

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1701345

X波段 RCS 跟踪测量系统不确定度分析

沈鹏 宋广 周钰鑫

(中国人民解放军 91404 部队 秦皇岛 066001)

摘要:为更好地评估外场动态 X 波段 RCS 跟踪测量系统的性能及其 RCS 测量数据的质量,在不确定度分析与 RCS 测量原理的基础上,对 RCS 测量过程中来自于雷达系统、环境因素、标校系统 3 个方面的不确定度影响因素进行了全面分析,研究确立了系统不确定源,并结合具体的测量条件给出了系统的不确定度,从而可以全面地掌握该测量数据的质量和精度,为更好地描述该测量系统的测量结果提供了支撑。同时所提出具体的不确定度分析方法可结合其他测量条件同样展开,具有广泛的通用性和适用性。

关键词:雷达散射截面测量;测量系统;不确定度

中图分类号: TN095 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

The uncertainty analysis of X-frequency band tracking and RCS measurement system

Shen Peng Song Guang Zhou Yuxin

(Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: To better assess field X-frequency band RCS dynamic tracking performance of measuring system and the quality of the RCS measurement data, based on the uncertainty analysis and principle of RCS measurement, in this article, the uncertainty influencing factors in the process of RCS measurement from the radar system, environmental factors, calibration system are analyzed, researched and established the system uncertainty source, and combined with the specific measuring conditions, the uncertainty of system is given, so can fully grasp the quality and accuracy of the measurement data, provides support for describing the results of the measuring system preferably. At the same time, the uncertainty analysis method in paper can be combined with other measurement conditions, has extensive universality and applicability.

Keywords: radar cross section (RCS) measurement; measurement system; uncertainty

0 引言

雷达散射截面(radar cross section, RCS)是目标对电磁波散射能力的表征和其基础物理特性之一,对军事目标的隐身、作战和侦察等方面有着极其重要的作用^[1-5]。而测量不确定度是测量结果置信度的描述,能准确地反应测量结果的质量,并从 20 世纪 90 年代开始,逐渐成为广泛应用的测量数据评定标准^[2,6]。靶场在进行外场海面目标 RCS 动态测量时,除需要获得目标 RCS 的实际测量值外,还需要结合实际的动态测量条件、系统测量参数和测量环境等对该测量值的置信度进行描述,建立基于测量值及其不确定度的数据评估体系,更全面地描述目标 RCS 数据情况^[7-9]。公开资料显示的国内开展海面目标外场动态 RCS 测量的文献不多,同时对于 RCS 测量数据的不确定研究分

析主要集中在理论误差的分析及内场静态或者仿真数据的误差分析,而对于外场测量系统及其测量数据的不确定分析较少,且主要开展理论模型误差、测量设备系统、标校系统以及雷达设备分系统的不确定度的分析,关注 RCS 跟踪与测量系统全系统的不确定分析较少^[3,6-8]。本文结合不确定度的基本理论,对 X 波段 RCS 跟踪测量系统外场动态测量时的全系统不确定进行分析,包括了雷达及其跟踪系统、海面低空的环境因素和标校系统,为更好地描述该测量系统的测量结果提供了支撑。

1 不确定度分析理论

测量不确定度是与测量结果相关联的参数,表征合理地赋予被测量值的分散性,分为合成标准不确定度及扩展不确定度,其评定方法包括利用统计偏差进行不确定度评

定的 A 类方法以及不采用统计分析的 B 类评定方法^[5-13]。当系统进行间接测量时,被测量 Y 的测量结果 y 是通过测量各输入量后,即:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_j) \quad (1)$$

式中: x_i 为输入量 X_i 的测量值; x_j 为输入量 X_j 的测量值,且 $j \neq i$;

则测量结果 y 的合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) u(x_i, x_j)} \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为 X_i 的灵敏系数; $\frac{\partial f}{\partial x_j}$ 为 X_j 的灵敏系数; $u(x_i)$ 为 x_i 的标准不确定度; $u(x_j)$ 为 x_j 的标准不确定度; $u(x_i, x_j)$ 为 x_i, x_j 协方差的估计值; $r(x_i, x_j)$ 为 x_i, x_j 相关系数的估计值。

当各输入量均独立不相关时,则:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)$ 为被测量 y 的标准不确定度分量 $u_i(y)$, 因此,可表示为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (4)$$

2 RCS 测量系统不确定度分析

2.1 RCS 测量原理

X 波段 RCS 跟踪测量系统在进行目标 RCS 测量时,系统工作结构如图 1 所示。

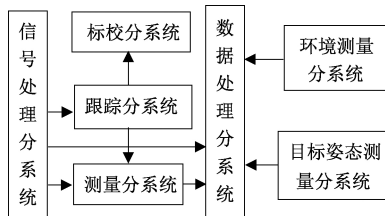


图 1 RCS 跟踪测量系统工作结构

系统采用相对比较法,即在测量目标的 RCS 之前,先对已知 RCS 的标准球进行测量,得到雷达校准常数,然后对目标进行测量,得到雷达目标散射回波功率,根据雷达方程计算出目标的雷达散射截面。对于收发天线共用的系统,根据雷达方程,目标 RCS 测量过程可表达为测试目标 RCS 与标定目标 RCS 的比值^[3-7,14-18]:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_s} = \left(\frac{R}{R_s}\right)^4 \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 \frac{P_{ts} P_r}{P_t P_{rs}} \quad (5)$$

式中: σ 为雷达散射截面; R 为目标距离; f 为频率; P_t 为发射功率; P_r 为接收功率。下标 s 表示与标准标定目标相关的数量。

2.2 RCS 测量系统不确定度源

结合图 1 的分析,对于 X 波段 RCS 跟踪测量系统,系统测量不确定主要来自于雷达系统、环境因素、标校及目标系统 3 个方面。

1) 雷达系统的不确定度

在进行外场动态测量过程中,考虑到系统连续工作时长、实际标校测量距离和信噪比较低等情况,系统测量的不确定度源主要包括:系统非线性、极化损耗、近场照射、天线定位、电子元器件等不确定度^[6-11,14-19]。

(1) 系统非线性不确定度

接收机非线性按如下方法测量:用一个合成器向接收机内注入一个常量标定信号。精度衰减器集成到接收机系统中作为接收机系统的永久部件。在衰减器在值范围内步进时,对接收机的输出进行测量。软件对接收机非线性进行修正,只留下残留衰减器不确定度,衰减器不确定度由厂商报告。

(2) 极化损耗不确定度

如果雷达系统没有很好的极化隔离,会产生很大的测量误差。其交叉极化不确定度是:

$$\Delta\sigma = -20\log(1 - 2 \times 10^{-\epsilon_p/20}) \quad (6)$$

式中: ϵ_p 是单位为分贝的天线极化隔离。

(3) 近场照射不确定度

RCS 近场不确定度是由于照射在目标上的非一致照射引起的。根据雷达方程公式,假定目标是由一个平面波照射。对于 X 波段 RCS 跟踪测量系统,一个简单但很粗略的不确定度估计是照在目标上信号的最大变化量,改变量可有天线方向图得到。

(4) 天线定位不确定度

天线定位不确定度来自于指向不确定度。系统指向不确定度为:

$$\Delta\sigma_p = -40\log \cos\left(\frac{\pi\theta}{4\theta_0}\right) \quad (7)$$

式中: $2\theta_0$ 是天线的 3 dB 波束宽度;而 θ 是最坏情况下的指向误差。式(7)假定天线有 \cos^2 的方位,而且瞄准线得到优化。

(5) 电子元器件不确定度

对于 X 波段 RCS 跟踪测量系统而言,引起的不确定度的电子元器件主要为微波及中频衰减器。系统指标要求,标校后的衰减精度要求不大于 0.1 dB,这样衰减器引入的总测量不确定度为:

$$\Delta A = \left(\sum_{i=1}^4 \Delta A_{i,dB}^2\right)^{\frac{1}{2}} = 0.2 \text{ dB} \quad (8)$$

2) 环境因素的不确定因素

环境因素的不确定度主要包括大气衰减、多路径效应、海杂波、地物杂波及其他背景噪声等,对于 X 波段而言,大气衰减效应较小,可不考虑^[1-3,15-20]。

(1) 多路径效应不确定度

对于海上动态测试,可能会有间接照度路径包含来自

周围环境的海面反射。这种贡献将直接与间接导致射线间的相对相位的不同而改变有效增益。多路径效应不确定度 $\Delta\sigma_m$ 可以用有效增益的最差可能变化来粗略估计。

$$\Delta\sigma_m = 20\lg\left(\frac{1+x}{1-x}\right); x = 2\rho 10^{-|\Delta G|/20} \quad (9)$$

式中: ρ 是反射系数; ΔG 是沿直接路径的增益与沿间接路径增益之间的差值, 由 $2\theta_0$ 分隔, 是俯仰角的 2 倍。

(2) 杂波因素不确定度

影响动态测量的杂波因素主要有海杂波、地杂波、气象杂波, 而关于这 3 种杂波对电波传播的影响在很多文献中都有研究, 特别是海杂波和地杂波^[14-15]。在 X 波段 RCS 跟踪测量系统中, 经大量数据统计分析, 杂波引起的测量不确定度约为 0.1 dB。

(3) 噪音-背景不确定度

系统噪声将对测量不确定度造成贡献。对于信号 S 和噪声-背景 N, RCS 不确定度计算为:

$$\Delta\sigma = -20\lg(1 - 10^{-\epsilon_n/20}) \quad (10)$$

式中: $\epsilon_n = 20\lg(S/N)$ 。在此系统中, 使用最差情况下的信号水平去判定不确定度。

3) 标校系统的不确定度

在采用相对标校法进行目标 RCS 测量时, 标校系统的不确定度主要来自标准球, 如球径误差、表面光洁度等引起^[5,9], 表 1 所示为标准定标体金属球加工不确定度。

表 1 标准球不确定度模型

不确定度源	不确定度模型
球径不确定度	$\Delta\sigma = 20\lg(r_{\max}/r_{\min})$
表面光洁度	$\Delta\sigma = 10\lg\left[\exp\left(-2\frac{2\pi \times h}{\lambda}\right)^2\right]$

其中 h 为表面不平度的标准偏差; λ 为雷达工作波长。

3 RCS 动态测量的总不确定度

结合上述对于 X 波段 RCS 跟踪测量系统不确定度分析, 当对某目标进行测量时, 取 $R=12$ km, $f=10$ GHz, 天线极化隔离 ϵ_p 近似为 35 dB, $\epsilon_n=35$ dB, 天线波束宽度为 1.25° , 海面反射系数 $\rho=0.5$, 路径增益差值 $\Delta G=-30$ dB, 标注球直径为 300 mm, 被测试目标波束内直径长度约为 150 m, 同时为简化分析, 假设各不确定度分量是独立不相关的, 则系统的不确定度如表 2 所示。

由表 2 且结合式(4), 知外场动态测量时, X 波段 RCS 跟踪测量系统的合成不确定度为:

$$u_{\sigma}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2(y)} = 1.24 \text{ dB} \quad (11)$$

当该外场 RCS 测量数据为 σ 时, 则该测量结果为 $\sigma \pm 1.24$ dB。

表 2 系统的不确定源及其计算值

系统不确定度源	数值/dB
系统非线性	0.32
极化损耗	0.57
近场照射	0.76
天线定位误差	0.18
电子元器件误差	0.2
多路径效应	0.54
杂波因素	0.1
噪音-背景	0.3
标准球误差	0.42
其他	0.05

4 结 论

为更好地描述外场动态 RCS 测量数据的离散型, 准确评估 X 波段外场动态跟踪 RCS 测量系统的性能及测试数据的质量, 本文结合不确定分析的基本理论, 对该测量系统的跟踪及 RCS 测量原理进行了全面的分析, 准确并全面地从外场设备系统、海面及低空环境因素、标校系统等测量环节确立了外场动态测试中的各种不确定源, 并结合具体的参数设置、测量条件及测量环境给出了系统的不确定度, 从而可以全面地掌握该测试数据的质量和精度。所提出的不确定度研究分析方法具有极强的系统性和针对性, 并且海面目标 RCS 跟踪测量系统的不确定度分析方法可结合其他测量条件(如海面、低空及地物条件等)同样展开, 具有广泛的通用性和适用性。

参考文献

- [1] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] SKOLNOIK M I, 王军, 等. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 贾建科. 标准目标电磁散射特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(2): 17-19, 27.
- [4] LANK G W. Radar measurement accuracy for fluctuating targets [J]. IEEE Trans. AES, 1991, 27(6): 868-870.
- [5] 测量不确定度的表示及评定, GJB3756-99[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1999.
- [6] 宋新景. 基于极化特征的雷达目标识别技术[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 39-44, 53.
- [7] 庄钊文, 袁乃昌. 雷达散射截面测量—紧凑场理论与技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [8] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [9] 克拉特. 阮颖铮, 陈海, 译. 雷达散射截面—预估、测量和减缩[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988.

- [10] 阮颖铮.雷达截面与隐身技术[M].北京:国防工业出版社, 1998.
- [11] 何艳丽,吕雪芹,敖振浪.海况环境对高频地波雷达信噪比的影响分析[J].仪器仪表学报,2014,35(S2):201-204.
- [12] 朱尚清,申进孝,王贇峰.地质雷达校准及不确定度评定[J].市政技术,2016,34(5):203-205,209.
- [13] 王震,林刚.RCS 动态测量雷达定标及其不确定度分析[J].制导与引信,2014,35(4):33-36.
- [14] 李德鑫,陈曦,潘龙,等.海洋环境雷达探测效能评估系统设计[J].电子测量技术,2017,40(7):80-84.
- [15] 刘辉.某型雷达天线方向图在线测量方法与分析[J].电子测量技术,2013,36(6):105-108,116.
- [16] 张家昌,饶伟,蒋志国.雷达目标一维距离像仿真研究[J].电子测量技术,2013,36(5):38-40,44.
- [17] 李南京,徐志浩,胡楚锋,等.基于成像提取的 RCS 精确测量方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(1):74-82.
- [18] 丁世敬,黄刘宏,李跃波,等.宽带扫频 RCS 自动测量系统设计[J].电子测量技术,2014,37(5):61-63,68.
- [19] 江岩,吕朋尧.基于矢量网络分析的材料反射率测试方法研究[J].国外电子测量技术,2013,32(8):19-22.
- [20] 张浩,彭晨,孙洪涛.多路径的无线网络控制系统镇定性研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(11):1627-1634.

作者简介

沈鹏,硕士、工程师,主要研究方向为雷达 RCS 及电子测量技术。

E-mail:shen-peng@tom.com