

基于毫米波的海上目标 RCS 测量标定分析

沈鹏, 张德保, 宋广

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001)

摘要: **目的** 提高靶场毫米波海上目标 RCS 测量标定精度。**方法** 针对海上目标的外场雷达目标特性(Radar Cross Section, RCS)测量系统动态标定问题, 在给出了无源相对标校法的基础上, 对毫米波 RCS 测量系统标定过程中云雾杂波、大气衰减、海面及地面杂波的影响进行详细分析。**结果** 结合靶场外场实际测量, 提出了衰减修正、合理选择标校气象条件等相应减小标定误差的措施。**结论** 基于毫米波海上目标 RCS 测量标定的分析及其措施可极大地减小毫米波外场海面测量标校中气象环境、海面或地面杂波等对系统标定的影响, 提高系统标定精度。

关键词: 毫米波; RCS 测量; 标定; 杂波

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.009

中图分类号: TJ01; Q811

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)04-0042-03

RCS Measurement Calibration Analysis of Sea Target Based on Millimeter Wave

SHEN Peng, ZHANG De-bao, SONG Guang
(Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao 066001, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve RSC measurement calibration accuracy of sea target based on millimeter wave. **Methods** Armed at the dynamic calibration problem of outfield RCS (radar cross section) dynamic measurement system for target on the sea, based on the passive relative calibration method given, influences of cloud clutter, atmospheric attenuation as well as sea surface and ground clutter in calibrating the millimeter wave RCS measurement system were analyzed in details. **Results** Measures such as attenuation correction and proper selection of proper meteorological condition for decreasing relative calibration error were proposed in combination with actual outfield measurement of the range. **Conclusion** Analysis based on millimeter wave sea target RCS measurement calibration and measures can greatly reduce influences of meteorological environment as well as sea surface and ground clutter on the system calibration in the millimeter wave outfield sea surface measurement and improve the system calibration accuracy.

KEY WORDS: millimeter wave; RCS measurement; calibration; clutter

雷达散射截面(RCS)是雷达目标特性的基本参数之一。外场 RCS 测量系统的标定, 就是通过对标准体 RCS 的测量, 建立起包含环境因素的目标 RCS 与雷达接收机回波之间的关系, 并由比对推算出被测目标的 RCS 值。在现代电子武器中, 毫米波段制导技术的应用, 相应频段的 RCS 测量技术也逐渐发展起来。与厘米波等其他频段相比, 毫米波段有着大量显著的特性, 从而影响着毫米波 RCS 测量系统的标校、测量^[1-3]。文中在结合靶场海上目标毫米波 RCS

动态测量的基础上, 对海上目标毫米波 RCS 测量标定的影响因素进行了分析, 并提出相应修正、减小误差的方法, 以提高系统 RCS 标定测量、精度。

1 RCS 测量系统标校

当毫米波 RCS 测量系统采用无源标校法时, 即通过已知反射面积的标准体(如标准球)进行标定, 与其他方法相比, 无源标校可对整个雷达进行标定,

精度较好,且更适合外场测量。

进行系统校准时,有雷达方程:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} F^4 10^{-\alpha R} \quad (1)$$

式中: σ 为目标雷达截面积; P_t 为接收功率; R 为目标距离; G 为天线增益; P_t 为发射功率; λ 为雷达工作波长; L 为雷达系统损耗因子; F 为考虑到地面反射后的天线方向图传播因子; α 为大气传播衰减因子。

当不考虑大气衰减及 F 时有:

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 L} \cdot \frac{P_t \sigma}{R^4} \quad (2)$$

当测量雷达工作稳定情况下,其雷达方程的性能参数可表示为:

$$U = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 L} = \frac{P_t R^4}{P_r \sigma} \quad (3)$$

标准体的 RCS 值是已知的,测量并求得参数 U 即是测量系统的标定过程,它可建立起测量系统回波功率与测量环境、目标 RCS 等之间的对应关系^[2,4-6]。对于该标定方法,只要得到标准功率信号的相对值就可以,因此它是一个相对标定过程。外场动态标定时,各种外界环境因素都会引入一定的误差,从而会影响标定和测量精度。

2 云或雾等杂波影响分析

在一般的晴天的情况下,云雾引起的衰减是由云雾粒子对电波的吸收与散射导致的,由于大气云雾中的大多数粒子直径都很小,且都为水粒,因而瑞利散射是适用的^[3]。其衰减率为:

$$\gamma = \frac{0.819 f \varepsilon_r''}{(\varepsilon_r' + 2)^2 + \varepsilon_r'^2} w \quad (4)$$

式中: f 为频率; w 为粒子空间浓度; ε_r' , ε_r'' 为粒子相对介电常数的实部与虚部。

在毫米波段,电磁传播路径上云或雾引起的后向散射虽然很弱,但与厘米波等其他波段相比,其衰减作用要严重得多。20 °C 云、雾条件下,波长为 8 mm 时的后向散射系数见表 1。

当在云雾比较严重的天气情况下进行毫米波 RCS 测量系统标校时,不加修正与修正后的标校测量数据可能出现几分贝的量差,从而使雷达测量结果失真^[4-7]。考虑到波长的关系,且结合式(4)可知, RCS 测量系统标校时,毫米波衰减要比厘米波衰减大。为确保标校测量准确性,必须对毫米波衰减进行补偿。当进行海上目标毫米波段 RCS 测量标定时,因为海面湿度、云雾等天气情况很复杂,并且气象因素很难克服,所以系统标定尽量选择在空气湿度小、无云雾、陆地风向、海况较好的天气开展。

表 1 20 °C 时云或雾的后向散射

序号	云雾中液体水的质量浓度/(g·m ⁻³)	后向散射系数/(10 ⁻¹⁰ m ² ·m ⁻³)
1	0.010	0.0035
2	0.015	0.0450
3	0.025	0.2160
4	0.048	0.9120
3	0.100	6.5000
4	0.150	17.0000
5	0.360	24.5000
6	0.850	46.0200
7	1.000	55.350

3 大气衰减影响分析

大气对电磁波有衰减作用,且对毫米波频段有着明显区别于厘米波频段的特点。除相对比较严重外,还与气象条件密切相关,气象条件不同,毫米波大气衰减的差异也很明显。

毫米波大气衰减的主要原因是水蒸气和氧气对电磁波的吸收。在海面测量标定情况下,海面的湿度和盐雾性使得大气吸收衰减是关键因素,当衰减的影响足够大而形成问题时,该环节就必须足够重视^[8-12]。

当距离 R 确定时,在 100 MHz~50 GHz 频率范围内,大气衰减系数 α 为:

$$\alpha = \exp(-2 \int_0^R \alpha(R) dR) = \exp(-2 \int_0^R (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) dR) \quad (5)$$

式中 $\alpha(R)$ 为单位距离的衰减,在毫米波段它主要包括: α_1 为氧气的衰减因子, α_2 , α_3 为水蒸气的衰减因子,均以 dB/km (双向) 为单位。

如在标准温度和地面大气压力下,有:

$$\alpha = \frac{0.68}{\lambda^2}$$

$$\alpha_2 = \frac{7 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{0.018}{\frac{1}{\lambda^2} + 0.018^2} + \frac{0.049}{\left(2 + \frac{1}{\lambda}\right)^2 + 0.049^2} + \frac{0.049}{\left(2 - \frac{1}{\lambda}\right)^2 + 0.049^2} \right]$$

$$\alpha_3 = 8.7 \times 10^{-3} \frac{\rho}{\lambda^2} \quad (6)$$

式中: ρ 为水蒸气的绝对湿度。

由于水蒸气和氧气引起的电磁波吸收都与其各自浓度、温度、湿度有关,因此,在毫米波进行 RCS 测量标定时,应测量记录测试路径上的大气绝对湿度、温度等环境参数。同时依据相关标准并结合实际

工作中积累的经验,根据标定海域的环境气候条件来确定大气衰减的修正。

4 海面及地面杂波影响分析

毫米波 RCS 测量标定时,海面及地面的杂波也会影响到标定的精度。虽然毫米波系统天线相对较窄的波束宽度会减弱地面、海面的电磁反射,但系统较短的波长同时会导致反射更为杂乱^[9-14]。此外,复杂无规律的地面地形和海情,将导致标定目标表面介电特性快速多变,后向散射极不稳定,且反射率较高。这些因素都会对毫米波近程标校产生影响。

在进行毫米波段 RCS 测量标定时,除接收标准体回波外,还接收各种海面及地面杂波,故标定对象可认为是一个由大量随机分布在同质表面的离散目标。若离散目标单位面积后向散射表示为 σ_0 ,则辐照面积为 Q 的离散目标 RCS 大小 S_Q 为:

$$S_Q = \sigma_0 \cdot Q \quad (9)$$

式中: σ_0 与标定时的雷达频率、极化和目标的表面介电性质、机械结构特性等有关。在掠射角为 ϕ ,且表面粗糙度远大于毫米波波长时:

$$\sigma_0 = f(\phi + c)^g \quad (10)$$

式中: f , c , g 是测量积累中得到的经验常数^[3]。

对毫米波 RCS 标定而言,总能量除大部分来自空中标准体外,从海面或地面接收到的电磁信号也会通过天线的旁瓣进入系统接收机,尤其是对于近距离的标校,副瓣漏入的杂波会极大地影响标校精度^[3,11-13]。因此在标校过程中,应结合 RCS 测量系统的性能指标,如波束宽度,最小作用距离等,调节标校体到合适的高度,减小副瓣的杂波。此外大量实践表明,海杂波在雷达逆风照射时最强,顺风照射时最弱。因此在海面 RCS 测量标定时,要综合考虑海面风向和雷达照射方向的问题,避免海杂波影响标定。

5 结语

针对外场动态海面目标在毫米波段进行 RCS 测

量标定时特点要求,对影响测量系统标校的因素进行了总结。具体分析了云雾、大气衰减、海面及地面杂波等对毫米波雷达 RCS 系统测量标定的影响。同时结合分析结果和具体外场实践,相应地提出了修正衰减、选择合适标定气象条件等减小标定误差的途径。这对于在工程实际测量中采取有效的标校方法,提高靶场毫米波 RCS 测量系统标校精度等起到了指导作用。

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] 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.
- [3] 焦培楠, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [4] 肖芳, 周涛, 杨劲飞. 杂波对毫米波雷达 RCS 测量的影响[J]. 舰船电子对抗, 2005, 4(29): 57—59.
- [5] 李永新, 王正林, 李鸣, 等. RCS 测量雷达定标误差分析[J]. 舰船电子对抗, 2007, 25(2): 33—36.
- [6] 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.
- [7] NAN H, HAY K S. Chaotic Modeling of Sea Clutter[J]. Electronic Letters, 1992, 28(22): 2076—2077.
- [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] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [10] 曹丽梅, 王瑛. 雷达隐身与反隐身技术发展综述[J]. 现代导航, 2012, 8(3): 215—218.
- [11] 朱宇光. 靶场复杂电磁环境构建[J]. 四川兵工学报, 2012, 32(3): 119—120.
- [12] 舒楠, 张厚, 李奎源. 强电磁脉冲对雷达系统影响分析[J]. 战术导弹技术, 2011, 13(1): 96—98.
- [13] 王红光, 吴振森, 朱庆林. 大气折射对雷达低仰角跟踪误差的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1893—1896.