

雷达 RCS 目标特性测量的标定与精度分析

李相迎 涂志明

(中国酒泉卫星发射中心 63610 部队, 新疆 库尔勒 841001)

摘要: 雷达散射截面积(RCS: Radar Cross Section)是雷达目标特性测量的重要参数。在介绍雷达 RCS 目标特性(特征)测量原理的基础上,探讨了 RCS 的标定校方法,给出了 RCS 测量的误差估算。通过与实测数据进行比对表明,这一模型科学、实用,并已成功应用于某型雷达的目标特性测量与处理。

关键词: 雷达; RCS; 目标特性

中图分类号: TN 95

文献标识码: A 文章编号: CN11-3987/G3(2002)02-0081-03

雷达目标特征信号是一门新兴专业。在防空导弹体系中,从发现、跟踪、识别、拦截直到引爆杀伤目标等过程,都要根据来袭目标的特征信号来设计探测系统、跟踪制导系统和引信战斗部系统的参数。雷达散射截面(RCS)是表征雷达目标对于照射电磁波散射能力的一个物理量,从 60 年代导弹的识别与反识别到 80 年代飞行器的隐身与反隐身技术,使 RCS 的研究出现了 2 次高潮。可以说 RCS 是雷达目标特性中最基本最重要的一个参数。

1 RCS 的测量原理

雷达 RCS 测量的基础是通过测量回波功率,按照雷达探测方程反推算目标的 RCS。由于某型雷达为对空测量雷达,忽略地物杂波和干扰,接收机接收到目标回波功率后的输出电压与反射截面积关系为:

$$S = (V_0^2/A)(4\pi)^3 R^4 f^2 L_a^2 L_f / P_t G^2 c^2 \quad (1)$$

可以简化为: $S = X \times K$ (2)

$$X = V_0^2 R^4 L_a^2 / A P_t G^2$$

$$K = (4\pi)^3 f^2 L_f / c^2$$

其中: P_t 为发射机输出功率; V_0 为接收机输出电压; L_a 为大气衰减; A 为接收机总增益; L_f 为馈线总损失; G 为天线增益; f 为雷达工作频率; c 为光速; R 为目标距离。

分析目标的 RCS 公式。上述参数都是时变参数,即 $S(t) = X(t) \times K(t)$,因而能在任意 t 时刻被准确(误差范围内)测量。在工程应用中,比较稳定的参数都可以近似为时不变参数(常数),对于稳定性较差的参数,必须进行实时准确测量,即 $S(t) = X(t) \times K$ 。工程上,一般应用相对测量法进行 RCS 的测量。相对测量法原理如下:

标准球 RCS:

$$S_1 = X_1(t) \times K \quad (3)$$

目标 RCS:

$$S_2 = X_2(t) \times K \quad (4)$$

将(3)式变化后代入(4)式可得:

$$S_2(t) = X_2(t) \times S_1 / X_1(t) = \frac{V_{02}^2}{V_{01}^2} \cdot \frac{P_{t1}}{P_{t2}} \cdot \frac{G_1^2}{G_2^2} \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{R_2^4}{R_1^4} \cdot \frac{L_{a2}^2}{L_{a1}^2} \cdot S_1 = C \cdot \frac{V_{02}^2 R_2^4 L_{a2}^2}{P_{t2} A_2} \cdot \frac{1}{\Delta G_2^2} \cdot S_1 \quad (5)$$

其中: $C = \frac{P_{t1} A_1 \Delta G_1^2}{V_{01}^2 R_1^4 L_{a1}^2}$ 为标定值; $\Delta G_1 = \frac{G_1}{G_0}$ 为标准球

跟踪误差所引起的天线增益因子; $\Delta G_2 = \frac{G_2}{G_0}$ 为目
标跟踪误差所引起的天线增益因子。

通过以上分析,可以明显看出相对测量法具有很大的优越性。相对稳定的常数无须进行测量,从而节省了大量的工作,同时大大减少了由于多项测量引入的测量误差。且使用十分方便,只要记录中频输出电压、目标距离、气象条件、发射功率、接收机增益、跟踪误差、定向灵敏度、标准 C

值,即可解算出目标的 RCS 值。

2 RCS 标定校准

国内外通常用 2 种方法对雷达散射截面积进行校准^[1],一是通过已知反射面积的标准体(如标准球)进行校准;二是将标准信号发生器的信号注入雷达系统的前端。后一种方法必须有精密信号源对信号发生器进行校准,且会引入一部分未知损耗;前一种方法则是对整个雷达的校准,简便、实用,精度较好,本文采用第一种方法。当雷达进行高精度 RCS 测量时,需要对变化的参数进行实时记录,如发射功率、接收机总增益、大气衰减、天线增益、目标距离、中频输出电压等。其中接收机总增益是回波功率、目标径向速度的函数。即:

$$A = A[P_i(t), V(t)] \quad (6)$$

大气衰减是目标方位、仰角、目标距离、气象条件的函数。即:

$$L_a = L_a[\alpha(t), \beta(t), R(t), W(t)] \quad (7)$$

天线增益是跟踪误差角的函数

$$G = G[\Delta\alpha(t), \Delta\beta(t)] \quad (8)$$

因此,雷达标定校准的任务有 2 项内容:通过各向同性的标准球(或标定体)的 RCS 的测量解算相对稳定的常数项;实时测量时变参数项如 $V(t), P_i(t), P(t), \alpha(t), \beta(t), R(t), W(T), \Delta\alpha(t), \Delta\beta(t)$ 等。通过事先标定找出它们与 A, L_a, G 之间的函数(或列表)关系。

1) 接收机总增益 A 标定。无论对标准球 C 值的标定,还是对目标 RCS 值的测算,都需事前对接收机增益进行标定。标定的目的是建立雷达 AGC 电压值与接收机实际增益之间的列表关系。

接收机总增益是输入功率和输入信号频率之间的函数。标定补偿就是消除接收机的非线性、数控衰减器非线性和接收机通带失配影响。由于接收机增益的非线性和带宽失配互相独立,则 $A = A(p_i)$ (接收机增益) $\times L_B(f)$ (通带失配损失)。因此,接收机增益标定分成 2 个步骤:

① $A(p_i)$ 的标定。接收机增益由固定增益、AGC 两部分组成,即 $A(p_i) = A_{AGC} = V_0^2/P_i$ 。由接收机原理可知有如下一一对应关系:

$$P_i \leftrightarrow U_{AGC} \leftrightarrow V_0 \leftrightarrow A(p_i) \leftrightarrow V_0^2/P_i$$

因此改变 P_i ,记录下 P_i, U_{AGC}, V_0 即可建立 U_{AGC} 与 V_0^2/P_i 的对应关系,并存储在计算机中。接收机增益 $A(U_{AGC})$ 的标定框图如图 1 所示:

② $L_B(f)$ 的标定。该项误差的影响通过理论分析可以忽略。

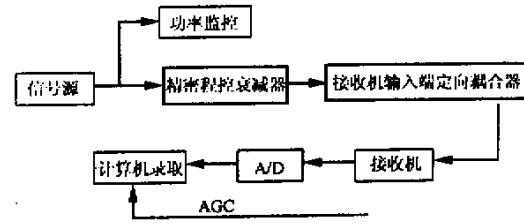


图 1 接收机增益标定

2) 发射机功率标定。由于发射机功率受到管子多种偏置电压的影响,故通过建立电压与输出功率的函数关系比较困难,这里直接采用功率计记录的办法。设发射功率 $P(t) = K_1 \times P_1(t)$, 记录 $P_1(t)$, 耦合系数 K_1 为相对稳定的参数,因而无须用相对测量法测量。

3) 大气衰减 L_a 。 $L_a = L_a[\alpha(t), \beta(t), R(t), W(t)]$ 。由于雷达手册已经提供不同 $\alpha(t), \beta(t), R(t), W(t)$ 条件下电波单位距离传输损耗,理论上通过雷达提供目标的 $\alpha(t), \beta(t), R(t)$ 值^[2], 再通过气象部门提供 $W(t)$ 参数即可算出大气损耗。在实际使用过程中,气象参数跟雷达回波路径的温度、气压、湿度有关,在目前的状况下无法进入使用阶段,可考虑在进行标定值测量时,选取一个好天气飞行,进行标定值的测量;在任务前,通过飞球,选取气象条件的差值,进行气象条件的校正。

4) 天线增益因子。雷达实时记录角方位、俯仰跟踪误差电压,按照定向灵敏度换算出角度量,再算出雷达目标偏离电轴轴向方向的立体角 θ ,通过天线测试,测量出天线方向图 $G(\alpha, \beta)$, 可得 $\Delta G = G(\theta)/G(0)$ 。

5) 标准 C 的标定。通过释放标准球,即可算出 C ,具体步骤略。

3 RCS 精度分析

1) 参量误差。由雷达方程可得目标 RCS 值为:

$$S = \left(\frac{V^2}{A} \right) \cdot (4\pi)^3 R^4 f^2 L_a^2 L_f / P_i G^2 c^2 = \frac{(4\pi)^3 f^2 L_f}{c^2} \frac{R^4 V^2 L_a^2}{P_i G^2 A} \quad (9)$$

通过对上式求偏微分可对 RCS 误差进行估算。但实际无须对上述方程中所有变量进行偏微分,因为采用相对测量法之后,对频率 f 、雷达馈线损耗 L_f 、光速等相对稳定量被认为完全抵消。

因此,只要对 V, A, R, P_t, G, L_a 进行偏微分即可。

令 $k = \frac{(4\pi)^3 f^2 L_f}{c^2}$, 则

距离偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_1 = k \cdot \frac{4R^3 V^2 L_a^2}{P_t A G^2} \cdot \Delta R = 4S(\Delta R/R) \quad (10)$$

电压偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_2 = k \cdot \frac{2R^4 V^2 L_a^2}{P_t A G^2} \cdot \Delta V = 2S(\Delta V/V) \quad (11)$$

大气损耗偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_3 = k \cdot \frac{2R^4 V^2 L_a}{P_t A G^2} \cdot \Delta L_a = 2S(\Delta L_a/L_a) \quad (12)$$

发射功率偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_4 = -k \cdot \frac{R^4 V^2 L_a^2}{P_t^2 A G^2} \cdot \Delta P_t = -S(\Delta P_t/P_t) \quad (13)$$

接收机增益偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_5 = -k \cdot \frac{R^4 V^2 L_a^2}{P_t A G^2} \cdot \Delta A = -2S(\Delta A/A) \quad (14)$$

天线增益偏差所引起的 RCS 偏差为:

$$\Delta S_6 = -k \cdot \frac{2R^4 V^2 L_a^2}{P_t A G^3} \cdot \Delta G = -2S(\Delta G/G) \quad (15)$$

由于上述变量互相独立,则总 RCS 误差为:

$$\begin{aligned} \Delta S^2 &= \sum_{i=1}^6 \Delta S_i^2 = 16S^2(\Delta R/R)^2 + 4S^2(\Delta V/V)^2 + \\ &4S^2(\Delta L_a/L_a)^2 + S^2(\Delta P_t/P_t)^2 + S^2(\Delta A/A)^2 + \\ &4S^2(\Delta G/G)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

得到 RCS 的相对标准差为:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\Delta S^2}{S^2}} = (16\sigma_R^2 + 4\sigma_V^2 + 4\sigma_{L_a}^2 + \sigma_{P_t}^2 + \sigma_A^2 + 4\sigma_G^2)^{1/2} \quad (17)$$

其中: $\sigma_{P_t} = 0.25$, $\sigma_{L_a} = 0.25$, $\sigma_V = 0.25$, $\sigma_A = 0.25$, $\sigma_G = 0.047$, σ_R 可忽略, 得 $\sigma_s = 0.8$ 。

2) 方法误差。方法误差是指采用标准铝球进行相对 RCS 测量所引入的误差, 主要指标准球的误差。根据国外经验, 标准球的误差 $\sigma_m = 0.2$ 。

不可预计误差 $\sigma_N = 0.2$ 。

3) 总误差。 $\sigma = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_m^2 + \sigma_N^2} = 0.9$ 。若 E 代表误差, 则 $E(\text{测}/\text{真}) = 10 \lg(\sigma+1) = 2.8 \text{ dB}$ 。

4) 实测数据误差分析。对 12 cm 和 16 cm 金属球(理论值分别为 -19.465 dB 和 -16.966 dB)的测量数据分别如图 2 和图 3 所示。

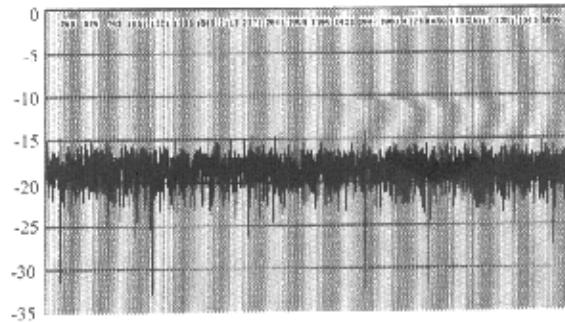


图 2 12 cm 标准球实测曲线(均方差 2.48 dB)

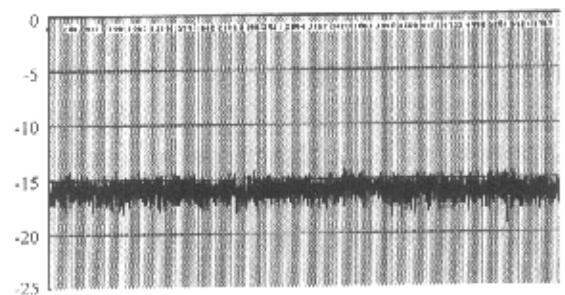


图 3 16 cm 标准球实测曲线(均方差 2.32 dB)

参 考 文 献

- [1] 黄培康, 林桂森, 樊正芳, 等. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

Calibration and Analysis of Precision for Radar RCS Target Signature

LI Xiang-ying TU Zhi-ming

(63610 Troops, CJSLC, Kuerle, Xinjiang 841001, China)

Abstract: Radar target RCS is an important parameter in target signature. Based on the principle of RCS measurement, this paper gives the calibration and error calculation of RCS measurement. Compared with the RCS data recorded, this analysis model is scientific and practical, and has applied in process of target signature measurement of a radar system.

Key words: radar; RCS; target signature

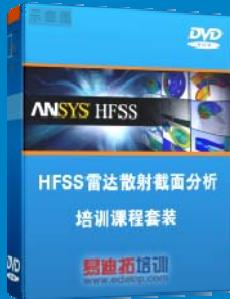
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>