

飞机 RCS 动态数据的统计模型研究

林 刚, 许家栋

(西北工业大学电子工程系, 陕西 西安 710072)

[摘 要] 动态测量是获取飞机电磁散射特性的一个必要手段, 由于飞机飞行时姿态变化及背景等因素的影响, RCS 动态测量数据呈现出剧烈的起伏, 本文首先分析了离散数据统计建模与参数获取的方法, 然后就某型号目标的 RCS 数据, 应用理论模型对其进行拟合, 得到其典型视向 RCS 的近似分布规律。

[关键词] 雷达截面; 动态测量数据; 统计分析

[中图分类号] TN957.51 [文献标识码] A [文章编号] 1006-14X(2002)04-0016-04

目标的雷达散射截面 (RCS) 是雷达探测技术和隐身技术中的一个基本特征, 反映了目标基本的散射现象。动态测量数据的起伏很剧烈, 为了方便使用, 需要对原始数据进行处理和简化, 给出所选数据段的各种统计参数, 但要完整的描述动态测量数据的统计特征, 还需求取其概率密度曲线和累积概率曲线, 并把它与理论模型进行拟合与比较, 求出拟合误差, 建立较精确的统计模型^{[1][2]}。此模型的建立涉及到雷达目标探测、目标识别等多项关键技术的研究。对于全尺寸真实目标在实际环境背景中运动时获取的动态测量数据, 目前还没有人对其统计模型进行分析, 本文就某飞机的 RCS 数据, 应用理论模型对其进行拟合, 得到其典型视向 RCS 的近似分布规律。

1 测量数据的统计参数

对于测量所得的 RCS 离散数据 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\}$, 其主要的经典统计参数定义如下:

$$\text{极大值: } \sigma_{\max} = \max\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\} \quad (1)$$

$$\text{极小值: } \sigma_{\min} = \min\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\} \quad (2)$$

分位值: 设随机变量 X 的累积概率函数为 $F(x)$, 概率密度函数为 $p(x)$, 对任意 α ($0 < \alpha < 1$), 假如 X_α 满足下述条件

$$F(X_\alpha) = \int_{-\infty}^{X_\alpha} p(x) dx = \alpha \quad (3)$$

则称 X_α 为 X 的 α 分位数。在分位数中, 最重要的一个是中位数, 这是因为, 中位数 (中值) 和均值一样都是随机变量的位置特征数, 一个随机变量的均值可以不存在, 而它的中值总是存在, 所以在雷达系统分析中, 雷达截面中值的应用频率甚至比均值还要大。

中值的定义为:

$$F(x_{0.5}) = \int_{-\infty}^{x_{0.5}} p(x) dx = 0.5 \quad (4)$$

即中值为累积概率函数 (CDF) 为 0.5 时的雷达截面值 $\sigma_{0.5}$, 比 $\sigma_{0.5}$ 高或低的数据出现概率各占一半, 在计算 CDF 的同时, 也就计算了中值及其它分位值。

$$\text{均值: } \bar{\sigma} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \right) \quad (5)$$

$$\text{标准差: } STD = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

在统计 RCS 测量结果时, 还需给出其概率密度分布 (PDF) 和累积概率分布 (CDF), 离散数据统计模型建立的基础就是研究其 PDF 和 CDF 的规律。概率密度函数 $p(\sigma)$ 在数学上描述了目标截面积的数值 σ 在 σ_1 和 σ_2 之间的概率, 其定义为:

$$\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_2 \text{ 的概率} = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} p(\sigma) d\sigma \quad (7)$$

累积概率函数定义为雷达散射截面低于或等

于某个 σ 值的概率, 它是由概率密度函数曲线积分而得。令上式中的 $\sigma_1 = -\infty$, $\sigma_2 = \sigma$, 便可得到低于 σ 的数据出现的概率:

$$CDF(\sigma) = \int_{-\infty}^{\sigma} P(\sigma) d\sigma \quad (8)$$

它是从 $-\infty$ 到 σ 区间上 PDF 曲线下的面积, PDF 曲线下面的总面积为 1。在实际计算 RCS 的 PDF 和 CDF 时需对上面两个公式进行离散化处理^[3]。

设在某视向角内出现的 RCS 最大值与最小值分别为 σ_{\max} 和 σ_{\min} , 将 $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 等分为 N 个值段, 值段长度: $\Delta = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / N$ 。

在第 n 个值段中, ($1 \leq n \leq N$) RCS 数据出现的次数记为 I_n 。根据基本定义有:

$$\int_{(n-0.5)\Delta}^{(n+0.5)\Delta} P(\sigma) = P(n\Delta)\Delta = I_n / J_N$$

= 第 n 段中出现的次数/数据总数 (9)

$$\text{式中, } J_N = \sum_{i=1}^N I_i$$

因此离散数据条件下的概率密度函数和累积概率函数为:

$$PDF(n\Delta) = P(n\Delta) = I_n / (\Delta \cdot J_N) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} CDF(n\Delta) &= \sum_{i=1}^n p(n\Delta)\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{\Delta \cdot J_N} \Delta \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{J_N} \end{aligned} \quad (11)$$

2 目标 RCS 动态测量数据的统计分析

测量雷达为 S、X 双频段脉冲雷达, S 波段水平极化, X 波段垂直极化, 重复频率为 1250Hz。图 1 为某飞机 S 波段 RCS 动态测量曲线, 由图 1 可以看出, 数据表现出剧烈的起伏, 这样在分析导致数据起伏的目标结构特点时, 有必要分析数据的统计特征, 图 2 和图 3 为某飞机的 S、X 波段 RCS 测量数据统计特征值分布。在这里未考虑飞机飞行姿态, 如果考虑飞机姿态, 会发现在俯冲、拉起飞行时飞机头尾视向的 RCS 能量相对集中, 反射强度增大, 其数值约为: S 波段均值增大 1-3dB, 中值约 1-4dB, X 波段均值约 1dB, 中值约 0.5dB。

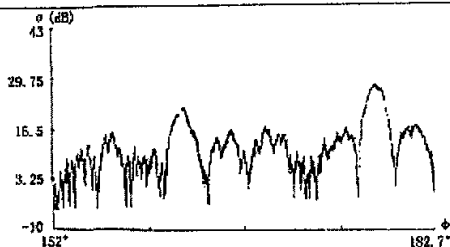


图 1 某飞机 RCS 动态测量时间历程曲线

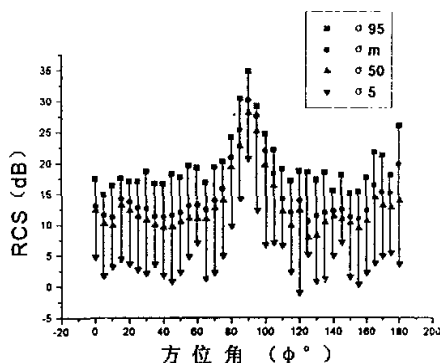


图 2 S 波段 RCS 统计分布

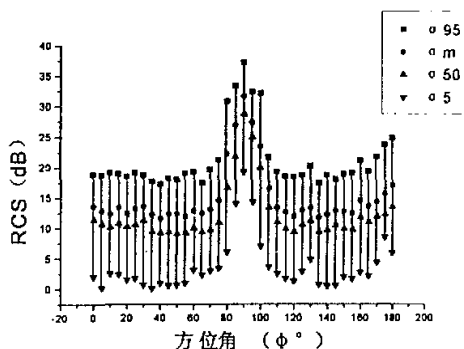


图 3 X 波段 RCS 统计分布

下面研究某飞机 RCS 动态测量数据的统计模型。该飞机具有直线型结构, 机身表面不连续点较多等结构特征。在此, 根据目标的结构特点, 选用 χ^2 曲线为标准的分布曲线进行拟合^[4], PDF 理论计算公式为:

$$p(\sigma, \bar{\sigma}) = \frac{1}{\Gamma(K)} \frac{K}{\bar{\sigma}} \left(\frac{K\sigma}{\bar{\sigma}} \right)^{K-1} \exp\left(-\frac{K\sigma}{\bar{\sigma}}\right) \quad (12)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为 σ 的均值, $K = \bar{\sigma}^2 / (\sigma \text{ 的方差})$ 为半

自由度, 自由度 $n=2K$ 。

对飞机机头视向 S、X 波段的 RCS 拟合曲线如图 4 和图 5 所示, ■ 为实测数据。

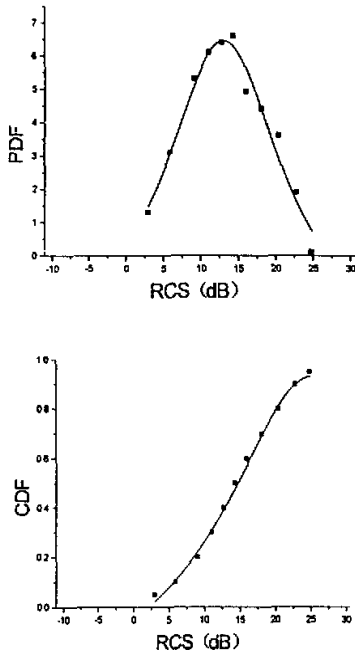


图 4 S 波段 RCS 数据的拟合比较
定义百分比拟合误差^[5]为:

$$e_f = \frac{\sum_{i=1}^N |p_i - \hat{p}_i|}{\sum_{i=1}^N p_i} \times 100\% = \sum_{i=1}^N |p_i - \hat{p}_i| \times 100\% \quad (13)$$

式中, p_i 为原始数据的统计概率; \hat{p}_i 为统计模型拟合概率; N 为区间分段个数, 且

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1$$

参与拟合的数据区间为 $[\sigma_{10}, \sigma_{90}]$, χ^2 分布曲线的自由度理论上为

$$n = 2\sigma^2 / (\sigma \text{ 的方差}) \quad (14)$$

通过计算, 对某飞机有如表 1 所示的拟合误差。

如前述, χ^2 型分布适用的目标为大型的、起主导作用的散射体加上大量较小的随机散射体, 由于飞行时飞机姿态角的改变使得强散射源不断发生变化, 其主要的散射机理也随之改变, 同时背景环

境也存在着一定的影响, 所以对于飞机这样复杂目标的动态 RCS, 很难用简单的分布曲线拟合出精确的结果, 即使同一视向角下的不同 RCS 数据段与标准曲线的拟合程度也不一样。由表 1 可以看出, 各视向的拟合误差都较大, 为了减小拟合误差, 对于 χ^2 分布曲线的自由度, 在必要时需要做人工调整。机尾视向由于起主导作用的散射源不很明显, 特别是对于 S 波段, 其拟合误差更大, 所以应对理论曲线进行修正。

表 1 某飞机典型视向 RCS 分布
的 χ^2 曲线拟合误差

| 典型视向 | 机头 | 机身 | 机尾 |
|------|-------|------|-------|
| S 波段 | 19.8% | 7.6% | 32.6% |
| X 波段 | 9.3% | 6.4% | 15.1% |

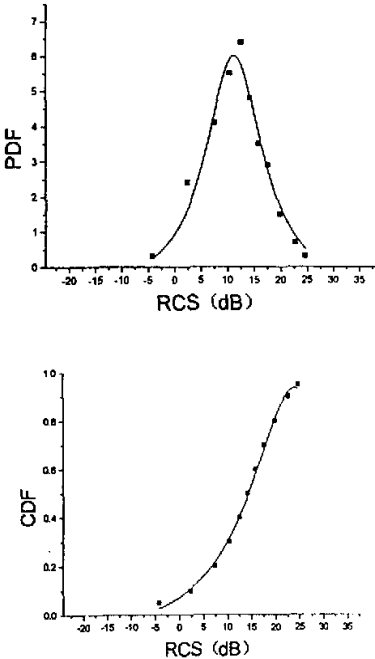


图 5 X 波段 RCS 数据的拟合比较

3 结束语

通过计算发现, 对于所研究的某飞机来说, 在大多数视向角下, χ^2 分布曲线的自由度都较小,

甚至于趋向瑞利分布,但在接近于机身视向时,截面积的分布却与瑞利分布差别较大,单就自由度来说,S 波段比 X 波段稍大一些。需说明的是,本课题在获取数据时由于飞机姿态角难以精确控制,

认为 RCS 数据只是方位角的函数,使得数据的离散程度加大,数据的标准差偏大,这些因素对统计模型的误差带来了一定的影响。

参 考 文 献

- [1] N. C. Currie. Radar reflectivity measurement techniques and applications [M]. Artech House, Norwood. MA 02062, 1989: 211-269.
- [2] Xu Xiaojian, Huang Peikang. A new RCS statistical model of radar targets [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(2): 710-714.
- [3] E.F.Knott 等著. 阮颖铮, 陈海等译. 雷达散射截面—预估、减缩和测量[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988.11: 376-379.
- [4] Peter Swerling. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1997,33(2): 698-709.
- [5] 黄培康主编. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993: 51-80.

Statistical Model Research of a Plane's RCS Dynamic Measurement Data

LIN Gang, XU Jia-dong

(Department of Electronics Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Dynamic measurement is necessary for getting a plane's scattering characteristics, for reasons of change of plane's the gesture in flight at all time and background effect, etc, the radar cross section (RCS) measurement data appear as an quick fluctuating. In this paper, the method of obtainable parameter and disperse data statistical modeling are analyzed first, then the theory model is fitted to the RCS data of a type of the target from which is obtained the approximate distributed rule of the typical and apparent RCS. At last, the data fitting error is calculated and analyzed.

Key words: radar cross section; dynamic measurement data; statistical analysis

(收稿日期: 2002-03-25)

(修回日期: 2002-05-16)

(上接第 3 页)

WANG Li-zhong, FEI Yuan-chun

(Department of Physics and Electronics Engineering, Central Nationalities University, Beijing 100081)

Abstract: This paper introduces the theory of the phase-locked loop (PLL) and the direct digital synthesis (DDS), a method to improve the precision of DDS and reduce its phase truncation error is also given.

Key words: phase-locked loop; direct digital synthesis; phase truncation error

(收稿日期: 2002-05-28)

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(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/>