,又由于  $\theta_s$  是光滑函数,所以  $W_s^I f(x)$  的局部极值即万方数据

对应于  $f(x)$  的奇异点。

当尺度  $s$  较大时,信号与  $\theta_s$  的卷积消去了信号中的较小的变化,可以检测出信号中较大的变化,这刚好是对小波分解中低频信号的检测。因此,对于不同大小的  $s$  值,可以得到不同尺度下的剧变点,这就是多尺度边缘检测,相当于小波分解后对不同频带的信号进行检测。

## 3 结束语

本文较为详尽地讨论了基于小波理论的单脉冲雷达目标 RCS 特性测量,由于雷达目标识别问题本身的复杂性,以及多干扰信号存在的复杂电磁环境,这一问题至今还没有满意的答案。在目前广泛研究的雷达目标识别中,目标特征提取作为一个最关键的步骤一直为人们所关注。目前,雷达目标识别工作中的特征提取主要侧重于高分辨体制雷达及其 ISAR 成像技术研究<sup>[8]</sup>。然而,基于宽带雷达目标识别的思想和方法很难用于低分辨率雷达的目标分类和识别。研究窄带雷达回波,充分利用目标窄带波形信息以及目标的空间坐标和运动信息和现代雷达强大的计算机资源,可对目标进行粗略分类,进而对雷达回波信号进行实时识别。

## 参考文献:

- [1] 王晓丹. 雷达目标识别技术综述[J]. 现代雷达, 2003(5):22-26.
- [2] Introduction to Radar Systems[M]. Third Edition, 1998.
- [3] Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems: Adynamical Systems Approach to Machine Intelligence [M]. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1992.
- [4] 黄敬雄, 谢维信, 等. 基于模糊神经网络的目标识别[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(1):72-77.
- [5] 何松华, 郭桂容, 郭修煌. 基于目标距离像的地面对检测与跟踪[J]. 国防科技大学学报, 1991, 13(1):51-53.
- [6] 张恂, 郭桂容, 庄钊文. 基于多分辨分析的雷达目标识别方法[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(2):59-63.
- [7] 张善文, 赵兴录, 等. 基于目标一维距离像的雷达目标识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(11):7-8.
- [8] 李人厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2002.
- [9] 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(2):47-55.

## 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/>