

# 基于 $\chi^2$ 分布的目标 RCS 起伏特性分析

曾勇虎, 王国玉, 陈永光, 汪连栋

(中国人民解放军 63880 部队, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 为分析和评估目标 RCS 起伏对雷达检测性能的影响, 常用一些统计模型来描述目标 RCS 的起伏。 $\chi^2$  分布模型属于第二代起伏模型, 可以包括 Swerling I ~ IV 模型及非起伏模型的情况。文中分析了某民航飞机的外场飞行动态 RCS 测量数据, 并应用电磁散射理论对其进行了解释, 可为该飞机 RCS 的设计和减缩提供参考; 此外, 还建立了该飞机在不同方位角范围内的起伏模型, 可应用于雷达目标仿真。

**关键词:** 雷达散射截面; 动态测量; 统计分析

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2007)02-0115-03

## The Analysis of Target's RCS Fluctuation Based on $\chi^2$ Distribution

ZENG Yong-hu, WANG Guo-yu, CHEN Yong-guang, WANG Lian-dong

(Unit 63880 PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** To analyze and evaluate the effect of target's RCS fluctuation on the performance of radar detection, a series of statistical models are introduced.  $\chi^2$  distribution model is one of the models of second generation, where the Swerling cases and the non-fluctuating case can be embedded. The measurement data collected from test range flight of a civil airplane is analyzed from the view of electromagnetic scattering theory, which is helpful for RCS design and reduction of the aircraft; and the RCS statistical characteristic is investigated based on  $\chi^2$  distribution, which can be used for radar target simulation.

**Key words:** radar cross section(RCS); dynamic measurement; statistical analysis

## 1 引言

雷达回波的起伏总是与雷达目标的 RCS 相联系。雷达目标由多个散射体组成, 而且相对于雷达视线的姿态角变化, 致使散射体矢量合成时, 各自的相对相位随机变化, 从而产生回波幅度起伏。此外, 雷达目标一般是非刚体, 时常有活动部件, 因此 RCS 起伏是随机的、不规律的<sup>[1]</sup>。为分析和评估目标 RCS 起伏对雷达检测性能的影响, 通常采用一些统计模型来描述目标 RCS 的起伏<sup>[1-6]</sup>。RCS 起伏模型大致经过了两个发展阶段, 第一阶段建立了非起伏模型和 Swerling I ~ IV 等 5 种经典模型; 第二阶段是  $\chi^2$  (Chi-square) 分布模型、对数正态(Log-normal) 分布模型和赖斯(Rice) 分布模型等, 被称为第二代模型。

$\chi^2$  分布模型可以包含 Swerling I ~ IV 模型和非起伏模型的情况, 且在数学上比对数正态分布和赖斯分布更易于处理。本文结合某民航飞机的动态 RCS 测量实验, 应用  $\chi^2$  分布模型对其统计分布特性进行拟合, 得到了拟合参数和拟合误差, 在此基础上总结了该目标的动态 RCS 规律。

## 2 RCS 的起伏模型

RCS 的随机变量  $\sigma$  的  $\chi^2$  分布概率密度函数为

$$p(\sigma) = \frac{1}{\Gamma(k)} \frac{k}{2} \left( \frac{k\sigma}{2} \right)^{k-1} \exp \left\{ -\frac{k\sigma}{2} \right\}, \sigma > 0 \quad (1)$$

式中,  $\Gamma(k)$  是伽马(gamma) 函数, 为  $\sigma$  的均值,  $k$  为双自由度数值(其值越大, 起伏越缓和),  $2k$  称为  $\chi^2$  分布的自由度数。

$\chi^2$  分布模型属于新一代 RCS 起伏统计模型,

它具有通用性,包含了传统的 Swerling I ~ IV 模型,可以描述更多的雷达目标类型。 $\chi^2$  分布的表达式也比较简洁,变参数只有一个,且双自由度  $k$  值可以不是正整数,因而拟合曲线的精度高。下面分别讨论这些情况<sup>[1,7]</sup>。

(1) 当  $k = 1$  时,式(1)化为

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp(-\frac{\sigma}{\sigma}), \sigma > 0 \quad (2)$$

式(2)称为 2 自由度  $\chi^2$  分布,即 Swerling I 分布。它表示由多个均匀独立散射体组合的目标。其起伏特性为慢起伏,一次扫描中脉冲间相关。典型目标有前向观察小型喷气飞机等。

(2) 当  $k = 2$  时,式(1)化为

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{(\sigma)^2} \exp(-\frac{2\sigma}{\sigma}), \sigma > 0 \quad (3)$$

式(3)称为 4 自由度  $\chi^2$  分布,即 Swerling III 分布。它表示由一个占支配地位的大随机散射体与其他均匀独立散射体组合的目标。其起伏特性为慢起伏,一次扫描中脉冲间相关。典型目标有螺旋桨推进飞机、直升机等。

(3) 当  $k = N$  时,式(1)化为

$$p(\sigma) = \frac{N}{(N-1)!} \left(\frac{N\sigma}{\sigma}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{N\sigma}{\sigma}\right), \sigma > 0 \quad (4)$$

式(4)称为 2N 自由度  $\chi^2$  分布,即 Swerling II 分布,  $N$  为一次扫描中脉冲积累数。它表示由多个均匀独立散射体组合的目标。其起伏特性为快起伏,一次扫描中脉冲间不相关。典型目标有喷气飞机、大型民用客机等。

(4) 当  $k = 2N$  时,式(1)化为

$$p(\sigma) = \frac{2N}{(2N-1)!} \left(\frac{2N\sigma}{\sigma}\right)^{2N-1} \exp\left(-\frac{2N\sigma}{\sigma}\right), \sigma > 0 \quad (5)$$

式(5)称为 4N 自由度  $\chi^2$  分布,即 Swerling IV 分布,  $N$  为一次扫描中脉冲积累数。它表示由一个占支配地位的大随机散射体与其他均匀独立散射体组合的目标。其起伏特性为快起伏,一次扫描中脉冲间不相关。典型目标有舰船、卫星、侧向观察的导弹与高速飞行体等。

(5) 当  $k = \infty$  时,  $\sigma$  变为常值,成为马克姆(Marcum)分布。它表示非起伏目标,其典型目标有标定球等。

对数正态分布的概率密度函数为<sup>[4]</sup>

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_d\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2s_d^2} \left[\ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)\right]^2\right\}, \sigma > 0 \quad (6)$$

式(6)中,  $\sigma_m$  为  $\sigma$  的中值,  $s_d$  为  $\ln(\sigma/\sigma_m)$  的标准差。

赖斯分布的概率密度函数为<sup>[4]</sup>

$$p(\sigma) = \frac{1+s}{\sigma} \exp\left[-s - \frac{\sigma}{2}(1+s)\right] \cdot I_0\left(2\sqrt{\frac{\sigma}{2}(1+s)}\right), \sigma > 0 \quad (7)$$

式(7)中,  $\sigma$  为  $\sigma$  的均值,  $s$  表示大散射体的截面积与小散射体的总截面积之比,  $I_0(\cdot)$  是零阶修正型贝塞尔函数。

上述几种模型中,  $\chi^2$  分布模型对飞机目标在许多情况下都是一个很好的近似。相对 Swerling 分布模型来说,其最大优点是双自由度  $k$  可以不是正整数,通常  $k = 0.9 \sim 2$ 。Swerling I、II 类目标可视为由大量统计独立的散射体组成,每一个散射体散射的能量只是总的后向散射能量的一小部分,合成散射截面积服从  $\chi^2$  分布,参量  $k = 1$ (实际上就是瑞利分布或指数分布)。Swerling III、IV 类目标可视为由一个反射较强的大散射体和许多独立的小散射体组成,合成散射截面积服从  $\chi^2$  分布,参量  $k = 2$ 。对这类目标来说,赖斯分布比  $k = 2$  的  $\chi^2$  分布更接近目标的统计特性,但赖斯分布在数学上更难处理。对数正态分布模型则表示由电大尺寸的不规则外形散射体组合的目标,如大的舰船、卫星、空间飞行器等目标。

### 3 动态 RCS 测量数据的统计分析

下面结合某民航飞机目标的动态 RCS 测量实验,应用  $\chi^2$  分布模型对其统计分布特性进行拟合。对于具体雷达目标,首先测量其飞行航迹及其 RCS 随姿态角变化的数据,然后根据飞行航迹计算相应的姿态角,画出目标 RCS 随姿态角变化的情况,最后对目标不同姿态角范围的 RCS 进行统计分析,应用  $\chi^2$  分布模型拟合其概率密度曲线。

图 1 为某民航飞机 S 波段垂直极化测量条件下的动态 RCS 测量值曲线。

根据测量数据可分别得到该飞机在方位角  $20^\circ \sim 60^\circ$ 、 $60^\circ \sim 120^\circ$  和  $120^\circ \sim 160^\circ$  范围内动态 RCS 的概率密度曲线,然后用  $\chi^2$  分布来拟合。拟合结果如图 2 所示。表 1 为拟合参数。

表 1 RCS 概率密度曲线的拟合参数

方位角范围/(°)	$k$	/m <sup>2</sup>	拟合误差/(%)
20~60	0.99	51.81	25.55
60~120	0.46	405.64	70.84
120~160	1.32	46.25	16.95

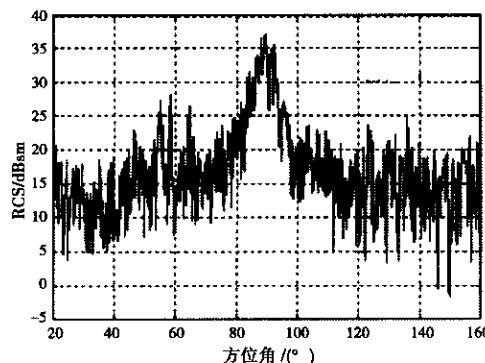
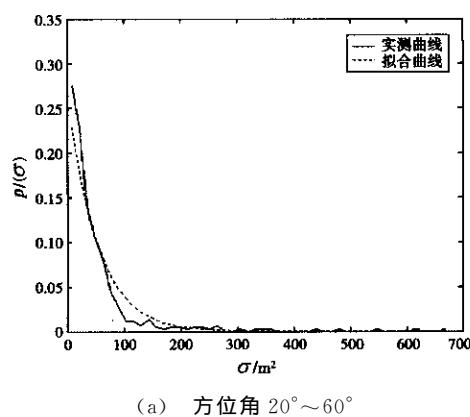
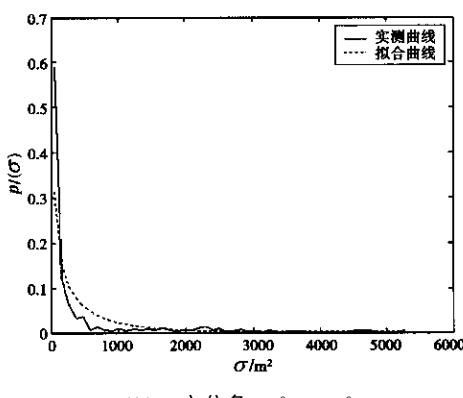


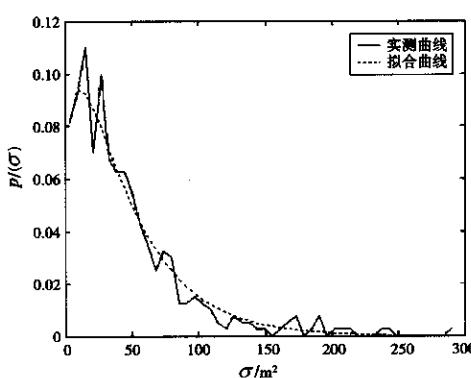
图 1 某民航飞机的 RCS 动态测量值曲线



(a) 方位角 20°~60°



(b) 方位角 60°~120°



(c) 方位角 120°~160°

图 2 RCS 概率密度函数的实测曲线和拟合曲线

对目标的动态 RCS 测量数据进行计算和分析,并结合图 1、图 2 和表 1,可知该飞机目标的动态 RCS 具有如下规律:

(1) 目标的动态 RCS 对姿态角敏感,随姿态角变化剧烈。从拟合结果来看,在大多数视向角下 $\chi^2$ 分布拟合的自由度较小,这说明其 RCS 起伏较大;

(2) 目标在正侧向(方位角 90°时)时,其 RCS 最大。在方位角 58°左右,RCS 曲线呈现突增,称为“突增线”,对应飞机后掠翼前缘法线方向;

(3) 目标 RCS 的动态范围较大,可达近 40 dB,并且其对数均值与线性均值通常不相等;

(4) 目标 RCS 在正侧向的起伏非常剧烈,此时 $\chi^2$ 分布拟合的自由度较小,拟合误差很大;前侧向和后侧向的起伏相对要小一些, $\chi^2$ 分布拟合的自由度比正侧向的略大,拟合误差略小;前侧向与后侧向相比,前侧向的起伏通常大于后侧向;

(5) 前侧向 $\chi^2$ 分布拟合的 k 值接近于 1,这说明此时目标的 RCS 统计分布接近于瑞利分布;在正侧向用 $\chi^2$ 分布来拟合时,拟合误差过大,这说明此时 $\chi^2$ 分布模型已不太适用,需要寻找更加准确的分布模型。

## 4 结束语

雷达目标 RCS 特性的理论研究和实际测量是相辅相成的:理论可预测和解释测量数据,测量数据能验证理论模型。对于飞机等复杂动态目标,外场飞行动态测量是获取飞行目标电磁散射特性数据的一个必要手段。本文分析研究了某民航飞机的外场飞行动态 RCS 测量数据,并应用电磁散射理论对其起伏特性进行了解释,可为该飞机 RCS 的设计和缩减提供参考;同时还建立了不同方位角范围的目标 RCS 起伏模型,可应用于雷达目标仿真。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄培康.雷达目标特征信号[M].北京:宇航出版社,1993.
- [3] 阮颖静.雷达截面与隐身技术[M].北京:国防工业出版社,1998.

## 5 结论

本文结合在高频区雷达目标等效为多散射中心的特点,在研究空间平滑中分别沿三个轴平滑之间关系的基础上,推导了直接利用目标频域测量数据的三维成像方法,提取了目标散射中心的三维位置信息,并与3D-MP谱估计算法进行了比较。实验结果验证了算法的正确性。与3D-MP方法相比,本文方法由于无需计算相关矩阵,计算量大大降低,故在三维散射中心位置估计及其他参数估计算法领域具有较高的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [2] Radoi E, Quinquis A, Demeter S. Enhancing the Resolution of the Radar Target Range Profiles Using a Class of Subspace Eigenanalysis-Based Techniques[J]. Digital Signal Processing, 2001, 11(4):288-303.
- [3] 姜文利, 唐白玉, 徐可斌, 等. 高频区雷达目标散射模型及其参数估计[J]. 电子学报, 1998, 26(3):70-74. Jiang Wenli, Tang Baiyu, Xu Kebin, et al. Modeling of High Frequency Inverse Scattering and Estimation of Parameters[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(3):70-74. (in Chinese)
- [4] Radoi E, Quinquis A, Totir F. Achieving Superresolution by Subspace Eigenanalysis in Multidimensional

(上接第117页)

- [4] 斯科尔尼克 M I. 雷达系统导论[M]. 林茂庸, 等译. 北京:国防工业出版社, 1992.
- [5] 林刚, 许家栋. 飞机 RCS 动态数据的统计模型研究[J]. 航空电子技术, 2002, 33(4):16-19. Lin Gang, Xu Jia-dong. Statistical Model Research of a Plane's RCS Dynamic Measurement Data[J]. Avionics Technology, 2002, 33(4):16-19. (in Chinese)
- [6] Currie N C. Radar Reflectivity Measurement Techniques and Applications[M]. Norwood, MA: Artech House, 1989:211-269.
- [7] Swerling P. Radar Probability of Detection for Some Additional Fluctuating Target Cases[J]. IEEE Trans on AES, 1997, 33(2):698-709.

Spaces[C]. Proc EUSIPCO 2002, Toulouse, France, 2002.

- [5] Quinquis A, Radoi E, Totir F. Some Radar Imagery Results Using Superresolution Techniques[J]. IEEE Trans on AP, 2004, 52(5):1230-1243.
- [6] Quinquis A, Radoi E. Advances in Subspace Eigenanalysis Based Algorithms: From 1D toward 3D Superresolution Techniques[C]. In Proc ICT 2001 Conference, Bucharest, 2001.
- [7] Rouquette S, Najim M. Estimation of Frequencies and Damping Factors by Two-Dimensional ESPRIT Type Method[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(1):237-245.
- [8] Aksasse B, Ansari M E, Berthoumieu Y, et al. High Resolution 3D Spectral Method Estimation [C]. <http://www.ensieta.fr/e3i2/intranet/Confs/Eusipco02/articles/paper248>.

## 作者简介:



温晓杨 男, 1981年10月生于河南登封, 2004年毕业于湖南长沙中南大学物理学院, 同年入国防科技大学学习, 现为国防科技大学电子科学与工程学院硕士研究生, 主要研究方向为雷达目标特征信号处理、动态雷达目标特性等。

石志广 男, 国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 研究兴趣为雷达目标特征信号处理、雷达杂波建模与仿真等。

## 作者简介:



曾勇虎 男, 1972年12月出生于江西龙南, 博士后, 2004年于国防科技大学获工学博士学位, 主要研究方向为综合电子战技术和雷达极化信息处理。

王国玉 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 1999年于国防科技大学获工学博士学位, 主要研究方向为电子信息对抗系统及其评估、综合信息感知与处理。

陈永光 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 1995年于国防科技大学获工学博士学位, 主要研究方向为电子信息系统试验与仿真技术、定位理论与技术。

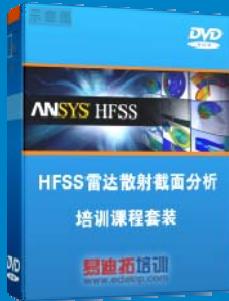
## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>